

美国页岩气开发环境风险控制措施及其启示

田磊 刘小丽 杨光 杨晶

国家发展和改革委员会能源研究所

田磊等.美国页岩气开发环境风险控制措施及其启示.天然气工业,2013,33(5):115-119.

摘 要 美国页岩气产业快速发展对美国 and 世界能源格局产生了重要影响,但其页岩气开发带来的环境风险也较大,包括土地占用与污染、水资源大量消耗与污染、大气污染与温室气体排放等。为此,从政府监管措施和环境友好开发技术两方面分析了美国页岩气开发环境风险控制措施,主要包括建立多级协调的监管体系、实行页岩气开发全过程监管并针对其特点新增监管措施、提出一系列降低页岩气开发环境风险的开发指南等。结合中国的实际情况分析认为,部分地区页岩气开发将面临土地紧张、水资源短缺及潜在污染等环境问题,因此在页岩气开发起步阶段即应将环境监管作为促进中国页岩气产业健康发展的重要手段。进而建议:①在政府监管方面,应尽快完善油气开发环境监管法律体系,从国家层面推动页岩气环境监管体系建设,提升环境监管能力,设立页岩气开发环保技术推广补贴 and 环境保护专项基金,并建立有效的公众沟通机制;②在开发技术方面,对外合作中应优先引进环保开发技术,自主研发应以节水、节地 and 设备小型化为发展方向。

关键词 美国 页岩气 环境风险 环境监管 环境友好开发技术 中国页岩气开发 建议

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.05.022

Enlightenment from environmental risk control measures in the U . S . shale gas development

Tian Lei , Liu Xiaoli , Yang Guang , Yang Jing

(Energy Research Institute of National Development and Reform Commission , Beijing 100038 , China)

NATUR . GAS IND . VOLUME 33 , ISSUE 5 , pp .115-119 , 5/25 /2013 . (ISSN 1000-0976 ; In Chinese)

Abstract : The development of the U . S . shale gas industry is booming over the past decade , bringing changes to the energy structure not only in the states but even all over the world . However , the exploitation of shale gas imposes great risk upon environment , including land occupation and soil pollution , water consumption and contamination , air pollution , greenhouse gas emission , etc . This paper first analyzes the environmental risk control measures in the US shale gas development in the two aspects of government supervision and environmentally-friendly development technologies . The involved measures include a multi-level coordinated supervision system , the implementation of whole-process supervision and accordingly supplemented monitoring ways , and guidelines for mitigating the environmental risk in shale gas development . While in China , the shale gas development has to face problems such as land limitation , water resource shortage , potential pollution to environment etc . ; therefore , environment supervision should be a significant way to ensure healthy development of shale gas industry in China , especially at the initial stage . In terms of government supervision , China should push forward the establishment of environment regulation system , with emphasis on dynamic environment appraisal system , environment protection fund , and efficient communication mechanism among the government , the industry and the general public . In terms of environmentally friendly technologies , China should not only learn good experiences from other countries , but meanwhile stimulate more independent research projects with the emphasis on water conservation , land saving and equipment downsizing .

Key words : US , shale gas , environmental risk , environmental supervision , environmentally-friendly development technologies , China , proposal

基金项目 :国家发展和改革委员会宏观经济研究院基本科研项目(编号:S1207-5)。

作者简介 :田磊,1986年生,助理研究员,博士;2012年毕业于清华大学并获博士学位;主要从事石油天然气经济、分布式能源系统研究工作。地址:(100038)北京市西城区木樨地北里甲11号国宏大厦B座14层1411室。电话:(010)63908432。E-mail:tianl@eri.org.cn

近年来,美国页岩气产业发展迅速,对美国和世界能源格局产生了重要影响。但页岩气开发引发的环境问题引起了美国社会及一些国家的广泛关注,一些地方已禁止开采页岩气^[1-2]。中国政府高度重视页岩气的发展,制定了页岩气发展“十二五”规划,出台了页岩气补贴政策,目前正在研究制定页岩气产业政策及相关扶持政策。中国页岩气开发属于起步阶段,应避免“先开发,后治理”,应借鉴美国页岩气开发的经验与教训,将页岩气开发环境监管研究与资源勘探、开发等结合在一起,及早建立适应中国页岩气开发的环境监管体系,并制定配套的政策与措施。

