

北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示

李建青,高玉巧,花彩霞,夏在连

(中国石化华东分公司 石油勘探开发研究院,江苏 南京 210011)

摘要:近年来,非常规天然气受到各个国家和石油公司的高度重视,页岩气已成为全球非常规天然气勘探开发的热点。中国南方海相页岩形成时代老、热演化程度高、保存条件差、地下构造及地表条件较差,目前缺乏针对中国南方海相页岩气特点的选区评价方法和标准。为此,从中国南方海相页岩气成藏的区域地质背景入手,总结分析北美页岩气成功的勘探经验,类比分析中美页岩气成藏条件差异性,通过页岩气成藏关键控制因素剖析,探索性地提出了中国南方页岩气有利目标的评价思路和技术方法,认为中国南方页岩气选区评价体系和标准应以保存条件为核心、地质评价与经济评价兼顾。按照评价体系选区部署的彭页 HF-1 井产气量达 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了中国石化南方页岩气勘探战略的突破。

关键词:页岩气 海相 选区评价 评价体系 评价标准 成藏条件 中国南方

中图分类号: TE112.36

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)04-0023-05

现代概念的页岩气与传统意义上的泥页岩裂缝气并不完全相同,其是从富有机质页岩地层中开采出来的天然气^[1-5]。20世纪90年代以来,通过理论创新及技术突破,美国页岩气工业得到迅猛发展,2011年页岩气年产量增至 $1\,400 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占北美天然气总产量的23%。中国于2009年开始关注页岩气,聂海宽等在对中上扬子区海相页岩气形成条件分析的基础上,对页岩气发育的有利区进行了预测^[6-12]。目前中国南方页岩气勘探仍处于选区评价阶段,未形成较为成熟的页岩气选区评价体系^[13-19]。与北美实现商业开发页岩相比,中国南方海相页岩形成时代老、热演化程度高、保存条件差、地下构造及地表条件较差^[20-22]。因此,进行南方海相页岩气选区评价,不能照搬国外的页岩气评价体系,须在参考北美各公司评价参数的基础上,根据中国南方的实际地质条件,建立适合中国南方的海相页岩气勘探评价体系。

1 中国南方海相页岩气地质背景

与北美页岩多发育于前陆盆地不同,中国南方古生代3种盆地类型(被动大陆边缘、台内坳陷和裂

谷)控制了研究区古生代3套区域海相富有机质泥页岩的发育与原始分布。其中,被动大陆边缘盆地是下寒武统底页岩的优势分布区,沉积了一套以深海盆地相、深水陆棚相为主的黑色硅质页岩、炭质页岩及粉砂质页岩;晚奥陶世—早志留世江南隆起北侧的克拉通台内坳陷区是页岩的优势发育区,沉积了一套深水、半深水相的富含笔石、藻类的硅质页岩、粉砂质页岩;二叠系页岩层系的发育与分布受裂陷的严格控制,在中上扬子区北缘主要发育上二叠统龙潭组,下扬子区则发育二叠系孤峰组、龙潭组及大隆组,滇黔桂地区从泥盆系到二叠系持续裂陷,二叠系各层系页岩均发育。

中国南方海相页岩遭受多期构造改造^[23-24]。扬子板块及周缘地区的构造改造与变形主要发生在印支期以后,加里东、海西期虽经历了不同规模的抬升剥蚀改造,但总体上未对南方3套主要页岩气赋存层系造成较大影响。印支晚期—燕山早期,扬子板块周缘普遍遭受造山、基底拆离式滑覆等挤压式构造改造,以差异性的挤压与隆升为主;燕山晚期以后,扬子板块内发生明显的构造分异,中、下扬子区发生多期次的断陷与拗陷反转,而上扬子地区则以持续挤压隆升为主。

收稿日期:2014-05-12。

作者简介:李建青,男,高级工程师,博士,从事油气勘探部署研究。联系电话:(025)58611080,E-mail:lijianqing1967@126.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“中石化南方页岩气选区评价及有利目标评价”(P10007)。

