

# 贵州寒武系牛蹄塘组页岩气开采过程环境影响浅析

张云鹤

(贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室,贵州 贵阳 550025)

**摘要:**贵州省寒武系牛蹄塘组特有的黑色页岩,具有高有机碳、高成熟度、高脆性矿物含量、微孔隙较为发育等特点,是贵州页岩气勘探开发的主要层位。牛蹄塘组页岩沉积环境有利,沉积厚度大,有望获得较好的含气量,为贵州开采页岩气提供了有利条件。然而页岩气开采过程中水力压裂法的应用导致的泄漏、压裂液回流污染、集输管道破裂或腐蚀等,会导致地下水储层破坏及地下水重金属污染等环境问题。着重阐述页岩气勘探开发中水力压裂法可能产生的相关环境影响问题并开展预期研究,为贵州页岩气勘探和开发提出考虑环境破坏的可能,提出防治措施。

**关键词:**水力压裂法;页岩气开采;环境污染;贵州

中图分类号:X503

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)05-0059-06

## ANALYSES OF ENVIRONMENTAL IMPACT ABOUT THE EXTRACTION PROCESS OF SHALE GAS IN EARLY CAMBRIAN NIUTITANG FORMATION IN GUIZHOU PROVINCE

ZHANG Yun-he

(Key Laboratory of Karst Environment and Geological Disaster Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The characteristic black shale in Early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, with the characteristics of high organic carbon, high maturity, high content of brittle mineral, micro porosity is relatively developed, is the main layer of shale gas exploration and development in Guizhou Niutitang Formation shale sedimentary environment of favorable sedimentary thickness, is expected to get better gas content, provide favorable conditions for shale gas in Guizhou. However, the application of hydroelectric power generating equipment for shale gas exploitation, which cause the leakage, fracturing fluid back-flow pollution, gathering pipeline rupture or corrosion, will cause the groundwater reservoir damage and heavy metals ingroundwater pollution and other environmental issues. Therefore, this article focuses on the exploration and development of shale gas in hydraulic fracturing and the likely impact of the problem the expected research to carry out the relevant environment, for the exploration and development of shale gas in Guizhou is proposed considering the

environmental destruction may, puts forward the prevention and cure measures.

**Key words:** Hydraulic fracturing; Shale gas exploitation; Environment pollution; Guizhou

在中国,页岩气这颗能源新星正在迅速升起,这种既能替代石油又能替代煤炭的一种能源,具有资源潜力大、生产周期长和开采寿命长等优点,已得到越来越多的认可(国家能源局,2012)。十九世纪二十年代,美国开凿出了世界上第一口页岩气井,在经过了一百多年的今天,页岩气的使用在全球持续升温,德国、加拿大、澳大利亚、印度等十多个国家都启动了页岩气的勘探与开采工作。我国页岩气勘探开采目前还处于起步探索阶段,2004年,在国土资源部油气资源战略研究中心等单位的推动下,对页岩气资源开始了研究工作,有不少学者或机构对中国页岩气资源潜力做过预测,总体评价偏乐观(胡文瑞等,2008)。贵州页岩气资源前景研究始于2004年,2009年开展资源远景调查,2011年国土资源部油气资源战略研究中心在岑巩优选了岑1页岩气参数井,气显良好。2012年贵州省国土资源厅组织国土资源部油气资源战略研究中心等9家单位对全省页岩气资源开展了调查评价(唐颖等,2011)。贵州页岩气勘探已经进入大规模勘探阶段,从目前初步勘探情况分析,贵州页岩气资源量可观,很有可能成为南方主要的页岩气生产基地。

但是,页岩气勘探开发中采用的水力压裂技术,其对页岩层上下隔水层、储水层、地下水等影响很大。根据美国环保署的统计,单口页岩气水平井耗水量一般在7 600~19 000 m<sup>3</sup>,压裂作业完成后有15%~80%返排液排至地面(武音茜等,2012)。压裂返排液由于曾与地层接触,往往有含量较高的金属离子、氯根和有机质等污染物,若处置不当,则存在环境污染风险,同时,水力压裂法开采页岩气破坏隔水层和储层结构。因此,本文以贵州寒武系牛蹄塘组页岩气开采过程中采用水力压裂法可能对环境产生的影响进行前期研究,为贵州寒武系页岩气开采做好环境保护研究。