1 美国页岩气开发对环境的影响

2000—2011 年,美国页岩气产量增长了约 14 倍。2010 年产量达到 $1\,378 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3],占全美天然气年总产量的 23%,超过了中国 2011 年天然气年产量;2011 年,产量超过 $1\,700 \times 10^8 \text{ m}^3$,占比达到 34%^[4]。随着产量急剧上升,页岩气开发对当地环境和居民生活的影响明显加剧。环境影响主要源于:①页岩气资源不如常规气集中,若要达到一定的开采量,所需的工业作业规模比生产等量常规天然气要大得多,大规模的页岩气开发将对当地土地使用及居民生活产生较大影响;②页岩气开采目前主要依靠水力压裂技术,对当地的地表水和地下水、空气存在潜在污染威胁。

1.1 土地占用与污染

通常陆上常规气田每 10 km^2 不到 1 口气井,而页岩气田气井数可能超过 10 口^[5]。除气井占地外,配套道路、储水槽以及输气设施建设同样需要用地。同时开发过程产生的废水、废物若处置不当,也会对附近土壤造成污染,如美国宾夕法尼亚州的钻井活动引发了对土地污染和生物多样性减少的忧虑。

1.2 水资源大量消耗与污染

页岩气开发核心技术之一是水力压裂技术。采用此技术会带来两个问题:①水资源大量消耗;②压裂液及后续产生的废水可能对地下水和地表水造成污染。美国巴奈特地区单口页岩气井在其生命周期内产出热值为 $1 \times 10^{12} \text{ J}$ 的页岩气时,耗水量为 $18 \sim 40 \text{ m}^3$,而常规天然气的耗水量在 $9 \sim 11 \text{ m}^3$ ^[6]。在现有工农业用水的基础上,大量增加的页岩气开采用水将会引起对环境的累积影响,如河流等地表水和地下水资源的枯竭、含水层储水能力的丧失、水质的恶化等,危害当地生态系统。压裂操作中压裂液及其产生的返排水(占

原来注入液体的 10%~70%^[7])、产出水(地层中自然存在,与页岩气共同采出的水)潜在的环境危害也较大。废水中除了含有有害化学添加剂成分外,还含有储集岩中浸出的烃类化合物、重金属和矿物盐类。若这些废水渗透到地下含水层或流入地表水体,会造成严重水污染。2011 年 12 月,美国环境保护署公布怀俄明州 Pavillion 页岩气田地下水污染初步调查报告^[8],首次将水力压裂操作与地下水源污染正式关联起来。

此外,水力压裂操作中向地层大量注水,高压操作形成裂缝,可能诱使深层岩石滑动,诱发地震。但目前这一观点还存在争议。

1.3 大气污染与温室气体排放

天然气开发活动是甲烷、挥发性有机化合物(VOCs)及其他空气污染物的来源之一。天然气燃烧所产生的碳排放强度相对较低,但其主要成分甲烷不仅会造成当地空气污染,也是一种高强度温室气体,其温室效应影响约是二氧化碳的 25 倍。有研究显示,在页岩气开发过程中约有 1.19% 的甲烷泄漏,再考虑加工、输气和配气环节则整个泄漏量约为 2.01%^[6,9]。美国环境保护署在 2011 年公布的修正后非常规气井完井过程所产生的甲烷排放估测值是初始值的 2 倍^[10]。2012 年 4 月美国环境保护署发布了控制页岩气开采大气污染的首个法规,要求使用水力压裂法生产的所有页岩气井必须安装有害气体捕捉装置。

2 美国页岩气开发环境风险控制措施

2012 年 5 月国际能源署(IEA)发布了《天然气黄金时代的黄金规则》(Golden Rules for a Golden Age of Gas)的特别报告^[5],指出天然气发展即将进入黄金时代,但前提是能在盈利的同时,以环境友好的方式对储量巨大的非常规天然气资源(页岩气、致密气和煤层气)进行开采。美国作为现今最大的页岩气开采国,其环境风险控制措施已经过实践,主要包括政府监管和环境友好开发技术两方面。美国经验表明,通过合理的监管制度和不断发展的技术可以控制页岩气开发带来的环境风险,实现页岩气的环境友好开发。

2.1 政府监管

美国实行以州政府为基础的监管体制,形成联邦、州、地区及开采地多级协调格局。联邦政府负责制定页岩气开发环境监管的相关法律,主要包括《联邦环境法》《清洁水法》《饮用水安全法》《资源保护和恢复法》

和《清洁空气法》等。实际监管主要由州政府实施,境监管主要由州环境机构承担。州环境机构负责联邦政府环境规章的贯彻,同时执行州的环境规定。同时,地方政府针对页岩气生产过程各个环节提出结合本地特点的具体监管政策。为了更好地行使监管权力,避免漏管、重复监管以及出现权力交叉等问题,联邦政府与各州政府建立了协作关系。州政府机构参与联邦政府一些监管法规制定工作,并与联邦政府就一些监管问题达成协议。例如当联邦规定与州规定冲突时以联邦优先,当联邦标准低于州标准时则同时实施两套标准。监管过程中,环保组织、行业组织也广泛参与,主管机构会听取各方报告及意见。

