

李颖虹, 魏凤. 欧美页岩气水力压裂技术环境风险及管理措施剖析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 194-199. Li Yinghong, Wei Feng. Hydraulic fracturing of shale gas exploration environmental risks and management in Europe and America[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(12): 194-199.

# 欧美页岩气水力压裂技术环境风险及管理措施剖析

李颖虹, 魏凤

(1.中国科学院前沿科学与基础教育局, 北京 100190; 2.中国科学院武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430071)

**摘 要** 水力压裂技术是页岩气开发中最为关键的技术之一。随着美国页岩气开发的成功, 全球越来越多地关注水力压裂带来的环境影响。该文主要通过文献计量法、文献调研法和循证法等, 较为系统地分析水力压裂技术及其作用、特点及引发环境风险的原因, 并举例说明水力压裂可能带来地下水和地表水污染、增加甲烷排放、破坏生物多样性、诱发地震、增加水资源压力等环境风险, 并通过案例分析相关的影响因素, 还剖析了美、英、德、法、欧盟等采取的应对策略并对比, 最后提出页岩气开发应开展水力压裂环境风险影响研究与评价、制定系统的监管政策、遴选替代技术、加强水资源评价与管理等对策建议。

**关键词** 水力压裂; 环境风险; 管理办法; 欧美; 页岩气

中图分类号: X820.4 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.12.033 文章编号: 1003-6504(2016)12-0194-06

## Hydraulic Fracking of Shale Gas Exploration : Environmental Risks and Management in Europe and America

LI Yinghong, WEI Feng

(1. Bureau of Frontier Science and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Wuhan Literature Information Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract** : Hydraulic fracturing is one of the core technologies in shale gas development. Since the shale gas exploring began in the US, more and more concerns the world over have been attached to the environment impacts of hydraulic fracturing. In this paper, the environmental risks of groundwater and surface water pollution, increases of methane emissions, destruction of biodiversity, induction of earthquake, and water shortage aggravation probably caused by hydraulic fracturing are analyzed on the basis of the methodology such as literature metrics, literature investigation and evidence-based method, together with the case studies regarding the impact factors. In addition, countermeasures in Europe and the US against the environmental risks are introduced; and suggestions are made in regard to conducting further study and impact assessment on environmental risks of shale-gas development, drawing up systematic supervising policies, selecting alternative technologies, and enforcing water resource management.

**Key words** : hydraulic fracturing; environmental risks; management methods; Europe and America; shale gas

水力压裂是美国实现页岩气革命的一项重要技术,也是全球页岩气开采所使用的核心技术<sup>[1-2]</sup>。水力压裂技术主要是指将压裂液等化学物质和大量水、泥沙的混合物,用高压通过钻井注入地下井,压裂附近油层的岩石构造并形成流体通道,进而收集天然气的技术<sup>[3]</sup>。这项技术在美国最为发达,已经在提高石油和天然气产量方面做了多年贡献,特别是页岩气开发方

面<sup>[4]</sup>。目前,阿根廷、英国、墨西哥和中国政府都已经开始探索页岩油气藏商业开发的可行性。

但是,水力压裂技术由于要消耗大量的水以及引发的环境问题一直备受争论<sup>[5]</sup>。出于对水力压裂技术所引发环境风险的担忧,法国在 2011 年 7 月通过一项法案禁止使用水力压裂技术开采页岩气<sup>[6]</sup>;德国总理默克尔在 2015 年 4 月也签署了一项法律草案,规

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkyjs@vip.126.com

收稿日期 2016-03-23 修回 2016-05-31

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项:页岩气勘探开发基础理论与关键技术(XDB10000000);中国科学院油气资源路线图专项:一带一路油气资源战略研究(Y4ZG40)

作者简介:李颖虹(1978-),女,副研究员,博士,主要从事非常规油气资源科技项目管理 (电子信箱)Yhli@cashq.ac.cn。

定使用水力压裂技术必须要经过严格的环境评审及法律条例管束。为了保障国家油气资源利用和减少对外依附,英国政府自 2015 年以来一直都在不断的推进页岩气开发<sup>[7]</sup>;美国各州对页岩气水力压裂技术的应用是持不同态度,如宾夕法尼亚、德克萨斯等地积极使用该技术开采页岩气,而佛蒙特州则完全禁止,纽约自 2008 年以来一直暂停使用该技术。

为了详细了解水力压裂带来的环境风险及影响,本文将通过文献调查分析、文献计量和循证法等方法,揭示水力压裂带来的环境风险和影响,分析各国降低水力压裂环境风险管理的应对策略,并提出页岩气水力压裂环境风险防范的对策建议。