## 1 贵州寒武系牛蹄塘组页岩气层段简介

贵州位于扬子地台西南端,沉积岩发育,震旦系至白垩系沉积的硅酸盐岩和碳酸盐岩,分布面积14万km<sup>2</sup>,占全省总面积的79.5%。其中与页岩气有关的层位有二叠系、石炭系、泥盆系、志留

系、寒武系、震旦系等,其中海相沉积的下古生界寒武系下统牛蹄塘组、志留系下统龙马溪组是页岩气的主要赋存层位。而牛蹄塘组是贵州重要的页岩气勘探层段。

贵州寒武系牛蹄塘组主要属寒武系下统,西部相区牛蹄塘组底部为黑色碳质泥岩与硅质岩韵律互层,东部相区岩性为黑色碳质泥岩。牛蹄塘组是受上升洋流影响沉积的一套潜质页岩层,总体为开阔陆棚沉积环境,以陆棚相黑色碎屑岩系为主,具有高有机碳、高成熟度、高脆性矿物含量、微孔隙较为发育等特点。孔隙类型主要为矿物颗粒间(晶间)微孔缝、矿物颗粒溶蚀微孔隙、有机质生烃形成的微孔隙等。黔北、黔东一带的牛蹄塘组页岩沉积环境有利,沉积厚度大,其中碎屑矿物含量28%~87%,平均63.1%,成分主要为石英和长石;页岩中有机碳总量 $\omega(\text{TOC}) \geq 2\%$ ,成熟度R<sub>0</sub>介于1.1%~3%,页岩孔隙度分布范围1.3%~25.6%,平均8.24%;渗透率 $2.2 \times 10^{-3} \sim 17.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均 $8.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (RAHM D,2011)相关指标显示资源潜力大,有望获得较好的含气量。

## 2 页岩气开采办法--水力压裂法

页岩气是保留在生油岩层中的天然气,是“非常规天然气”的一种。页岩气被束缚在致密的、几乎没有孔隙和裂缝的页岩(烃源岩)里,必须通过大规模地层压裂,人工制造大量的长裂缝,并能把裂缝支撑住,形成气体的通道,让气体保持压力并源源不断地流入井筒,进入采集系统,最后进入集输管道,方能够被充分运用。

页岩具有低渗透性,要使气体渗出进入气井,必须先对岩层进行压裂处理。水力压裂技术是页岩气开发的核心技术之一,广泛用于页岩储层改造。水力压裂法又称为液压破裂法,是指向地下岩层泵入高压液体致使岩层产生裂缝,达到油气增产,这些高压液体常常是掺有沙石和少量化学物质的高压水。如图1所示为采用水力压裂法开采页岩气的步骤措施。