美国以较完善的常规油气开发环境监管体系为基础,针对页岩气开发特点新增监管措施。在开发初期,美国政府并未对页岩气开发采取特殊监管政策,而是将常规天然气的监管框架引入页岩气监管中,包括相关的环境监管。近年来,随着页岩气开发规模不断加大,引发的环境争议增多,美国政府对页岩气开发监管越来越严格。联邦政府正试图通过修改部分法律实施

更为严格的环境和生产监管,要求页岩气开发商加强环保投资,提出更多规避风险和解决问题的方案。针对公众关心的热点问题,美国出台了水力压裂操作过程空气污染控制联邦标准,并正在酝酿一系列措施增加页岩气开发过程的透明度,包括强制公开页岩气开发中压裂液使用情况,建议州政府机构设立废水排放标准,建立地下水检测机制等。表 1 列出了美国部分页岩气环境友好开发措施和规定。

美国实行页岩气开发全过程监管,推广自行申报制度。现有监管涉及页岩气勘探、选址及地面建设、设备运输、钻井及完井、水力压裂、生产水供应、空气污染控制、地表水管理、废水及固体废物处置、井址复原和地下水污染防控等,各环节均有详细监管措施。废水和固体废物监管是公众主要关心点,针对页岩气压裂返排水和产出水的特殊性,政府出台了有别于常规油气田开发废物处理要求的规定,但各州规定差别较大。例如,某些州允许废水露天存放,某些州则要求所有污染性液体必须储存在罐体中实现闭环钻井系统(Closed Loop Drilling System)操作;西部和南部各州

表 1 美国部分页岩气环境友好开发措施和规定

分 类	页岩气环境友好开发措施和规定
1. 水力压裂	
在钻井之前收集水与空气的基础数据	科罗拉多州要求
公开披露水力压裂液体的化学成分	蒙大拿州、怀俄明州、得克萨斯州、科罗拉多州、宾夕法尼亚州和阿肯色州均要求该项信息公开
研究水力压裂液体所含有毒化学物质的替代品	相关企业和行业组织正在进行
2. 废水处理与处置	
循环利用产出废水	宾夕法尼亚州:马塞勒斯区块的企业对水力压裂废水进行循环回收 得克萨斯州:在鹰潭区块作业需循环利用水力压裂废水
对钻井现场附近的水质进行持续检测	新墨西哥州:要求对处置井进行监控
在油气行业应用雨水排放许可要求	科罗拉多州:涉及 4 046 m ² (一英亩)以上的土地的施工活动应具备雨水排放许可证 蒙大拿州:油气生产所有阶段都应具备排放许可证
3. 空气污染与气候变化	
在生产链各个环节进行甲烷排放测量并建立报告体系	美国环保署要求天然气行业从 2012 年起上报每年甲烷排放情况
甲烷减排技术	得克萨斯州:巴奈特区块使用绿色完井技术 科罗拉多州和怀俄明州:要求采用绿色完井技术,低渗出或无渗出气动装置阀门 美国环保署:将甲烷纳入污染源监测中以提倡应用甲烷减排技术
确立空气污染物排放标准	美国环保署 2011 年 7 月发布了针对油气行业新污染源的行为标准 科罗拉多州:对完井过程的甲烷排放以及废水存储设备的挥发性有机化合物进行监管
研究页岩气生产全生命周期的温室气体排放	大学及美国环保署正在进行
4. 建立问责制	
水供应被破坏时进行问责并补偿当地社区	北达科他州和宾夕法尼亚州:企业必须更换或恢复水源供应
聘用巡视员和监管人员	宾夕法尼亚州:开采企业缴纳聘请费用
改进关于页岩气作业的公共信息	美国能源部计划建立国家数据库统一记录公共信息

允许处理后废水注入地下,东部各州则要求取得许可后将废水排入公共污水处理厂。政府监管还要求企业在页岩气开发过程中严格遵守法律法规,接受监管,推广自行申报制度,并配套了严厉违规惩罚措施。

2.2 环境友好开发技术

为解决页岩气开发环境问题,除监管外,美国政府积极支持页岩气开发企业创新技术、发展环境友好开发方式,并提出了一系列开发指南和最佳实践案例以帮助企业降低页岩气开发环境风险^[11]。

