

四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨

唐嘉贵¹, 吴月先², 赵金洲³, 钟水清^{2,3}, 周宗强^{3,4}, 廖忠会⁵, 舒秋贵⁶

(1 中国石化石油工程西南有限公司 2 中石油川庆钻探工程公司

3 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学

4 长庆油田分公司 5 中国石化西南分公司工程技术研究院 6 西华师范大学)

吴月先等. 四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨. 钻采工艺, 2008, 31(3): 38-42

摘 要: 四川盆地暗色页岩分布广、层系多, 页岩气资源丰富、利用价值很高。页岩气藏勘探技术属于世界级难题, 技术创新潜力也很大。地质理论认识不断深化, 促使页岩气资源调查全面展开。为此, 提出页岩气藏勘探是世界范围内新兴的边缘专业学科领域, 勘探的原则在于将地质理论认识与四川盆地的具体地质状况结合起来, 发挥有针对性的指导作用。钻井、开采工程技术在于提高自主创新和集成创新的针对性和实用性, 强化基础研究, 提高科研项目级别。钻井、开采工程技术述评及提示, 有助于扩大技术攻关的新思路。勘探原则和勘探技术选向前探讨, 对于川南、川西南地区页岩气藏勘探示范工程项目启动有着重要的现实意义。

关键词: 川南地区; 页岩气藏; 非常规资源; 裂缝型储层; 钻井; 开发

中图分类号: TE 132.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-768X(2008)03-0038-05

随着天然气勘探的发展, 非常规天然气的勘探和开发逐渐引起人们的重视。非常规天然气(主要包括致密储层气、页岩气、煤层气、次生气、水溶气、天然气水合物等)储量丰富, 潜力巨大, 是未来勘探开发的重要方向^{[1]~[15]}。

中国矿物能源资源具有多元化组成结构特点, 适应高油价时代自主能源的需求, 不断加大对非常规油气资源勘探开发资金和技术投入, 在于寻求资源供给的多种途径。四川盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、民和盆地、松辽盆地、江汉盆地、渤海盆地和漠黔桂盆地, 均是暗色页岩广泛分布的地区。暗色页岩展布的面积大, 塔里木盆地东南地区达到 $(1.8 \sim 2.5) \times 10^4 \text{ km}^2$, 鄂尔多斯盆地中的长 7 暗色页岩占整个盆地面积的 1/3。暗色页岩发育厚度大, 松辽盆地北部、吐哈盆地中北部、民和盆地中西部、塔里木盆地东南部, 一般达 200 ~ 400 m, 最厚可达到 600 ~ 800 m。暗色页岩类型多, 有陆相沉积岩和海相沉积岩。暗色页岩存在的层系多, 纵向上在较老的层系中或较新的层系中均存在, 特别是南方地区志留系暗色页岩更是集中发育存在。暗色页岩于盆地较中心部位尤为发育, 湖相和海相较深水区域为较佳沉积相带。

暗色页岩埋藏深度变化大, 除老层系深埋、新层系浅埋外, 也有老层系浅埋状态存在。暗色页岩的生烃能力较强, 富含有机质, 民和盆地永登中西部地区, 暗色页岩生烃量占整个盆地生烃总量的 75%。暗色页岩不仅是常规油气藏的封闭盖层和烃源岩, 还是一种特殊的储集岩, 页岩气藏具裂缝型地质特点, 勘探更加引起重视。

一、地质理论认识新进展

1. 盖层封闭性能特征

暗色页岩是在湖相、海相还原环境条件下沉积和压实成岩的, 多发育在盆地较中心的深水区域。只有相变影响明显区域, 岩体变薄, 与其它地层构成薄互层状。暗色页岩的岩块致密、硬脆、孔渗性差, 具有封闭、保护常规油气藏资源的作用。暗色页岩矿物成分主要由多种泥质矿物和非泥质矿物组成, 泥质、硅质、钙质和火山灰较常见, 尚含有多种金属元素, 尤其是放射性元素。暗色页岩还含有生物化石及生物化石碎屑, 陆相和海相生物化类是有所区别。暗色页岩的颜色越暗, 一般含有机质则较多。暗色页岩水化稳定性差, 钻开前片状黏土颗粒处于力学平衡状, 钻开后离子、水分子的渗流扩散和交