页岩气生产是一个高度密集型用水的过程,单个井的钻孔和压裂作业通常需要约500万加仑的水,取决于具体的盆地结构和地质构造。页岩中

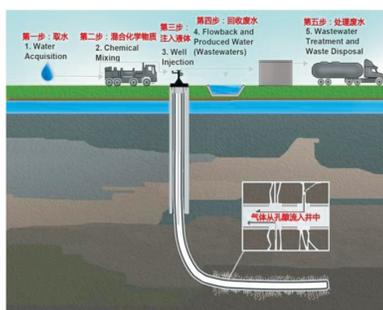


图1 水力压裂法开采页岩气

含有多种酸溶性矿物,它们均匀地分布在页岩的基质、层理及原生裂缝中。当这些酸溶性矿物遇到可反应流体时,就会溶解并被清除,从而有助于增加压裂所产生裂缝的表面积,提高吸附态页岩气的解吸速度并增强页岩气在裂缝网络中的扩散作用。当地面高压泵组将高粘液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井中,在井底附近憋起超过井壁附近的应力及岩石抗张强度的压力后,即在地层中形成裂缝。为使压力足够大,需要在注入液体时添加适量混合化学物质以达到效果。页岩气井中水力压裂常用的压裂液类型有:减阻水压裂液、纤维压裂液和清洁压裂液。以减阻水压裂液为例,减阻水压裂液是一种水基压裂液,集成了凝胶压裂和清水压裂的优点,其组成以水和砂为主,含量占总量的99%以上,其它添加剂成分(如酸、减阻剂、表面活性剂等)总量只占压裂液总量的不足1%(唐颖等,2011)。在页岩压裂液中添加一种可与页岩中酸溶性矿物发生反应的化学成分,是目前页岩压裂中的一种较新的理念。

在压裂工作完成后,大多数压裂液所用水量最初作为回流水流至地表,成为生成水。随着返排时间的延长,累积返排液量不断增加,返排液中总溶解固体、氯根、一些金属离子(Ca, Mg, Ba, Sr, As, Cd, Fe, Pb, Zn等)的含量也不断增高;尤其是在产出水阶段,由于与地层接触时间长,返排液中总溶解固体含量往往超过 $10 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,同时也含有相对较高量的金属离子和有机物等。回流水中含有大量物质成分,这将与压裂液成分和页岩地层密切相关。除盐、金属、地层中的有机化合物,如导致垢化和硬度的化学品(如钙、镁、硫酸盐和钡),以及天然放射性物质(U, Th, Ra)等物质外,还包括来自钻井液的添加剂(例如,生物灭杀剂、结垢抑制剂、降阻剂)。天然放射性物质由钻屑带到地表,并溶解在生成水、水垢或淤泥中。因此,合

理配置压裂液,选择添加剂成分及比重对页岩储层压裂至关重要,使用恰当性能的压裂液是提高页岩气井压裂经济效益的重要措施。

### 3 水力压裂可能引起的环境问题

#### 3.1 水力压裂需要消耗大量的水资源

页岩气开发需要大量用水,其中水力压裂工艺耗水量巨大。水力压裂过程中使用的水主要来自地表水(湖泊和河流)、地下水(井,含水层)、市政供水,以及之前压裂过程产生的废水。使用的水要注入比地下含水层深得多的页岩层,大量的水主要被岩石吸收,而不能再回收利用。贵州作为西部省区,由于其独特的喀斯特自然地理环境和历史人文环境,水资源问题更具有其特殊性。受地形地貌条件限制,山高水低开发难度大是贵州水资源利用率低的根本原因。在此情况下贵州大规模页岩气开采对水资源的消耗很可能给当地的生态环境和人民生活带来严峻的考验。

#### 3.2 水力压裂可能污染地下水

水污染是页岩气生产的另一负面因素,有关石油公司将水力压裂中使用的压裂液中的化学添加剂看成是商业机密,也正是这些添加剂中的化学物质可能造成地下水污染。每口井压裂后,在其生命周期中会有一些比例的压裂液回流现象,这种水已经受到严重污染,如果不能得到正确控制和有效处理,在向地表回流时,就会造成地下水污染的风险。美国麻省理工学院2011年天然气报告回顾了有关天然气钻探事件公开报道的三项研究,发现在此期间,在所有地下水污染事件中,48%与天然气或钻井液有关(图2)。

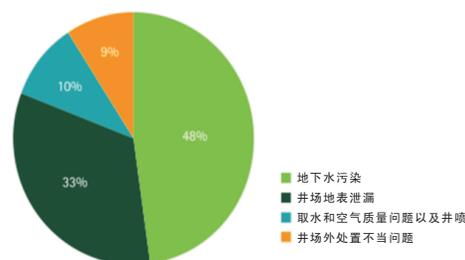


图2 有关天然气钻井水体污染事件

这些有毒污水先储存在现场,然后再转移到污水处理厂或者再回收利用,过程中可能渗入地下或随雨季到来再外溢,进而污染地下水。在理论上,页岩气开采到地下深处的水压致裂溶液中含