构造改造作用导致3套主力层系在不同的构造带或构造部位形成不同的残留分布特征。位于逆冲推覆体系根带的雪峰隆起区,由于强烈逆冲推覆,上二叠统、上奥陶统一志留统基本被剥蚀殆尽,下寒武统呈断片状或残留式分布。逆冲推覆体系中带发育叠瓦扇式逆冲断层组合,以下寒武统与上奥陶统一志留统2套软弱层为滑脱层形成双重构造系统,下寒武统保存相对较好,部分背斜核部见出露,而上奥陶统一志留统则只在向斜核部保存较好,背斜核部大多已被剥蚀。逆冲推覆体系锋带受晚期构造叠加影响较弱,背斜核部以出露三叠系为主。

2 北美页岩气勘探经验

与常规油气的生、储、盖、圈、运、保为成藏关键控制因素不同,页岩气成藏关键控制因素不须考虑圈闭和运移条件。北美页岩气能够实现商业开发,取决于有机质丰度和热演化程度、脆性矿物含量、保存条件、页岩厚度和顶底板条件、地面地形和水文等条件。

2.1 有机质丰度和热演化程度

有机质丰度和热演化程度是页岩气成藏的基本条件。北美页岩气藏页岩有机碳含量(TOC)一般大于2%,镜质组反射率(R_o)普遍大于1.1%,有机碳含量越高,热演化程度越高,页岩气富集条件也就越好。致密页岩之所以具有一定的储集能力和长期稳定产量,主要得益于页岩孔隙类型为微米—纳米级孔隙。北美Barnett页岩主要有纳米级有机孔隙、无机孔隙及微裂隙3种孔隙类型,分析研究结果发现高有机质含量、高演化程度页岩的孔隙以纳米级有机孔隙为主,孔喉一般为几至几十纳米。国外学者早在20世纪90年代就已注意到,富有机质泥页岩有机碳的消耗可以产生有机质内孔隙。Jarvie和Lundell的实验数据^[25]表明,随着有机质热成熟度由0.55%—0.85%—1.40%,干酪根转化成烃的过程中形成的潜在孔隙度由0—2.4%—4.3%,表明在烃源岩演化生烃过程中,有机碳被消耗,孔隙数量增加。

2.2 脆性矿物含量

脆性矿物含量控制了页岩的可改造性。北美典型页岩气藏页岩石英含量为27%~52%,粘土矿物含量为20%~40%,粘土矿物与脆性矿物形成了有机的匹配关系。脆性矿物含量一般高于30%,有利于

通过压裂改造来提高页岩储层的渗透性,从而增加产量。页岩主要属微孔低渗透层系,但高有机质丰度的硅质页岩压裂后易形成网状缝,有利于提高页岩气的产能。

2.3 保存条件

北美页岩气的保存条件控制了页岩气的赋存状态。保存条件较好的Barnett页岩、Haynesville页岩和Marcellus页岩形成的气藏以游离气为主,吸附气为辅,尤其Barnett页岩游离气含量是吸附气含量的1.5倍,而保存条件不好的Antrim页岩、Woodford页岩形成的气藏以吸附气为主,游离气为辅^[1-5]。即使在同一盆地也会存在差异,例如,阿巴拉契亚盆地Ohio页岩埋藏浅,保存条件差,气体组分吸附气与游离气相当,而Marcellus页岩埋藏深,保存条件好,其游离气含量远远高于吸附气含量。

2.4 页岩厚度和顶底板条件

页岩厚度和顶底板条件控制了保存条件。页岩气藏是以富有机质页岩为气源岩、储层及盖层,不间断供气、持续聚集而形成的一种连续型天然气藏。通过对北美页岩气藏的研究发现其成藏特点为:薄层页岩成藏受控于顶底板条件,厚层页岩可自我封闭成藏。