收稿日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金重大项目研究成果(编号:90610013)。

作者简介: 唐嘉贵(1956-), 高级工程师, 1978年毕业于原西南石油学院油气井工程专业, 长期从事石油天然气钻井研究及管理工作, 现任中国石化石油工程西南有限公司副经理。地址:(610050)四川省成都市, 电话:(028)86745577, E-mail: zsq@trqgy.cn

换,引起片状黏土颗粒间离子浓度发生变化,进而引起电势变化,导致双电层斥力发生变化,原有力学平衡被打破,造成页岩内部膨胀而产生体积变形能^[1]。

2. 烃源岩性能特征

暗色页岩富含有机质,有机质包括腐泥型和腐植型两大类。甘酪根有三种类型差别,I型、II型和III型的生油、生气能力有所不同。页岩气在本质上就是连续生成的生物化学成因气、热成因气或两者的混合^[2]。初期产生的页岩气多在干酪根和黏土矿物颗粒表面上以吸附状态存在,甚至于在干酪根和沥青质中以溶解状态存在。生物化学成因气的生成要受到埋藏深度和地层温度条件制约的。而热成因气的大量生成,也只能在生烃门限后的成熟阶段或高成熟阶段。往往地层快速深埋、加速了热成因的大量生成。暗色页岩作为一种较好的烃源岩,要生成更多的页岩气,与分布的面积大、厚度大密切相关,与有机质的含量多密切相关。作为一种较好的烃源岩,其所产生的大量页岩气,还是常规气藏重要的天然气补充来源,往往常规大型天然气藏发现,与附近暗色页岩层的发现密切相关。

3. 储集岩性能特征

暗色页岩还是一种特殊的储集岩,这是世界范围内地质研究中的新兴领域。暗色页岩孔径很小,大于50nm为大孔,2~50nm为中孔,小于2nm为微孔。因而比表面积大、孔隙小,结构复杂^[3]。孔隙还是页岩气初次运移的重要通道。氮气吸附法测试表明有大量的微孔和中孔存在,也有孔径大于50nm的大孔隙存在。总孔隙度一般小于10%,含气孔隙一般不到总孔隙的一半。孔隙类型主要是粉细颗粒的粒间孔和晶间孔。孔隙的喉道很小,基质渗透率很低,往往是页岩气被吸附的重要场所。有效连通孔隙度低,孔隙储集的页岩气很有限。暗色页岩中的裂缝尽管规模差别较大,仍是游离状页岩气储集的主要场所,裂缝起到储渗双重功能,渗透率远远大于基质孔的渗透率。钻遇暗色页岩裂缝时,还能有较好的气显示,正是导流能力较强的体现。暗色页岩裂缝类型多样,有成岩形成的层理,有高压异常气膨胀时形成的破裂缝,有剪切应力作用形成的剪切缝,也有构造作用形成的张性裂缝。这与构造、褶皱和断层的出现密切相关。裂缝有产生和发展的过程,尤其是较多种类型天然裂缝彼此大范围连通,可形成一个独立的压力系统,也就是一个独立的页岩气藏。暗色页岩中的未充填缝和部分充填缝,对于页岩游离气的储集和产出的作用才是有效的。各

种有效裂缝对上覆地层应力的敏感程度有区别,未充填缝对应力敏感程度较高,而部分充填缝对应力敏感程度较低,也与充填物的物理性质密切相关。裂缝的形态产状有水平缝和垂直缝,一般前者较后者的应力敏感程度较高。暗色页岩孔隙流体压力级别对上覆地层应力敏感程度有关,高压异常页岩气藏较静水压力页岩气藏应力敏感影响时间推迟。