2.2.1 基准测试

在开发活动前建立当地主要环境指标的基准(例如地下水水质),并在开发期间进行持续监测,从而可评估开发活动所带来的环境影响程度。这需要监管部门与开发企业或者第三方单位共同进行。

2.2.2 优化开发方案设计

对页岩气田所在地区进行全面的地质勘察,优选钻井和水力压裂地点,并评估深部断层或其他地质特征引发地震、或使流体穿过不同地层的风险。合适的开发方案可以在较大程度上减少钻井数量,降低水力压裂风险,提高气井采收率。

2.2.3 气井隔离与泄漏管理

严格落实气井设计、施工、固井和完整性测试准则,含气层必须完全与气井贯穿的其他地层隔离,特别是与含水层隔离。根据地质情况和含水层位置,为气井设定深度限制,同时限制水力压裂最小操作深度。

2.2.4 循环用水与废水、废物处理

通过提高作业效率和水的循环利用,减少淡水用量。设定水力压裂最大用水量限制,促进压裂操作回流水循环使用。制订严格的监管制度督促对废水、废物进行安全存储和处理。鼓励无害化压裂液添加剂研发,并研究减少化学添加剂用量的技术手段。

2.2.5 甲烷捕集与减排技术

设定气井天然气排空和燃烧限值,明确要求安装甲烷捕集设备。已有多项甲烷捕集技术可实现 80% 以上的甲烷减排^[12]。

3 对中国的启示

中国页岩气资源主要集中在四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、渝东鄂西地区、黔湘地区等^[3],页岩气开发面临土地紧张、水资源短缺等环境限制。主要表现在中西部部分地区地形复杂,地表高差大,大规模井场作业面临挑战;部分地区人口稠密,页岩气开发需要与农业、工业和居民住宅争地;部分页岩气富集区干旱缺水,即使水资源相对丰富的西南地区近些年也

频遇干旱;页岩气开采既消耗大量水,也产出污水,若处置不当可能对地下水和地表水造成污染。

目前中国已进入环境污染事件高发期,群众对环境敏感度越来越高。页岩气开发多元开采主体的特征,也将加大环境控制和政府监管的难度,必须及早高度重视,避免页岩气开发过程出现大的污染事故和群体性事件,防止对页岩气产业发展的冲击。政府必须在开放准入的同时,创新监管制度,承担起监管的责任。政策设计思路应应将页岩气环境监管作为促进页岩气产业健康、顺利发展的一个重要手段。同时,针对页岩气开发的迫切性和特殊性,应从监管体系建设、监管能力培养、资金投入保障机制、信息沟通机制等方面,提前部署和设计页岩气开发环境监管框架。

3.1 加快完善中国油气开发环境监管法律体系,提前研究制定页岩气开发环境监管制度

常规油气开发环境监管法律体系是进行页岩气等非常规天然气开发环境监管的基础,需加快完善常规油气开发过程监管法律、法规、技术标准和规范等的制定和落实工作。同时,基于页岩气开发特点,提前研究、制定针对开发各环节的环境监管法规、生产技术标准和规范等,尤其是压裂液污染防治、返排水回收利用等方面需出台专门监管制度。页岩气开发属滚动开发过程,矿区开发过程中生态环境在不断变化,有必要在规模化开发前提前设计页岩气建设项目的动态环境影响评价制度,对整个开发过程进行动态跟踪评价。

3.2 从国情出发,自上而下推动页岩气环境监管体系建设,为实施监管提供体制机制保障

美国以州政府为基础的监管体系是不是最佳系统,目前有较大争议。美国 85% 的天然气产自于 15 个州,而各州政府出于对当地经济发展的考虑,监管规定差异较大,地方保护问题较突出。当前中国省级及以下政府的监管能力较弱,难以实现有效管理,因此需要从国家层面推动页岩气监管体系建设,建立页岩气开发环境监管统一管理机制。页岩气开发涉及环保、国土、水利、科技等多个部门,国家在制定页岩气环境监管机制时,应在明确各部门职责的基础上,设立统一管理协调机构;地方政府也应基于实际情况对应设立管理机构。中央政府统一管理协调机构,以页岩气开发环境管理相关的法律、法规、技术标准和规范制定为主,地方政府机构以监管实施为主,并相互协调。

3.3 加强环境监管基础能力建设,为实施监管提供技术支撑

页岩气开发环境监测能力建设是一项系统性工程。结合页岩气预期发展目标,培养充足的许可审批

与监管人员、研发现场监测设备和构建系统化检测方法是建立有效监管体系的基础。建议在“十二五”期间开展页岩气开发环境监管试点工作,尽快制定相应的技术标准和规范,为推进全国页岩气环境监管提供借鉴。建立环境风险应急预案机制,确保各种预案健全且与风险等级相匹配。