按照理论的微孔道排烃模式,烃源岩向上的排烃厚度为7.6~21 m,向下的排烃厚度为6~14 m^[26],因此,富有机质页岩厚度愈大,气藏富集程度愈高。例如,下Barnett页岩层优质页岩厚度达100余米,页岩保存条件较好,除顶、底部发育的致密灰岩(顶部为Forestburg灰岩、底部为Viola-Simpson灰岩)可有效封盖外,本身厚层页岩也具有良好的封闭性。但是如果页岩厚度较薄,顶底板条件则成为页岩气能否保存的关键。比如,上Barnett富有机质页岩局部厚度仅为15~30 m,但顶、底部分别为致密Marble Falls灰岩和Forestburg灰岩,顶、底部封盖好,因而形成了页岩气藏。

2.5 地面地形和水文等条件

地面地形和水文等条件控制了页岩气的可采性。页岩气作为低丰度的天然气资源,开发时一般须对低孔极低渗透泥页岩致密储层进行大型压裂施工,而压裂施工需要较大面积的平整井场和大量的水,因此能否实现页岩气藏有效开发,地面地形及水文条件等也是重要条件之一。在北美页岩气盆地一般为平原或丘陵区,仅阿巴拉契亚盆地靠近造山带地区为山地地形,地势平坦且水源供给充足,为实现页岩气藏的商业开发提供了可靠保障。

3 中美页岩气成藏条件对比

3.1 相似点

3.1.1 盆地类型与构造背景

现今美国大陆是在古生代冈瓦纳大陆和劳亚大陆“焊接”形成的,被近南北向的阿巴拉契亚和落基2大山脉分为3大块,南部与Ouachita造山带横向相接,主要形成2类盆地。在邻近3大造山带为克拉通基底上的造山带前缘盆地,如福特沃斯盆地及阿巴拉契亚盆地分别为Ouachita造山带及阿巴拉契亚造山带逆冲推覆而形成的前陆盆地;而在远离3大造山带为克拉通盆地,如密执安盆地和伊利诺斯盆地等。中国南方大陆是中元古代末的晋宁运动使华夏、川滇藏等陆块与扬子陆块拼合成统一的华南古大陆,奠定了中国南方新元古代—古生代盆地发育的基底。新元古代—早古生代,中国南方经历了陆块裂解—离散—聚合不同的构造运动,在扬子克拉通南北两侧主要形成了被动大陆边缘盆地及前陆盆地,在扬子陆块内形成了台内坳陷盆地,与北美具有相似的盆地类型及构造背景。

3.1.2 沉积背景

北美页岩大多发育于深水陆棚—盆地沉积环境。以福特沃斯盆地为例,Barnett页岩形成于贫氧—厌氧的深水斜坡—盆地环境,主要为生物—化学成岩的硅质页岩和钙质页岩。与北美页岩沉积环境相似,中国南方下寒武统和下志留统优质页岩亦沉积于深水陆棚—盆地环境。黔中隆起及周缘黄平区块黄页1井钻探揭示,下寒武统九门冲组为深水陆棚沉积,自下而上可分为3个岩性段:下段为热水混入硅质页岩段,薄片下见骨针和硅质胶结的鲕粒;中段为含粉砂泥页岩、粉砂质泥页岩段,薄片下见石英和长石碎屑;上段为硅质泥页岩段,薄片下多见水平层理,硅质以玉髓和蛋白石为主。上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组主要为深水盆地、深水陆棚沉积,岩性主要为灰黑色—黑色页岩、黑色硅质页岩、黑色炭质页岩。在龙马溪组下部还发育大量以笔石为主的生物化石,也指示地层为深水环境沉积的产物。

3.1.3 成藏条件

通过对比中美页岩气地质条件发现,页岩埋深、厚度、有机质类型、有机碳含量及气体成因等方面都具有很好的相似性。从页岩埋深看,湘中大隆组页岩与密执安Antrim页岩可比性好,埋深为200~700 m;黄平、彭水地区页岩埋深与北美其他典型页岩

