

渝页 1 井地质背景及钻探效果*

张金川¹ 李玉喜² 聂海宽³ 龙鹏宇¹ 唐颖¹ 唐玄¹ 姜文利²

1. 中国地质大学(北京)教育部海相储层演化与油气富集机理重点实验室 2. 国土资源部油气资源战略研究中心
3. 中国石化股份有限公司石油勘探开发研究院

张金川等. 渝页 1 井地质背景及钻探效果. 天然气工业, 2010, 30(12): 114-118.

摘 要 我国南方海相页岩分布广、厚度大, 有机质丰度高、热演化程度高, 由于地质及地形条件复杂、含气性变化大, 页岩气资源潜力有待查明。位于重庆市彭水县境内的页岩气取心井——渝页 1 井揭示了高陡构造带上黑色页岩及其中的含气特点。该井钻揭下志留统龙马溪组黑色页岩层系地层厚度为 225.78 m(未穿)。实验分析结果表明: 该井龙马溪组黑色页岩具有有利的页岩气成藏条件及典型的浅层页岩气特点, 有机碳含量平均达到了 3.7%, 有机质成熟度(R_o)平均为 2.04%。黑色页岩中裂缝及微孔隙发育, 储集空间包括了黏土矿物粒间微孔隙、页理间孔隙、溶蚀孔隙、成岩微裂缝及构造裂缝等。实验计算龙马溪组黑色页岩含气量介于 1.0~3.0 m³/t。研究表明, 渝页 1 井所揭示的下志留统龙马溪组和上奥陶统五峰组暗色页岩分布广泛, 页岩气资源潜力大。

关键词 渝东南高陡构造区 页岩气 渝页 1 井 地质背景 钻探效果 含气性 资源潜力

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.12.028

由于吸附作用机理的存在以及页岩超低渗透的特点, 页岩气具有较之常规储层气更强的抗构造破坏能力。这一特点使原来仅限于传统盆地内的油气勘探范围扩大到了残留的黑色页岩浅埋区, 极大地增加了油气勘探范围和领域, 页岩气富集区有可能是南方油气勘探的重要领域^[1]。南方海相页岩沉积厚度及分布面积大、有机质含量及成熟度高, 但形成时间长、地质演化历史复杂, 现今的含气性变化大, 页岩气资源潜力有待查明^[2]。位于渝东南高陡构造区的渝页 1 井揭示了下志留统龙马溪组的黑色页岩及其含气性, 为扬子板块重点目标区页岩气评价提供了参数依据。

1 区域地质背景

在早古生代和晚古生代时期, 扬子板块经历了多次大规模海侵事件, 形成了以下寒武统、上奥陶统一下志留统、下二叠统、上二叠统等为代表的 8 套黑色页岩(文玲等^[3]; 马力等, 2004)。其中, 下志留统龙马溪组

黑色页岩与上奥陶统五峰组黑色页岩均为笔石相, 具相似的生态环境^[4], 是扬子板块, 特别是四川盆地及其周缘地区重要的烃源岩^[5]。该套页岩有机质丰度大, 演化成熟度高, 是页岩气富集的有利层系^[6]。

位于七曜山基底断裂带(四川盆地东界)以东的渝东南地区是上扬子板块的重要组成部分(图 1), 具有地层抬升较高、构造挤压强烈、高陡构造发育等特点。区内背、向斜构造平行排列, 褶皱轴部走向大致呈北东—南西向延伸(30°~45°), 两翼倾角陡倾且基本对称, 伴生其中的核部断裂倾角较大, 一般为 35°~75°。从北西向南东方向, 渝东南区域构造格局在不足 200 km 的范围内从隔档式褶皱逐渐转变为隔槽式褶皱, 表明了中古生界海相黑色页岩分布的复杂特征^[5-8], 是扬子板块剥蚀区的典型代表。

在渝东南地区, 区域地层均为沉积岩且以古生界海相沉积产物为主, 出露地层主要有寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系及二叠系等, 其他层系较薄或缺失。其

基金项目: 国家专项《全国油气资源战略选区调查与评价》“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”(编号: 2009GYXQ-15)及国家自然科学基金“页岩气聚集机理与成藏条件”(编号: 40672087)。