3.4 设立页岩气开发环保技术推广补贴和环境保护专项基金,为实施监管提供资金保障

页岩气开发中环保技术与措施的应用会抬升页岩气开发成本。IEA 预测环保技术的应用将使典型页岩气井的总开发成本增加 7%。由此,建议在页岩气产业起步阶段设立环保技术推广专项补贴,平衡成本增加与保护企业开发积极性之间的关系。此外,页岩气开发过程一旦发生环境污染,不仅影响巨大且治理需要大量资金,建议中央和地方政府分级设立环境保护专项基金,此基金用于事故环境污染治理和页岩气开发环保技术研发及推广应用。

3.5 建立有效的信息沟通机制,加强社会监督

中国页岩气资源部分集中在人口稠密区,未来大规模的页岩气开发可能对当地居民生活、土地使用和水资源取用产生较大影响。随着公众环保意识的增强,存在公众反对开发页岩气的风险。因此要重视公众沟通,规范信息披露行为。页岩气开发企业应公开、诚实地向当地居民解释开发过程中可能存在的环境、健康风险,以及所采取的应对措施;环境监管机构应强制测量并公开用水量、废水量、甲烷及其他空气污染物等相关数据,制定环保标准,规范压裂液添加剂的成分及其用量。

3.6 页岩气开发环境保护技术引进与自主研发需相互促进,从技术层面为环境风险控制提供保障

除页岩气勘探开发技术外,对外合作过程中相关环境监测、保护技术也应一并引进、消化、吸收、再创新,例如前述美国已被证明切实有效的环保技术可列入优先引进技术目录。同时加大自主研发力度,一方面政府应加大对环境友好的页岩气勘探开发技术研究投入;另一方面积极促进企业自主研发,政府出台优惠政策鼓励优先采用本国技术。

基于中国页岩气开发环境限制条件,中国页岩气开发技术应向节水、节地和设备小型化方向发展。四川盆地页岩气开发进展较快,建议设立页岩气国家科技攻关专项,基于四川盆地地形、地质特点,围绕基础理论、工程技术和装备等重点领域,集中优势力量,加强协同攻关,力争短时间内攻克重大瓶颈问题。

参考文献

- [1] RAHM D. Regulating hydraulic fracturing in shale gas plays: The case of Texas[J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2974-2981.
- [2] 王道富,高世葵,董大忠,等.中国页岩气资源勘探开发挑战初论[J].天然气工业,2013,33(1):8-17.
WANG Daofu, GAO Shikui, DONG Dazhong, et al. A primary discussion on challenges for exploration and development of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 8-17.
- [3] 邱中建,邓松涛.中国非常规天然气的战略地位[J].天然气工业,2012,32(1):1-5.
QIU Zhongjian, DENG Songtao. The strategic position of unconventional gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 1-5.
- [4] U.S.EIA. World shale gas resources: An initial assessment of 14 regions outside the United States[M]. Washington DC: U.S. Energy Information Administration, 2011.
- [5] IEA. Golden rules for a golden age of gas[M]. Paris: International Energy Agency, 2012.
- [6] CLARK C E, HAN J, BURNHAM A, et al. Life-cycle analysis of shale gas and natural gas[R]. Argonne: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2011.
- [7] COUNCIL G W P. Modern shale gas development in the United States: A primer[R]. Oklahoma City: U.S. Department of Energy, 2009.
- [8] DIGIULIO D C, WILKIN R T, MILLER C, et al. Investigation of ground water contamination near Pavillion, Wyoming (Draft)[R]. Ada, Oklahoma: U.S. Environment Protection Agency, 2011.
- [9] BURNHAM A, HAN J, CLARK C E, et al. Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 46(2): 619-627.
- [10] U.S.EPA. Proposed mandatory reporting of greenhouse gases: Petroleum and natural gas systems[R]. Washington DC: U.S. Environment Protection Agency, 2012.
- [11] BOARD S O E A. Shale gas production subcommittee second ninety day report[R]. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2011.
- [12] HARVEY S, GOWRISHANKAR V, SINGER T. Leaving profits—the U.S. oil and gas industry can reduce pollution, conserve resources, and make money by preventing methane waste[R]. New York: Natural Resources Defense Council, 2012.
- [13] 李玉喜,张大伟,张金川.页岩气新矿种的确立依据及其意义[J].天然气工业,2012,32(7):93-98.
LI Yuxi, ZHANG Dawei, ZHANG Jinchuan. The significance of shale gas established as a new material[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(7): 93-98.