## 1 水力压裂技术及特点

水力压裂是提高页岩气经济采收率的一项关键技术,也是一种常见技术。它具有克服页岩储层的低渗透率、因钻井造成井眼附近储层损害引起渗透率降低、适用性广等特点。水力压裂技术作为增产措施,还可根据页岩厚度、岩石破裂特性等进行优化设计和调控,以达到优化裂缝网络和实现最大化的气体产量,因此水力压裂技术的适用性非常广泛,可以适用于不同的盆地和井口。

通常在实施水力压裂技术时,需要对目标区域的场地进行勘探调研。澳大利亚 Vamegh Rasouli 等以北珀斯盆地为例,研究实施水力压裂技术之前需要进行准备工作,认为勘探工作不仅需要调查当地的地形地貌及储层构造特征,还需要对目标区域的地质力学属性、压力级数和方向进行测量,并预测压裂初始值和扩展压力<sup>[8]</sup>。

## 2 水力压裂环境影响的机理分析

目前,水力压裂是美国页岩气成功开发所使用最为关键的技术,随着美国页岩气开发的规模化发展,越来越多的科研人员开展了对页岩气水力压裂带来的环境风险,美国环境部门也越来越重视页岩气开发的环境监管。概括起来,水力压裂带来的环境风险主要有如下原因:

(1)压裂过程中完井故障可能引发流体逆流,导致多种污染物和复合物污染,如果预防不当则可能引发严重后果,因而必须采集连续监控和预防、评价措施。

(2)压裂过程中所使用的压裂液等化学药剂在地下扩散造成的。在页岩气开发中,要使用各种各样的水力压裂液,其中包含数百种不同的有毒化合物,大部分化合物将随着返排水和生产水一起流动,如果没有一个科学的废水处理方案,可能给地下水、地表水、

土壤和生物体带来高威胁。

(3)与页岩气埋藏储层的性质有关。不同储层的结构和成分,可能在页岩气开发过程中受到不同的破坏,这也可能引发化学药品的泄漏,从而产生环境风险。

## 3 水力压裂带来的环境风险及评价

实施水力压裂技术需要使用大量的水和压裂液等化学物质,如果不采取严格的管理措施,将给环境带来严重影响。

(1)可能导致地下水和地表水污染。含有页岩气的岩石层往往接近地下水层,压裂液等有害物质可能通过裂隙或断层污染地下含水层,且由于水力压裂液的意外泄露和土地蓄意利用可能使压裂液返回地表从而污染地表水。2013 年以来,美国杜克大学、匹斯堡大学等多项研究表明,钻探作业、压裂液等试剂注入可对地下水具有毒理威胁<sup>[9-10]</sup>。2013 年,杜克大学调查美国宾夕法尼亚州东北部马塞勒斯产气区周围 1 km 内的 141 口私人饮水井,结果发现 82%水井的水样中含有甲烷和乙烷,少量样品还含有丙烷,其中甲烷、乙烷浓度分别是正常水平的 6 倍、23 倍,由于该地区并无乙烷和丙烷来源,因此判断这些饮水井受到页岩气开采的污染。

Sang Wenjing 等也研究了水力压裂对地下水的污染问题<sup>[11-13]</sup>,认为压裂液在地层中的流动带动了污染物的传输,从而导致污染地下水,同时溢出、泄露、排污也可能导致有毒物质和元素在附近土壤和水系中沉积,导致地表水和浅层地下水的污染。总结起来,水力压裂技术导致地下水污染与几大因素有关:(1)地下水的水质和深度;(2)当地的空气质量;(3)与人口中心的临近程度;(4)与物种和栖息地的临近程度;(5)所需处理的压裂液等流体的量;(6)与活动断层的临近程度。

(2)可能导致甲烷排放,不利于改善大气温室效应。甲烷是一种重要的温室气体,虽然其排放量远小于二氧化碳,但其温室效应是二氧化碳的 28 倍。研究表明页岩气开采上空甲烷浓度较高,会加剧温室效应及对环境的不利影响<sup>[14]</sup>。美国研究人员利用一架装有特殊仪器的飞机,对宾夕法尼亚州西南部马塞勒斯页岩气井上方的甲烷浓度开展调查,结果发现在约 2 800 km<sup>2</sup> 的区域,甲烷的区域通量为 2.0~14 g/(km<sup>2</sup>·s),另外 70 个井场在钻井阶段的甲烷排放水平很高,每口井平均为 34 g/s,比美国环境保护署对这个运行阶段的估计高 2~3 个数量级<sup>[15]</sup>。