作者简介: 张金川, 1964 年生, 教授、博士生导师, 本刊第六届编委会委员; 长期从事非常规天然气地质研究工作。地址: (100083)北京市学院路中国地质大学(北京)能源学院。电话: (010)82322735。E-mail: zhangjc@cugb.edu.cn

* 参加研究工作的还有: 张培先、汪宗余、姜生玲、朱华、张琴、边瑞康、荆铁亚、尹腾宇、刘珠江、宋晓微、林拓、王广源等。

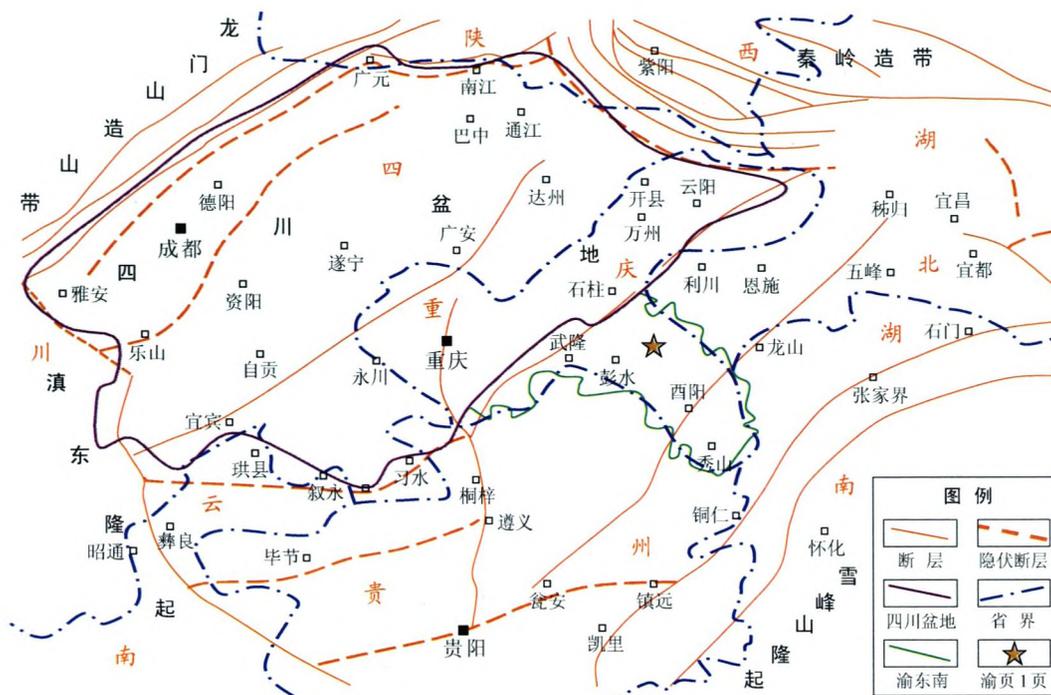


图 1 四川盆地及其周缘构造纲要及渝页 1 井位置图

上可有不同程度的三叠系及第四系等地层覆盖。区内出露的志留系在平面上主要分布于渝东南地区的西北部,在剖面上对应为罗惹坪组(S_2lr)及龙马溪组(S_1lm)。其中的龙马溪组黑色页岩位于志留系底部,属于深水陆棚沉积。龙马溪组又可分为上、下两段。其中,上段厚度介于 200~300 m,主要为一套灰绿色、黄绿色粉砂岩、粉砂质页岩或页岩,可为泥质或钙质胶结,通常具层纹状结构或发育波痕,多产笔石。下段厚度介于 250~350 m 并以页岩为主,局部可夹泥质或钙质胶结的粉砂岩、粉砂质页岩、泥质灰岩及石英岩状粉砂岩等,上部主要表现为黄绿色调,偶见泥质胶结的粉砂岩,下部主要为黑色、灰黑色调,局部含铁质重晶石结核;该段产出多种笔石化石,向下与产出腕足类化石、厚度较薄的上奥陶统观音桥组黑色页岩呈整合接触关系。继续向下,还连续发育了厚度接近 20 m 的上奥陶统五峰组黑色页岩。

2 渝页 1 井钻探实施

渝页 1 井位于七曜山东部,该处沿北北东走向的群山连绵起伏,形成了与地质构造特点大体一致的地理景观。由于构造断裂、剥蚀风化及径流冲刷等地质作用,背斜核部常表现为沟、槽、谷等地形特征,与向斜核部在地表上的峰、岭、脊等地形特征形成明显对比。由于北东—南西和北西—南东方向的两组断裂在该地区同时发育,故地质、地貌特征变化复杂。渝页 1 井位