4. 页岩气藏形成与演变特征^{[4],[5]}

页岩气成藏体现出了非常复杂的多机理递变特点,除页岩气在孔隙水、干酪根以及液态烃中溶解以外,页岩气从生烃初期时的吸附聚集,到大量生烃时期的活塞式运聚,再到生烃高峰时期的置模式运聚,体现出了页岩气自身所构成的完整性成藏机理序列。由此可知,页岩气的吸附聚集和活塞式运聚,仅局限于页岩层内部,对于页岩气藏的形成是建设性的,而页岩气的置模式运聚却超出了页岩层本身。主要是向页岩层以外的附近储集层提供补充气源,以至于为常规的大型天然气藏的形成发挥重要的作用。而暗色页岩具有对扩散天然气气封闭作用,仍可以有抑制浓度封闭作用和替代浓度封闭作用2种类型。由于异常孔隙流体压力的存在,孔隙水中的含气浓度明显大于正常压实地层孔隙中的含气浓度,使原来向上递减的含气浓度转变为向下递减。欠压实带以下部分生成的页岩气在向下递减含气浓度的作用下,向下伏地层中扩散运移,抑制了下伏扩散相天然气的向上运移,使其在暗色页岩之下聚集。这种抑制浓度封闭作用对于页岩气藏形成,对于页岩气藏之下的天然气藏的形成均是有利的。当孔隙流体压力为静水压力时,暗色页岩中生成的页岩气可使孔隙水达到饱和状态,受其所处温压条件的影响,暗色页岩孔隙水的含气浓度小于下伏地层孔隙水中的含气浓度,于是含气浓度向上递减。页岩气在向上递减浓度的作用下,就向暗色页岩地表方向扩散运移,不需要暗色页岩层之下的天然气向上运移,也就只能聚在暗色页岩之下。这种替代浓度封闭作用,对于暗色页岩之下的天然气藏起到了封闭保存的作用。抑制浓度封闭作用因膨胀裂口的出现而失去,就意味着前一轮形成的页岩气藏被破坏。对于暗色页岩之上的天然气藏形成,却补充了大量的天然气资源。再由替代浓度封闭作用向抑制浓度封闭作用转化,就得有新一轮页岩气藏形成过程。只要确定出暗色页岩类型及目前所处的演化阶段,就可以依据演化模式预测暗色页岩对扩散相天然气封闭能力及其演化。这对于寻找页岩气藏有着重要的现实意义。

二、川渝地区页岩气资源潜力

1. 侏罗系页岩气资源潜力^{[6]~[8]}

侏罗系中统和下统是四川盆地内暗色页岩发育的主要层系。陆相沉积带仍较有利,由深一半深湖相沉积,逐步演变为浅湖一半深湖相沉积,近湖盆较中心地区沉积相特别好。浅湖~半深水湖相沉积的湖盆中心在达州—平昌一带,暗色页岩厚度最大。而湖盆中心的西侧附近的暗色页岩仍较发育,均是主要的烃源岩。厚度在12~132 m之间变化,平均厚度45 m。深一半深水湖相沉积的有利地区在南充—重庆一线的东北部,暗色页岩有效厚度50 m以上,最大厚度达379 m;四川盆地东部地区暗色页岩有效厚度为14.6~379 m,平均为142 m;川北地区暗色页岩有效厚度15~213 m,平均为96 m;川中地区暗色页岩有效厚度为12~132 m,平均为45 m。川西地区侏罗系“红层”中所夹的暗色页岩厚度为47.5~114 m,钻探中还发现沥青。有机碳含量0.23%~1.61%,甘酪根以Ⅲ型为主,有机质热演化程度适中, R_o 值0.51%~1.04%,生气潜力中等以上,有一定的生烃规模。生气量为(5.61~18.26) $\times 10^{12}$ m³,也是重要的辅助气源岩,为附近地层常规气藏成藏补充了大量的天然气。川中地区中下侏罗系暗色页岩有机碳平均丰度1.19%,大于1.0%的样品达45%,有较好的生烃能力。甘酪根腐泥组分含量47%~79%之间,多在50%以上。甘酪根(母质)主要为Ⅱ~Ⅲ型。 R_o 为0.70%~1.12%,处于成油高峰期,有利于液烃大量生成。川中地区中、下侏罗统暗色页岩生油量 127.05×10^8 t,生气量 $80\ 980 \times 10^8$ m³,生烃强度为 59.17×10^4 t/km²,以中部和东北部生烃强度高,凝折气藏特征明显,天然气多为湿气。

2. 二叠系页岩气资源潜力^[9]

二叠系上统顶部发育有海相深水沉积的暗色页岩,这是海相重要烃源岩大隆组,其中含多种生物化石或化石碎片。四川盆地北部从东到西曾分布有4个大型海槽:城口—鄂西海槽、开江—梁平海槽、广元—旺苍海槽和松潘—甘孜海槽。至今的钻探已表明前三个海槽地区均有大隆组暗色页岩广泛分布。大隆组暗色页岩属于较老的地层,但现今的埋藏深度多大于5 000 m,仍有浅层和地表露头存在。四川盆地周边的龙门山、火仓山、大巴山前缘的广元、旺苍、城口、巫山等地均有大隆组地层露头存在。广元、旺苍以南的河湾场、九龙山、张家碛等地的钻井也钻遇过大隆组的地层。大隆组暗色页岩的厚度有