2013 年 9 月,英国能源与气候变化部调查英国与

页岩气勘探和生产有关的温室气体排放后,认为页岩气开采和利用的碳排放强度与常规天然气相当,比液化天然气和煤炭发电要低得多<sup>[16]</sup>。Anjuman Ahahriar 等通过对页岩气开发生命周期模拟测算研究也得到相似结论<sup>[17]</sup>。

2014 年 8 月,美国加州科学技术理事会(California Council on Science and Technology, CCST)受美国联邦土地管理局的委托,发布以水力压裂在为主的陆上油井增产技术(well stimulation technologies)的独立评估报告,认为加州所有油田增产排放的甲烷等温室气体都低于加州的气候法律要求,并且温室气体的排放可以用技术来控制<sup>[18]</sup>。

2015 年初,美国德州大学奥斯汀分校的 David T Allen 等采用生命周期评价方法,研究了在页岩层天然气和凝析油开采中甲烷逸散量,通过对 489 个运行气井和 19 个完井的甲烷逸散数据的计算,认为空气中约 85%的甲烷逸散量来自于天然气井,但不同地域甲烷排放有所不同,主要与开采区域环境、气井构成类型有关<sup>[19]</sup>。

(3)破坏生物多样性,影响生态环境。通过有毒化学物质污染、井场和管道建设,以及湿地变化等,页岩气开发将降低当地生物多样性,破坏生态环境。美国科学院对此作了全球首次评估,并于 2013 年 5 月发布研究结果,认为水力压裂技术存在对生物、生态的广泛影响,其中严重的将导致土壤和地表水盐渍化以及森林的破坏、放射性有毒合成化学物质的污染、地貌景观的破坏等<sup>[20]</sup>。

2014 年 7 月,美国俄亥俄州立大学土木、环境和大地工程系和美国能源部国际能源科技实验室等再次开展类似研究<sup>[21]</sup>,对宾夕法尼亚州水力压裂马塞卢斯页岩气井水样本中微生物群落进行长达 328 d 的跟踪研究,发现生物丰富性和多样性在压裂后降低,并且生物多样性在 49 d 达到最低。31 个表现出不同特征的分群随着碳和电子受体的注入而衰弱。回流和采出液中的大部分(>90%)群落与耐盐细菌有关,包括弧菌、海杆菌、盐单胞菌等,并伴随着发酵、碳水化合物氧化、硫循环代谢。

2015 年,美国康奈尔大学 Brian G Rahm 等通过对美国国家监管机构记录的 2007 年至 2013 年 6 月发生的 3 267 起页岩气环境破坏事件的分析<sup>[22]</sup>,结果指出:从 2007 年至 2009 年,页岩气环境破坏事件呈增加趋势,在 2010 年达到峰值,2011 年以后呈下降趋势。其中外溢和侵蚀是最经常发生的破坏事件且最常发生在钻井过程和压裂过程,主要原因可能是井垫数量、气价、环境督查员的工作效率和监管文化的转变

等,其中监管政策的执行和落实使 2011 年后环境破坏事件发生率降低了 45%。

(4)诱发地震,引发噪音。页岩气开采可能造成噪音、诱发地震等潜在危害。2011 年, Cuadrilla 资源公司因在英格兰西北的海边城市布莱克浦开发页岩气井,导致了里氏 2.3 级和 1.5 级的地震的发生,并被迫停止了钻探和压裂作业,气井生产也被英国政府禁令停止。

2014 年 8 月 28 日,美国加州科学技术理事会(California Council on Science and Technology, CCST)发布以水力压裂在为主的陆上油井增产技术(well stimulation technologies)的独立评估报告。报告认为水力压裂很少涉及因大量流体的高速注入而诱发地震的问题,但是美国多个州出现因在深注水井中对采出地层水进行处置而引发有感地震,因此水力压裂技术的使用存在地震风险。2015 年,美国加利福尼亚大学学者开展水力压裂微震的模拟研究<sup>[23]</sup>,认为水力压裂导致断裂裂缝的形成与微震动具有相似性。