气盆地相似,为500~3 000 m。湘中大隆组、黄平寒武系、彭水志留系3套页岩厚度为40~150 m,个别地区高达300 m,如黔中隆起及周缘黄平区块黄页1井黑色优质页岩厚度为112 m,夹在中间的84 m气测异常显示最好,尤其在2 325~2 334和2 348~2 362 m井段气测异常幅度最大,类似于Barnett页岩层。有机质类型北美以Ⅱ型为主,也有Ⅰ型,中国南方海相页岩有机质类型也是Ⅰ型或Ⅱ型。从有机碳含量来看,北美页岩一般为2%~4.5%,最高可达25%,与中国南方海相页岩有机碳含量类似。从气体成因来看,北美5大页岩气盆地中,除伊利诺斯盆地New Albany页岩气体成因为生物气外,其余盆地均为热解气;中国南方海相页岩热演化程度较高,生烃较早,绝大多数也为热解气。

3.1.4 矿物组成

脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙和微裂缝发育、含气性及压裂改造方式等的重要因素。页岩中粘土矿物含量越低,石英、长石和方解石等脆性矿物含量越高,岩石脆性越强,越易形成天然裂缝和诱导裂缝,有利于页岩气开采。中国南方3套页岩层系的矿物组成与沃斯堡盆地Barnett页岩具有较好的可比性,硅质含量为30%~50%,粘土矿物含量为25%~45%,页岩脆性矿物含量高,为页岩后期开采提供了良好的压裂改造条件。

3.1.5 物性

选取黄页1井5块样品于美国CoreLab实验室进行了物性分析测试,采用与北美页岩物性测试方法相同的GRI测定方法。结果表明,黄页1井5块样品总孔隙度为3.54%~5.52%,平均值为4.88%,渗透率为 $0.0016 \times 10^{-3} \sim 0.0822 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.0326 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而北美主要产气页岩岩心分析总孔隙度为2.0%~14%,平均值为4.22%~6.51%,渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由此可见,中国南方海相页岩与北美页岩物性相似,且页岩孔隙半径主要分布段也基本一致,根据扫描电镜观察,中国南方海相页岩孔隙半径主要为10~50 nm(图1)。

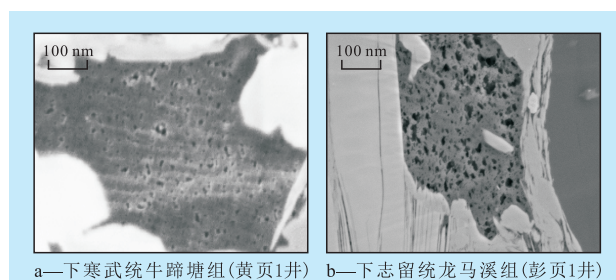


图1 中国南方下寒武统和下志留统2套页岩有机质内孔隙扫描电镜结果

3.2 不同点

3.2.1 发育层系

北美产气页岩主要发育于晚古生界泥盆系、密西西比系及中生界白垩系,5大页岩气盆地中,圣胡安盆地 Lewis 页岩发育于中生界白垩系,福特沃斯盆地 Barnett 页岩为密西西比系,密执安盆地 Antrim 页岩、阿巴拉契亚盆地 Ohio 页岩、伊利诺斯盆地 NewAlbany 页岩为泥盆系,总体来看北美页岩发育时代较中国南方新。

中国南方大陆主要发育下寒武统牛蹄塘组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组2套区域性海相页岩,还发育上二叠统龙潭组一大隆组海陆过渡相泥页岩,页岩发育层系时代较老。

3.2.2 热演化程度

北美产气页岩除阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩部分热演化程度较高(R_o 值大于3%)外,大部分页岩 R_o 值小于2%,总体处于生气窗,气体以热解气为主,也有生物气;中国南方页岩热演化程度高, R_o 值除二叠系处于生气窗外,其余均大于2%,处于过成熟干气阶段。

3.2.3 构造作用改造程度

北美页岩气盆地一般经历了快速埋藏、加热生烃、抬升和稳定沉降4个演化阶段,页岩层始终未被破坏,因此北美页岩气的勘探思路为“弱中找强”,

即从整体构造改造作用弱的区域寻找构造改造相对较强的区域,其主要目的是寻找裂隙相对发育、渗透性相对较好的页岩储层。与北美不同,中国南方大陆普遍经历了加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造叠加改造作用,原型改造阶段的挤压复合叠加、前陆逆冲构造、断陷与拗陷反转3种构造类型控制了页岩分布。