于重庆市彭水县连湖镇北西西 290°方位 2~3 km 的曹家沟,属连湖镇乐地坝村所辖。区内地形为北西高南东低,沟壑纵横,相对高差 1 000 m 左右,其中渝页 1 井位于山间河流切割冲刷所形成的“V”字形沟槽中(图 2)。



图 2 重庆市彭水县连湖镇渝页 1 井井场位置(红色圆圈处)

渝页 1 井在构造上位于锅厂坝背斜的核部,具有地层厚度大、埋藏深度小、垂直裂缝发育等特点。该背斜的核部主要出露了中、下志留统,平面上表现为线状展布特点。其两翼地层在剖面上表现为不对称特点且北西陡南东缓,北西翼地层倾角 36°~58°,南东翼 22°~45°。背斜的轴面近于直立,翼部及核部均可见复杂

揉皱。

根据周边露头(重庆市彭水县高谷镇、石柱县新乐乡、南川区金佛山北坡、黔江区白石乡和彭水县白溪乡等)资料推测,渝页 1 井处龙马溪组黑色页岩厚度不应小于 80 m。具有黑色页岩地层分布广、单层厚度大、埋藏深度浅(背斜核部出露龙马溪组上段地层,根据周边露头预测钻深百米可见黑色页岩)、地层垂向裂缝发育(北东和北西向两组断裂交叉处)、地形相对有利等优点。特别是,页岩主体目的层(下志留统龙马溪组、上奥陶统观音桥组、五峰组及临湘组夹层等)下伏的中上奥陶统(上奥陶统临湘组、中奥陶统宝塔组、十铺字组)发育了数十米厚的裂纹灰岩及瘤状泥质灰岩,地表露头中的溶蚀孔洞发育,很有可能是游离气聚集的有利目标。因此,主要基于目的层埋藏深度等因素考虑,位于锅厂坝背斜核部的曹家沟是最有利的钻探目标。

根据 200 m 井深的总体要求,渝页 1 井井位选择在锅厂坝背斜核部的曹家沟,井口海拔为 602 m。该井地质设计为垂直取心井,设计钻揭目的层系为龙马溪组及上奥陶统黑色页岩,完钻层位为宝塔组石灰岩。渝页 1 井开始钻探于 2009 年 11 月 22 日,经过 50 d 的工程施工,于 2010 年 1 月 11 日在 325.48 m 井深处裸眼完钻。在采用 XY-4 型钻机钻进时,先后选用了合金钻头、电镀金刚石钻头、孕镶金刚石钻头及复合片钻头等,全井段岩心平均收获率达 88.3%,获取了龙马溪组主体黑色页岩段的连续岩心,累计揭示龙马溪组黑色页岩岩系 225.78 m(未穿)。

由于该区缺乏钻探(包括金属矿钻井)、地震及地球化学等资料,实际的钻探效果与地质设计存在一定偏差。根据野外露头地质研究,渝页 1 井井区周边少有巨大厚度的黑色页岩露头。在其北西 20 km 和南西 30 km 以外的漆辽与高谷剖面,下志留统龙马溪组黑色页岩段地层出露最大厚度一般不超过 140 m。钻井实际揭示龙马溪组黑色页岩厚度至少 225.78 m 仍未见底,表明黑色页岩地层厚度的较大变化。这种变化可能由多种原因所产生,包括原始地层向沉降—沉积中心处的厚度增加、逆断层所造成的地层重复、顶厚褶皱及尖顶背斜构造核部地层的滑脱及地层局部加厚等。这些综合地质作用的结果造成了实际钻揭的黑色页岩岩系厚度远远超过了根据露头预测的地层厚度。通过钻井实施,不仅揭示了巨大厚度的黑色页岩地层,而且还在钻井过程中发现了良好的页岩气显示。