有的表面活性剂、防腐剂、盐酸类(2%~5%浓度)、阻垢剂、杀菌剂、支撑剂(微砂)和挖掘时产生的天然辐射物质(镭、铀、锶)等化学物质应该影响不到地面。然而,贵州水资源的补给来源主要为大气降水,赋存在地表水、地下水和土壤水中。贵州地下还存在着大量的断层和裂缝,致裂溶液很可能透过这些裂缝污染地下水。

### 3.3 水力压裂过程中重金属或放射性物质污染

全球知名咨询公司埃森哲此前发布报告称,一般钻井和压裂所需水量为1 892.7万升,相当于1 000辆卡车的运水量。除了耗水量巨大,页岩气开采所产生的废水包含碳氢化合物、重金属、盐分等百余种化学物质,若灌注工艺未达要求或灌注层选择不当,都将造成地下水污染。

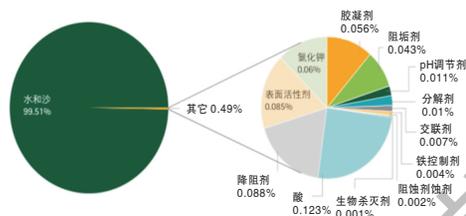


图3 压裂液成分组成

水力压裂完成后,大部分压裂液回流到地面,其中不仅有压裂液中那些化学物质,还有地壳中原本含有放射性物质和大量盐类。图3显示了页岩气压裂过程中的组成成分,99.51%是水和沙(支撑剂),其余的是化学品。这些化学物质旨在满足不同目的,从增加液体粘度以帮助支撑剂的运输(胶黏剂),到抑制细菌生长(生物杀灭剂)、水垢生成(阻垢剂)、液体粘度(表面活性剂),或液体和井之间的摩擦(降阻剂)等等(张金川等,2009)。而其中的重金属或放射性物质水力压裂过程中,可能直接通过断裂、裂缝系统自地下深处缓慢向上移动至地表或浅层,也可能因页岩气采集管道质量问题或操作不当而破裂和空洞,造成重金属或放射性物质泄漏。

除此之外,有些废料露天放置或直接填埋在气井周围,也有发生泄漏的危险。重金属在大气、水体、土壤中广泛分布,而底泥往往是重金属的储存库和最后的归宿。当环境变化时,底泥中的重金属形态将发生转化并释放造成污染,重金属不能被生物降解,但具有生物累积性,可以直接威胁高等生物包括人类,有关专家指出,重金属对土壤的污染具有不可逆性,已受污染土壤是没有治理

价值的。所以贵州在进行页岩气开发的同时,需要提前考虑如何防止开采过程中水力压裂法引发的重金属或放射性物质泄露所带来的环境危害。

### 3.4 页岩气开采对地表和植被的破坏

页岩气的开采是国家性工程,不可避免会进行场地基建等大面积土木现场准备,包括林木清理、挖掘、修建通道和安装井垫,以及准备钻探活动场地等工作。页岩气井水压裂液储蓄池的挖掘,压裂设备的布置等使得土地占用面积远大于常规油气藏的钻井井场(Arthur J D et al,2010)。尤其在贵州省存在大量原生态区,大规模兴建将造成野生植被的破坏,影响野生动物的栖息环境,甚至导致局部水土流失和泥石流滑坡等地质灾害,打破生态平衡;若在农垦区占用大量的耕地资源,则会加剧土地矛盾,同时也造成不可挽回的地表和植被破坏。