从西向东变薄的趋势:广元—旺苍海槽区14口井,钻遇大隆组地层厚度16.6~59.5 m,平均32.34 m;开江—梁平海槽,7口井钻遇大隆组地层厚度12.5~29.0 m,平均22.86 m;城口—鄂西海槽区,6口井钻遇大隆组地层厚度4.7~29.95 m,平均15.67 m。因大隆组暗色页岩是集中发育的,所以倍受关注。大隆组暗色页岩不仅分布广泛,且分布的面积也很大,其中开江—梁平海槽相区内分布的面积约 2.5×10^4 km²,岩体体积特别巨大。大隆组暗色页岩富含有机质,仅开江—梁平海槽相区18个样品的有机碳含量平均为3.88%,其中8个黑色样品平均含量达6.21%;甘酪根的腐泥组含量平均为71.9%,镜质组平均为11.3%,惰质组平均为16.4%,干酪根属于Ⅱ型。埋藏过程中地层温度60℃, R_o 达0.5%开始生液烃, R_o 达0.6%后进入生油高峰期。埋藏温度100℃, R_o 达1.0%时就进入生湿气高峰,以至于埋深温度超过120℃, R_o 达1.2%后就开始生沥青。因而暗色页岩已进入干气生成阶段,历经了生烃和排烃过程,这是有效的烃源岩,不仅为长兴组生物礁气藏和飞仙关组云岩气藏的形成提供了大量补充气源,也有效地封闭了之下的长兴组气藏。目前,中石化和中石油在开江—梁平海槽相区相继获得天然气藏勘探重大发现和新突破。

3. 志留系页岩气资源潜力

志留系是国内南方地区的重要烃源岩,也是埋藏较老的地层。特别是志留系下统地层还是四川盆地上覆碳酸盐岩气藏天然气主要补充来源,尤其为四川盆地东部地区石炭系云岩气藏集中存在发挥了重要的作用。志留系下统暗色页岩最初生烃阶段374~258 Ma,未能有充注能力。258~245 Ma期间才达生油高峰,充注效率增大。到245 Ma时的充注效率达到 55×10^8 m³/km²,处于相对平稳时期。163~144 Ma期间干酪根生气,115~40 Ma原油裂解生气,形成晚期充注效率高后期。正是由于晚期原油裂解型烃源灶的继续生气,补充了喜山运动造成的天然气散失,使得石炭系气藏晚期构造抬升的背景下得以保存^[10]。川南地区志留系下统页岩气资源很丰富,中石油于2006年的资源调查成果丰硕。威远地区的九老洞组和泸州地区的龙马溪组暗色页岩,均有页岩气成藏的地质条件。威远阳高寺和九奎山区域,158口井前期钻井资料复查,普遍有气显示。威5井九老洞组暗色页岩井段,钻井显示气浸和井喷级别,还获得天然气产量 2.46×10^4 m³/d,还是在未进行裂缝型气藏解堵措施条件下获得的。泸州地区龙马溪组暗色页岩地层,数口井资料复查也

有不同级别的气显示。威远和泸州两地区的两套暗色页岩地层,页岩气资源初步评估就多达 $6.8 \times 10^{12} \text{ m}^3 \sim 8.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 相当于四川盆地内的常规天然气资源总量,勘探潜力很大。