3.2.4 地表条件

北美页岩气盆地一般为平原或丘陵区,仅阿巴拉契亚盆地靠近造山带地区为山地地形,但相对中国南方要平坦。中国南方除四川盆地外,主要为山地、丘陵地形地貌,页岩气钻井及压裂需要交通方便、水源充足且具备一定面积、平坦的井场,在实际勘探过程中往往会遇到地下条件好、地表难以找到井场的情况。因此,在选区评价工作中需要考虑地表条件。

总之,北美页岩形成时代新、热演化程度适中、地下构造及地表条件好,而中国页岩形成时代老、热演化程度高、地下构造及地表条件差(表1)。因此,进行南方海相页岩气选区评价,不能照搬北美页岩气的勘探评价体系,而是要在参考北美各公司页岩气选区评价方法、评价参数的基础上,根据中国南方的实际地质条件,建立适合中国南方的页岩气勘探评价体系。

表1 中美页岩气成藏要素对比											
地区	相 似 点			不 同 点							
	盆地类型	沉积相	埋深/m	页岩厚度/m	TOC,%	微裂缝	R_o ,%	层位	构造运动	地表条件	勘探程度
中国南方	克拉通盆地或前陆盆地	盆地—陆棚相	1 000~3 000	30~300	2~6	发育	2.5~4.5(下古生界); 1~3(上古生界)	寒武系、志留系、二叠系	复杂	复杂	极低,多为油气勘探风险区
北美	克拉通盆地或前陆盆地	盆地—陆棚相	350~4 500	30~150	2~20	发育	1~2	泥盆系、石炭系、白垩系	简单	简单	高,多为常规油气勘探区

4 中国南方海相页岩气选区评价体系及评价标准

通过分析页岩气成藏主控因素,根据中国南方海相地质特点,初步建立了以保存条件为核心、地质评价与经济评价兼顾的中国南方页岩气选区评价体系 and 评价标准。

中国南方页岩气选区方法为:在分析盆地构造特征及构造演化史、盆地沉积特征及沉积发育史的基础上,研究页岩规模参数(页岩厚度和页岩面积)、页岩品质参数(有机碳含量、氯仿沥青“A”含量

和生烃潜量)、页岩生烃条件参数(镜质组反射率和热解峰值)和储集条件参数(储层物性、地层压力、地层温度和矿物成分),将上述参数的平面图叠合,选出勘探低风险区;在已选出的勘探低风险区内,通过构造演化史、断层活动史、顶底板封盖条件、水文条件和压力梯度等研究页岩气藏的保存条件,考虑页岩埋深、地表条件和水源条件等经济条件,优选有利目标区,形成以保存条件为核心,以寻找构造相对稳定区为重点,开展规模、品质、生烃、储集及经济等要素评价的综合评价体系(图2)。最终采用定量参数叠合,结合定性评价,形成了研究区低风险区具有可操作性的评价标准(表2)。