3 渝页 1 井页岩含气性

室内实验研究的结果表明,龙马溪组黑色页岩中所含的有机质类型主要为腐泥型和偏腐殖混合型,有机质成熟度(R_o)介于 1.62%~2.26%之间,平均为 2.04%,有利于天然气的生成(现今主要为残留热解气及生物再作用气)。结合页岩含气量检测结果,对渝页 1 井部分岩心进行了有机碳含量测试。燃烧法测定结果表明,深度 128.9~305 m 之间 10 个样品的有机碳含量值变化于 1.44%~7.28%,一般达到 3.0%左右,平均为 3.7%(图 3)。由于有机质是天然气生成与吸附的主体,故有机碳含量的大小几乎决定了页岩中的天然气含量,即有机碳含量与页岩气含量呈正比。



图 3 渝页 1 井黑色页岩有机碳含量随深度变化图

渝页 1 井龙马溪组黑色页岩宏观及微观裂缝发育,宏观裂缝可分为高角度、近水平及杂乱状 3 类,可表现为充填、半充填或无充填。一般裂缝多呈高角度延伸,岩心中可见的单一裂缝长度为 1.6 m。观察结果表明,各类裂缝多表现为不均一的集中分布特点,充填与不充填裂缝常有继承性发育特点。岩心样品电镜扫描特征显示,黑色页岩微孔隙和裂缝发育,孔隙直径一般为 1~5 μm ,少数介于 1~8 μm ,微裂缝规模在 10~25 μm (图 4)。泥页岩储层储集空间包括了黏土矿物粒间微孔隙(图中 b 和 d)、页理间孔隙(图中 b)、溶蚀孔隙(图中 c 和 d)、成岩微裂缝(图中 f)及构造裂缝(图中 a 和 e)等。

渝页 1 井提捞的黑色岩心均为不含地层水的“干层”,即不含地层水(包括束缚水)的含气层,若将随机选取的岩心置于水中,则均将发生针尖状气泡不断溢出现象,视为页岩气的最直接证据;此外,在钻进过程中,还多次在井筒中发现了气泡溢出以及井口空气中甲烷含量异常等现象,证实了页岩中天然气的直接