### 3.5 页岩气开采过程中甲烷泄露的污染

页岩气以甲烷为主要成分,与常规天然气开发一样,在开发运输及存储过程中也存在大量甲烷泄露的问题。页岩气从开发到消费的全生命周期内,泄漏到大气中的甲烷量为3.6%~7.9%,而常规气仅为1.7%~6%(Howarth et al,2011)。在整个页岩气井开采的过程中,采气管道需要穿过含水层才能到达更深的页岩层,如果管壁因操作不当或者质量问题而空洞破裂,气井内壁的混凝土因老化或者没有铺好而剥落,甲烷都有可能泄露到含水层中(闫存章等,2009)。研究者相关报告称饮用水受甲烷污染的现象与用水力压裂法开采页岩气密切相关(Zelenev et al,2010)。水力压裂过程中打开的新裂缝连接了天然存在的裂缝,可能提供甲烷向上渗入地下水层的通道,甲烷也可能溶解在废水中由压裂液回流而释放到大气中。开采页岩气中甲烷排放量比常规天然气开发过程至少多30%,尽管甲烷在大气中的停留时间约为CO<sub>2</sub>的1/10,其温室效应却是CO<sub>2</sub>的数十倍(Howarth et al,2011)。因此,从温室气体减排角度出发,贵州省页岩气勘探开采过程中甲烷泄漏问题不可忽视。

## 4 寒武系牛蹄塘组页岩气开采对地下水层的影响

### 4.1 对地下水隔水层、水储层的破坏

页岩气储层具有低空-超低渗、高含水饱和度、高毛管压力等特点,导致其在钻井、完井、改造及测试过程中极易受到伤害。寒武系牛蹄塘组上、中部主要为黑色碳质页岩夹灰绿色砂质页岩和钙质页岩,下部主要为黑色碳质页岩,整合于灯影组之上、明心寺组之下,层序特征明显。牛蹄塘组的黑色页岩主要成分为黏土矿物,其类型主要是伊利石;碎屑矿物主要为石英,多为粉砂级,呈次棱角-棱角状,分选较好。黑色页岩为显微晶质结构,黏土矿物长轴定向-半定向展布,呈不均匀分布,岩石常显微细纹理层(袁宏等,2007)。页岩多呈水平纹理,颗粒间压实紧密,孔渗性差,二氧化硅含量高,脆性好,易于页岩气开发中的压裂。而页岩作为隔水层,在采气过程中为防止含水层中地下水突入气井,必须保持隔水层的完整,但也可能由于压力过大而将隔水层压裂。

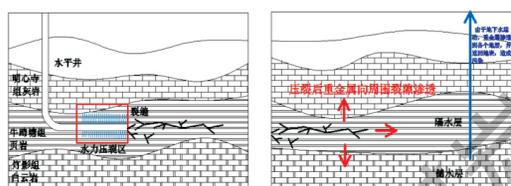


图4 对地下水隔水层、储水层的破坏机理

黔北地区灯影组顶部的优质岩溶层, 储集空间主要有溶蚀孔洞、粒间溶孔、粒内溶孔等(刘家洪等,2012)。储层所含的硅质矿物、碳酸盐岩矿物、黏土矿物不同, 导致储层岩石的脆性程度不同; 储层的脆性越强, 压裂时越易引发脆性断裂形成网状裂缝。这些溶孔和裂缝同时为地表水和地下水径流提供有效通道, 当寒武系牛蹄塘组页岩地层被压裂, 压裂液中所含的化学离子可能会沿着溶孔或地裂缝渗透, 不仅侵蚀岩层也会造成地下水污染, 从而导致储水层破坏。

由于灯影组白云岩是贵州重要的储水层, 而牛蹄塘组的黑色页岩是主要的隔水层, 在页岩气开采中压裂, 往往把隔水层隔水性破坏, 灯影组中储集地下水平衡性破坏。而且牛蹄塘组黑色页岩中富集大量的重金属元素 As、Cd、Pb、Zn、U、Th、Mo、Ni、V 等, 以及大量的 S、F 等有害元素, 通过压裂后, 黑色页岩中大量的上述元素会进入到灯影组储水层, 污染地下水环境。

## 5 加强寒武系牛蹄塘组页岩气开采环境保护措施

水资源的利用和管理, 水资源的高效利用, 回收再利用, 压裂井水的排放以及处理都是页岩气生产环境的关键影响。除了生产用水的性质, 废水量不断增加也在持续推动提高水处理技术效率的要求, 以改进水的再利用和循环, 因此需创新水资源的管理的解决方案, 由此实现页岩气生产中水资源利用的长期可持续性。