三、页岩气藏勘探途径

1. 勘探原则

页岩气藏主控地质因素及分布规律^[15],对四川盆地页岩气藏勘探原则的探讨很有启示,仍需进行完善,有针对性地具体化。页岩气藏勘探尽可能先于有机碳含量较高区域内进行,特别是有机碳含量大于2%的区域,应优先对黑色页岩较发育的区域进行勘探。页岩镜质体反射率大于0.4%的区域,有利于寻找页岩气藏。对于含沥青的过于成熟区域要慎重勘探。陆相和海相页岩气藏勘探应彼此顾及,首先勘探沉积较中心区域,有所发现的条件下,再逐步扩大勘探范围。陆相中的湖相和三角洲相是较为有利的优先勘探区域。也更应该了解区域内海相—海陆过渡相—陆相的纵向时空变化规律,寻求纵向上追踪勘探。裂缝发育区域的诊断就是关键环节,优选构造转折带,地应力较集中带、褶皱—断裂带重点勘探,现今的中深埋藏深度是勘探重点,海相沉积页岩的过大抬升区域,要进行侦察性勘探。较稳定沉积地区的浅层应以生物气藏勘探为重点,中深层要以凝折气藏勘探为重点。暗色页岩单层厚度一般大于30 m 较适合勘探,应结合有机碳的含量进行综合选择。暗色页岩层流体高势能区是勘探的重点,游离页岩气高压异常带应优先勘探,而吸附高压异常带勘探可推后进行,低压异常带勘探要慎重,也不放过低压异常中仍有较大的产出能力的可能性。暗色页岩类型及目前所处的演化阶段,要用演化模型预测其对扩散天然气的封闭能力及演化阶段。也可以由现有的发现去深化认识,促使地质研究开展。页岩气藏成藏与构造圈闭关系一般不明显,预示隐蔽性页岩气藏具有广泛性。也应优先对构造—岩性圈闭、褶皱—断层圈闭先进行勘探,这与储集层内天然裂缝较为发育有关。对于海相生成含钙质较多的地带宜于先勘探,也可能与溶蚀连通裂缝出现有关。四川盆地暗色页岩气藏勘探潜力很大,盆地东部和南部志留系是勘探的战略重点,川南地区更是勘探的突破口,要作为国内勘探示范区进行优先勘探。中石油获准承担的“中低丰度天然气藏大面积成藏机理与有效开发的基础研究”和“非均质油气藏地球物理探测的基础研究”国家级别的973科技计划项目,应尽可能将川南地区志留系暗

色页岩气藏勘探列入其中。对于有关的新兴命题研究,也应纳入博士后工作站命题选向,扩大研究领域和范围,超前进行多种技术储备和新尝度,争创世界一流的研究成果,展示科研的中国特色。四川盆地内其它地区要在前期全面资源调查的基础上,从中筛选出较有利勘探区块,进行勘探可行性深入评价,中下侏罗系和二叠系大隆组是深入评价的重点。本着先易后难、先浅后深的原则进行前期勘探,要以发现促科研。川南老气区要实施立体勘探途径,降低勘探投入和风险。老井上试或下试,充分利用原有的地质资料重新再认识。对原有钻井气显示较好的井段,优先进行试气;已获得气产量较好的井,最好转入先期试采,以录取地质资料深化认识为目的,并探讨开采技术新途径。试采强度要科学确定,不宜追求过大的开采速度。对于试气中的气产量暂时较低的井,要进行增产措施攻关试验,不能盲目增加试验井数量。措施攻关试验要有可行性论证、施工方案和施工结果评价,立足不断获取明显增产效果。暗色页岩气藏勘探自主进行,可吸收国际上的专业人才参与,发挥其专业特长和专业技能。

2. 钻采工程技术探讨

暗色页岩气藏勘探属于世界范围内较边缘的专业学科领域,钻采工程技术探讨和攻关,重在于强化基础研究,地质与工程两大专业要全力配合,提高技术创新和技术集成再创新的针对性和实用性。要扩大技术探讨的思路,不能相互排斥。

钻井和完井要采用现有的先进技术。老井上试或下试是立体勘探中的有效途径。对于原有的直井和斜井,特别是地层孔隙流体高压异常状态下,可进行氮气超正压射孔,如果要用液垫,须防泥质膨胀。处理孔眼附近地层因钻井、固井和射孔所引起的堵塞。采用现有的有机和无机盐复合防膨技术,也是一条重要技术途径。水力喷射孔能有效降低措施泵注压力,利于压裂集中造缝,甚至于与相关措施联作一次性进行。高含钙质的暗色页岩地层,可用乙醇酸进行水力喷射孔作业,发挥应有的多种功能。裸眼割缝衬管完井技术有广泛的适用性,尤其是新钻的井眼易于采取这种完井方式,钻井显示很好的井尤其应采用此完井方式。为了稳定井壁,也可以在井壁与割缝衬管间充填掺纤维的陶粒。水平井是暗色页岩气藏勘探评价的重要手段,对于原来有较好气显示的老井,可进行套管开窗侧钻水平井作评价,也可降低增产措施的技术难度。其中有待于用裂缝诊断技术确定水平井段延伸的方位。用空气作循环介质在暗色页岩中钻进,稳定井壁在于增加注气压