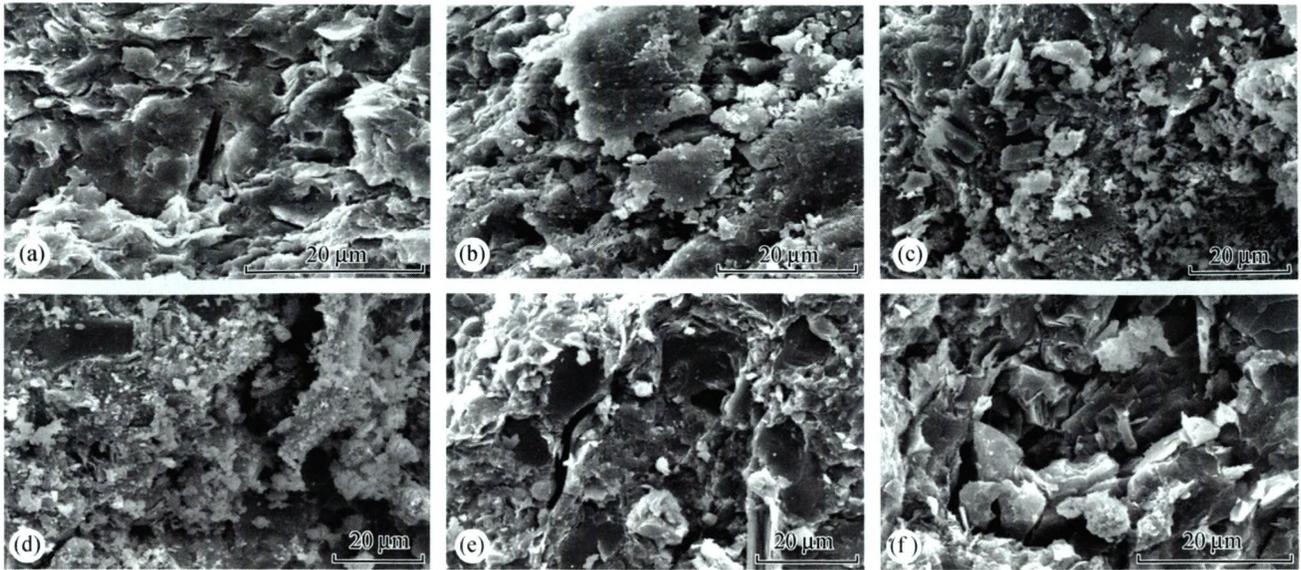


图 4 渝页 1 井不同深度岩心电镜照片所显示的孔隙和裂缝特征

注:照片 a、b 来自于井深 125.3 m 样品;照片 c、d 来自于井深 235.2 m 样品;照片 e、f 来自于井深 324.9 m 样品

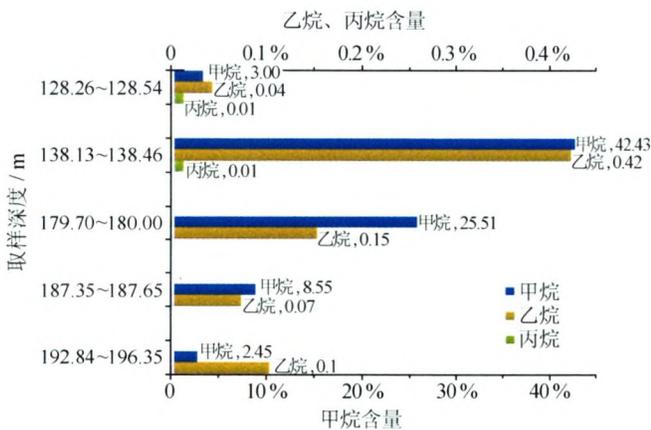


图 5 渝页 1 井解吸气烃类型及含量变化图

存在。同时,渝页 1 井的 16 块样品现场解析表明,位于 281.0 m 和 287.5 m 井深处样品的含气量现场解析值最高,计算现场解析气量达到并超过 $0.1 \text{ m}^3/\text{t}$ (解析持续时间为 6 h)。考虑到井筒提心时间较长(4.2 h)、损失气量及残留气量较多等原因,再结合已有解析曲线的比较研究,推测页岩吸附含气量大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 。结合页岩总含气量分析原理,初步计算页岩总含气量(吸附气+游离气)介于 $1.0\sim 3.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,视为具有工业价值的页岩气。进一步的色谱分析结果表明,天然气样品中同时含有甲烷和乙烷,在 128.23~138.46 m 和 206.75~209.18 m 井深等样品中还发现了丙烷的存在(图 5)。其中,138.13~138.46 m 井深样品中的甲烷、乙烷和丙烷含量分别为 42.43%、0.42%、0.01%,其余为 N_2 、 CO_2 和 O_2 等大

气成分。解吸样品中烃类气体含量的百分比并不高,可能主要反映为解析仪中空气样品的残留或地下风化带中少量空气成分的进入。

4 讨论

1)通过全井段系统取心,渝页 1 井系统揭示了上扬子典型地区下志留统龙马溪组中上部的黑色页岩地质特征,揭穿黑色页岩视厚度 225.78 m(未见底),实际揭穿的黑色页岩地层厚度远远大于根据周边露头观察所预测的厚度,反映出复杂的地质条件变化。黑色页岩层段下伏的石灰岩背斜区也是天然气勘探下一步值得深究的重要领域。

2)在背斜轴部进行钻探只是页岩气探井井位选择的一种模式。渝页 1 井选择在锅厂坝背斜核部进行钻探:①保证了龙马溪组的最小埋藏深度和最大揭示厚度;②保证了揭示最小的地层视厚度和最佳的裂缝发育程度;③能够合理客观地反映地层的含气量并揭示黑色页岩下伏石灰岩地层中可能的圈闭游离气。由于钻井没有揭穿龙马溪组底部地层,给进一步系统地页岩气研究带来了一定的推测性。

3)渝页 1 井揭示了良好的页岩气成藏地质条件,揭示裂缝发育具有继承性特点,储层微孔及微裂缝发育,页岩含气量对应于 $1.0\sim 3.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,反映为吸附特征明显的典型浅埋型页岩气特点。如果能够进一步结合地震等方法 and 手段,则黑色页岩深埋区、地质条件复杂区及第四系覆盖区的页岩气有利选区及评价工作将更加合理可靠,测井方法和手段的使用也将进一

步扩大资料的获取范围。

4) 渝页 1 井揭示黑色页岩地层厚度大, 有机质含量高, 有机质成熟度条件适中, 页岩气显示活跃, 钻探效果良好。但渝页 1 井仍有许多地质问题值得进一步探讨, 不断地研究将会逐渐加深对研究区页岩气成藏地质条件的理解和认识。截至目前的实验分析资料已经表明, 渝东南地区地质条件复杂的高陡构造带具有良好的页岩气成藏地质条件, 表明上扬子乃至整个扬子地区都可能是页岩气发育的有利潜力区。

参 考 文 献

[1] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.