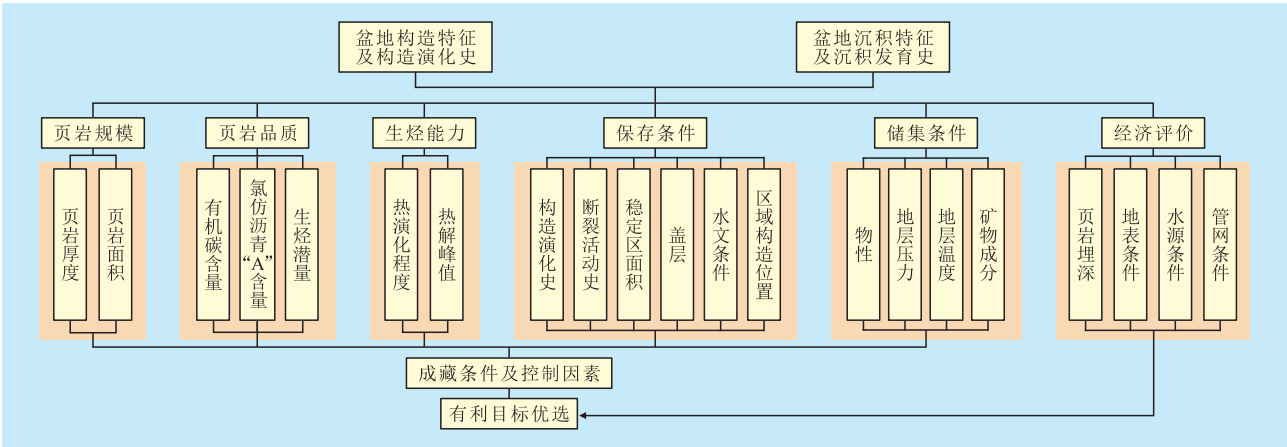


图2 中国南方海相页岩气选区评价体系

表2 中国南方海相页岩气选区评价标准						
风险等级	页岩厚度/m	TOC, %	R _o , %	埋深/m	构造条件	地形条件
低	> 60	> 2	1~3.5	< 3 000	简单	简单
中	30~60	1~2	3.5~4.0	3 000~5 000	较复杂	一般
高	< 30	< 1	<1或>4	> 5 000	复杂	复杂

5 应用实例

根据建立的选区评价体系和评价标准,对川东南—黔中隆起地区45个目标区进行选区评价及勘探部署。根据有利目标区优选结果,在黔南坳陷黄平区块,针对下寒武统九门冲组部署钻探黄页1井,在川东南彭水区块桑柘坪向斜针对上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组部署钻探彭页1井,在湘中涟源区块桥头河向斜针对上二叠统大隆组部署钻探湘页1井,3口页岩气参数井均取得了良好的钻探效果。其中,彭页1井五峰组—龙马溪组含气页岩厚度为88 m,有机碳含量为1.5%~3.5%,气测全烃含量高达22.5%,现场解吸气含量为1.34~2.3 m³/t。以彭页1井为导眼井钻探彭页HF-1水平井,分12段压裂后,产气量达2.5×10⁴ m³/d,截至2014年1月5日,产气量稳定在2×10⁴ m³/d,实现了中国石化南方页岩气勘探战略突破。

6 结束语

通过分析页岩气成藏的关键控制因素,认为页岩有机质丰度和热演化程度是页岩气成藏的基本条件,页岩中脆性矿物含量控制了页岩储集体的渗透性,保存条件控制了页岩气的赋存状态,而页岩净厚度和顶底板条件控制了保存条件,因此开展页

岩气选区评价要以保存条件为核心。

针对中国南方海相页岩有机质热演化程度高、构造运动复杂的地质背景,初步形成了以保存条件为核心,以寻找构造相对稳定区为重点,开展页岩规模、品质、生烃能力、储集及经济等要素评价的综合评价体系。采用定量参数叠合,结合定性评价,形成了可操作性较强的评价标准。提出的评价体系和评价标准有利于指导区块登记、招投标工作,可在勘探部署中发挥重要作用。

参考文献:

[1] Curtis J B.Fractured shale-gas systems[J].AAPG Bulletin,2002,86(11):1 921-1 938.

[2] Mavor Matt.Barnett Shale gas-in-place volume including sorbed and free gas volume: AAPG Southwest Section Meeting, Texas, March1-4,2003[C].Fort Worth:Texas,2003.

[3] Montgomery S L,Jarvie D M,Bowker K A,et al.Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi trillion cubic foot potential [J].AAPG Bulletin,2005,89(2):155-175.

[4] 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.

[5] Hill R G,Zhang Etuan,Katz B J,et al.Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[J].AAPG Bulletin,2007,91(4):501-521.

[6] 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):484-490.

[7] 孟庆峰,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.

[8] 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):350-355.

[9] 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.

(下转第32页)