页岩气开采基本上是采用地下注射法, 注射的对象则是废弃的矿井, 但这种办法会引起其他环境问题。因此, 可以进行废水现场处理和再利用, 例如产生清洁盐水, 只要除去金属元素, 含盐废水可以排放或者进行再利用, 也可以通过蒸发或结晶的方式形成干燥副产物。

压裂对地下水隔水层、储水层的影响, 需要技术攻关。由于压裂过程中存在多种不确定状况, 如压力过大而产生的隔水层破裂, 压裂液体含大量的化学试剂, 容易将黑色页岩中大量的重金属元素、硫氟等元素萃取出来, 一旦压裂作用将隔水层(黑色页岩层)压穿, 含大量有害元素、化学试剂的水体会进入含水层-灯影组白云岩储水层, 引起地下水污染。因此, 需要对压裂技术攻关, 控制好压力, 避免压力液中所含的有害元素渗透到地下水中。

进行可靠全面的评估, 是做好页岩气开采工作的首要任务, 也是防治地质灾害发生的根本保障。建立完整的监管制度, 实施严格的监管措施, 制定预警和补救方案。我国政府应在借鉴其他国家成功经验的基础上, 结合国情创新出适合我国的政策法规, 使得资源的开发利用更具保障, 推动中国页岩气健康有序发展。

## 6 结论

贵州省寒武系牛蹄塘组页岩分布区域广, 沉积厚度大, 有机碳含量高, 是页岩气储藏较好层位, 具有大力开发的潜力。

水力压裂法是页岩气开发的主要方法, 但其采气过程中存在对环境污染的隐患, 包括对地下水环境、空气质量、生态平衡、交通运输等方面均有影响。

寒武系牛蹄塘组上覆于震旦系灯影组, 两者平行不整合接触且岩性相差较大。牛蹄塘组以黑色页岩为主, 形成隔水层; 灯影组以白云岩为主, 形成储水层。在水力压裂中极易被破坏并相互影

响。

加强对采气环境可能产生的问题的预防和保护是开采页岩气的首要问题，提高我省的监管能力和对完井后的地灾评估，对大力发展页岩气具有较大的帮助。

### 参考文献

[1] 国家能源局. 页岩气发展规划(2011-2015年)[Z]. 2012-03-16.

[2] 胡文瑞, 翟光明, 雷群, 等. 非常规油气勘探开发新领域与新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.

[3] 刘家洪, 杨平, 汪正江, 等. 黔北震旦系灯影组顶部风化壳特征及油气意义[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 931-938.

[4] 唐颖, 唐玄, 等. 页岩气开发水利压力技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 393-399.

[5] 武音茜, 金中国, 等. 贵州页岩气资源评价与开发思考[J]. 矿物学报, 2012, 32(4): 569-574.

[6] 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[J]. 天然气工业, 2009, 33(5): 67-71.

[7] 袁宏, 肖加飞, 何熙琦, 等. 黔北牛蹄塘组的地球化学特征及形成

环境[J]. 贵州地质, 2007, 24(1): 55-60.

[8] 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.

[9] 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): 109-114.

[10] Arthur J D, Coughlin B J, Bohm B K. Summary of Environmental Issues, Mitigation Strategies, and Regulatory Challenges Associated With Shale Gas Development in the United States and Applicability to Development and Operations in Canada[C]. SPE 138977, 2010.

[11] Howarth R W, Ingraffea A. Natural gas: should fracking stop [J]. Nature, 2011, 477(1): 271-275.

[12] Howarth R W, Santoro R, Ingraffea A. Methane and the Greenhouse Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations [J]. Climatic Change, 2011, 106(4): 679-690.

[13] RAHM D. Regulating the hydraulic fracturing in shale gas plays, The case of Texas [J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2974-2981.

[14] Zelenev A S, Zhou H, Linda B. Microemulsion Assisted Fluid Recovery and Improved Permeability to Gas in Shale Formations[C]. SPE 127922, 2010.

《能源环境保护》刊物  
 欢迎订阅、欢迎投稿  
 欢迎刊登各类广告