[2] 张金川, 唐玄, 姜生玲, 等. 碎屑岩盆地天然气成藏及分布序列[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 11-17.

[3] 文玲, 胡书毅, 田海芹. 扬子地区寒武系烃源岩研究[J]. 西北地质, 2001, 34(2): 67-74.

[4] 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[5] 沃玉进, 周雁, 肖开华. 中国南方海相层系埋藏史类型与生烃演化模式[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(3): 94-100.

[6] 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): 1-6.

[7] 沃玉进, 汪新伟. 中、上扬子地区地质结构类型与海相层系油气保存意义[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 177-187.

[8] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 115-118.

(收稿日期 2010-12-14 编辑 居维清)

《天然气工业》已发表的页岩气相关文章

以下是截至 2010 年底,《天然气工业》已发表的页岩气主要相关文章题录,可在本刊主页“电子期刊”中阅读全文。

1. 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布. 2004, 24(7): 15-18.

2. 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域. 2007, 27(11): 1-6.

3. 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件. 2008, 28(2): 151-156.

4. 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力. 2008, 28(6): 136-140.

5. 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点. 2009, 29(12): 109-114.

6. 张金川, 李玉喜, 聂海宽, 等. 渝页 1 井地质背景及钻探效果. 2010, 30(12): 114-118.

7. 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性. 2008, 28(12): 26-29.

8. 张林晔, 李政, 朱日房. 页岩气的形成与开发. 2009, 29(1): 124-128.

9. 翟光明. 关于非常规油气资源勘探开发的几点思考. 2008, 28(12): 1-3.

10. 胡文瑞. 开发非常规天然气是利用低碳资源的现实最佳选择. 2010, 30(9): 1-8.

11. 董晓光. 大力提高天然气在能源构成中比例的意义和可能性. 2010, 30(10): 1-6.

12. 闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源. 2009, 29(5): 1-6.

13. 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区. 2009, 29(12): 115-118.

14. 雷群, 王红岩, 赵群, 等. 国内外非常规油气资源勘探开发现状及建议. 2008, 28(12): 7-10.

15. 叶军, 曾华盛. 川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力. 2008, 28(12): 18-25.

16. 李桂范, 赵鹏大. 地质异常找矿理论在页岩气勘探中的应用. 2009, 29(12): 119-124.

17. 宁宁, 王红岩, 雍洪, 等. 中国非常规天然气资源基础与开发技术. 2009, 29(9): 9-12.

18. 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. 2009, 29(5): 17-21.

19. 李其荣, 杜本强, 隆辉, 等. 蜀南地区天然气地质特征及勘探方向. 2009, 29(10): 21-23.

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. 2009, 29(5): 40-44.

21. 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. 2009, 29(5): 33-39.

22. 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键. 2009, 29(5): 7-10.

23. 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析. 2009, 29(5): 22-26.

24. 李建忠, 董大忠, 陈更生, 等. 中国页岩气资源前景与战略地位. 2009, 29(5): 11-16.

25. 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件. 2009, 29(5): 27-32.

26. 龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力. 2009, 29(12): 125-129.

27. 王兰生, 邹春艳, 郑平, 等. 四川盆地下古生界存在页岩气的地球化学依据. 2009, 29(5): 59-62.

28. 王社教, 王兰生, 黄金亮, 等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件. 2009, 29(5): 45-50.

29. 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景. 2009, 29(5): 51-58.

30. 朱华, 姜文利, 边瑞康, 等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西拗陷为例. 2009, 29(12): 130-134.

31. 帅燕华, 张水昌, 苏爱国, 等. 生物成因天然气勘探前景初步分析. 2006, 26(8): 1-4.

32. 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价. 2010, 30(10): 7-12.

33. 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析. 2010, 30(10): 26-29.

34. 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议. 2010, 30(10): 30-32.

35. 唐颖, 张金川, 张琴, 等. 页岩气井水力压裂技术及其应用分析. 2010, 30(10): 33-38.

36. 郭宏, 李凌, 杨震, 等. 有效开发中国页岩气. 2010, 30(12): 110-113.