力,新疆油田已成功地进行过超浅层水平井钻井作业,其原理可应用。

暗色页岩气藏增产措施要有明显的针对性,在压裂沟通地层更多天然裂缝的基础上,防止地层内泥质膨胀是技术关键环节。高能气体压裂,除非井壁附近地层内有天然裂缝存在,否则有限长度的人工微缝难以达到沟通的目的。压胀松动压裂是在最小压应力与最大压应力之比值小于或等于0.15~0.30的条件下才适用的,这是分级燃爆下产生的叠加波作用的结果。对于致密储集层更有效,可以用页岩进行室内评价实验。因适宜于深井作业,可与其它措施配合实施。更值得开展层内液相燃爆技术攻关,只要前期地层有较好的吸收能力,便可直接进作业;在裸眼水平井段仍可尝试,裸眼应是较小直径,可与加砂压裂配合进行。含钙质较多的暗色页岩地层,可用乙醇基压裂液制造人工裂缝,结合乙醇酸化一次性进行。施工作业的前缘可集中泵注液氮泡沫,利于减少液氮用量,便于作业后一次性尽快喷通地层,达到高效排液的目的。对于高含钙质的低压异常暗色页岩气藏,在地层吸收条件较好时,可直接采用乙醇泡沫酸化工艺技术。地层堵塞严重最好先进行酸浸作业,防止将大量无机堵塞物分散挤入地层内,在此基础上可进行加砂压裂作业。二氧化碳泡沫压裂液携砂作业是较佳的技术途径,拥有多方面的技术优势。乙醇基压裂液携砂作业仍有较好前景,这是针对甲醇基的有害弱点而取代的。前置胶束酸加砂压裂在国内取得成效,对于胶束酸的配制应有针对性。排水采气工艺技术可能会排上用场,尤其是利于被吸附的页岩气解吸。注采可配套进行,用注入井注入的二氧化碳,发挥增能驱页岩气的作用,置换被吸附的页岩气,将有害的气体封存在地层内,不能出现与开采井发生明显二氧化碳气窜。

四、结论

暗色页岩不仅是较好的盖层和烃源岩,还是一种特殊的储集岩,具有裂缝储层结构特征。页岩气是生物化学成因气、热成因气或两者的混合,具有吸附、溶解和游离状态不同程度存在。页岩气是自生自储的,有完整的成藏序列。暗色页岩对扩散天然气的抑制浓度封闭作用和替代浓度封闭作用是要转变的,确定出暗色页岩类型及目前所处的演化阶段,

便可依据演化模式预测暗色页岩对扩散相天然气封闭能力及演化,指导页岩气藏勘探。四川盆地内暗色页岩分布广泛,页岩气资源丰富,开发和利用价值很大。页岩气藏勘探是世界范围内新兴的边缘专业学科领域,勘探的原则在于将地质理论认识与四川盆地的具体地质状况结合起来,发挥有针对性的指导作用。钻井、开采工程技术在于提高自主创新和集成创新的针对性和实用性,强化基础研究,提高科研项目级别。钻采工程技术述评及提示,有助于扩大技术攻关的新思路。

参考文献

- [1] 邓虎. 硬脆性泥页岩水化稳定性研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 73-76.
- [2] 张金川. 中国非常规天然气勘探综述[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 53-56.
- [3] 谢晓永. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 100-102.
- [4] 张金川. 基于运移动力暂时平衡条件下的运移气[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 101-103.
- [5] 郎东升. 泥质岩盖层对扩散相天然气封闭性演化的作用[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 10-13.
- [6] 唐立章, 等. 四川盆地西部油气资源潜力[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 5-8.
- [7] 陈盛吉. 川中地区侏罗系油气源对比及烃源条件研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(2): 11-42.
- [8] 杜敏. 四川盆地侏罗系源岩分布及地化特征研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(2): 15-69.
- [9] 王一刚. 四川盆地开江—梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 32-36.
- [10] 赵喆. 天然气成藏过程的充注效率研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 68-71.
- [11] 钟水清. 我国 21 世纪非常规能源的战略研究[J]. 钻采工艺, 2005, 28(3): 93-95.
- [12] 钟水清. 天然气水合物勘探及结构 H 型水合物的特性研究[J]. 钻采工艺, 2004, 27(5).
- [13] 钟水清. 美国能源战略政策剖析[J]. 中国能源, 1993(4).
- [14] 钟水清, 张高信. 我国石油天然气开发现状及其发展方向[J]. 中国能源, 1993, (11).
- [15] 张金川. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.

(编辑:黄晓川)