(5)导致水资源愈发趋紧。页岩气生产采用水力压裂技术,是个高度密集型的用水过程。通常单个井的钻孔和压裂作业通常需要约 1.9 万 m<sup>3</sup> 的水,且其中 1.8 万 m<sup>3</sup> 左右的水都集中在压裂阶段,强度极大。2014 年 9 月,世界资源研究所(WRI)发布题为《全球页岩气开发:水的可用性和商业风险》(Global Shale Gas Development Water Availability & Business Risks)的报告<sup>[24]</sup>指出,随着各国家页岩油气勘探的升级,淡水资源的有限供应可能成为水力压裂技术应用的阻力,目前全球 40%的国家页岩油气资源开发面临水资源限制。其中中国、阿尔及利亚、墨西哥、南非、利比亚、巴基斯坦、埃及、印度等页岩气储量丰富的 8 个国家面临极高的水压力。如美国自 2011 年起所钻的油气井里,有大约 40%处于缺水压力“极高”的地区,能源开采用水已经对这些地区的家庭、农村和企业用水造成威胁。

根据国际能源署的估计,到 2035 年,世界能源消费将增加 35%,从而导致耗水量增加 85%。世界各国尤其是发展中国家,如果不能预见到能源投资项目的水资源制约,势必增加项目的风险和成本。近期,意大利、比利时和澳大利亚的学者开展波兰北部的页岩气开发对水资源的影响研究<sup>[25]</sup>,建议加强对地下水和地表水的资源保护,采用更多的节水技术;此外政府还要制定监管政策,妥善管理页岩油气开发的淡水资源及存在的水资源风险。

#### 4 欧美水力压裂环境监管政策现状及评价



尽管水力压裂技术带动页岩气产业的发展在美国取得成功,但是美国一些州、欧盟及欧洲一些国家对采用该技术开发页岩气开发持不同作法。

#### 4.1 欧美国国家水力压裂环境监管政策现状

美国页岩气开发尽管处于全球领先地位,但公众压力越来越大。2012 年以来,极大缓解美国能源压力的页岩气开发被誉为“可席卷全球的能源革命”,其成熟的水力压裂技术在全球占有领先地位。但在美国的一些州,受水力压裂的影响,发生了牲畜患病、地下水污染等问题,使得来自公众反对的压力越来越大。2014 年 12 月 17 日美国纽约州宣布将禁止使用水力压裂技术来开采本州的石油和天然气资源,这是美国继佛蒙特州之后又一禁止开发页岩气的州。而宾夕法尼亚、德克萨斯等正积极使用该技术开发页岩气,同时这些州也非常重视对页岩气开发的环境监测、评价和管理。

美国页岩气的开发必须要遵守《清洁水法案》、《安全饮用水法案》、《清洁空气法案》、《资源保护与恢复法案》、《联邦水力压裂法细则》等联邦法规和一系列州层面的法规。2015 年 5 月,美国宾夕法尼亚州环境保护部发布了 2013 年页岩气行业空气排放数据<sup>[26]</sup>,显示随着页岩气井、压缩站数量增多,二氧化氮、颗粒物、二氧化硫、挥发性有机化合物(VOCs)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)这 5 个污染物的排放量也增多了,但甲烷和一氧化碳排放量却显著降低,这得益于联邦和州立监管机构减少温室气体排放的努力。

美国一些行业协会也在关注水力压裂相关环境规范制订工作。2013 年 8 月,美国材料试验协会决定制定页岩油和天然气的水力压裂相关数据和报告的实践规范,重点支持化学物质信息、水源、健康和环境风险、油井完整性等数据信息的报告、开放与管理,以保障公众和环境的健康安全,加强公众对开采过程的认识和信心。

欧盟对页岩气开采持非常谨慎的态度。基于现有的欧盟立法和补充条例,2014 年 1 月,欧盟委员会通过页岩气开采环境和气候保护措施原则建议<sup>[27]</sup>,要求所有成员国在 6 个月内采用这些原则来处理健康和环境风险,并从 2014 年 12 月起每年向委员会通报采取措施的情况,委员会将通过记分形式监督建议书的采纳情况并作比较,同时让公众知晓。该措施将帮助所有成员国积极处理健康和环境风险,确保使用水力压裂技术的环境和气候保护措施能够到位。

该欧盟建议书提出所有成员国应做到(1)在发放许可证之前,应对工程影响及累积效应进行全面评估;(2)评估环境影响和风险;(3)确保完井达到最佳实践

标准;(4)在开采前和期间,检查当地的水、空气、土壤质量,以监测任何的变化和处理新出现的风险;(5)控制废气排放,包括温室气体排放(通过气体捕集);(6)让公众了解在个别井中使用的化学品,确保在整个项目中采用最佳的实践。同时欧盟委员会还将采取各种手段促使各成员国、工业和民间社会组织在页岩气项目环境影响方面的信息交流,并适时审议上述建议书的有效性。

英国是欧洲页岩气开发的坚实拥护者。为了促进页岩气的开发,英国取消了水力压裂禁令,并出台多项勘探、财政、监管措施,促进页岩气开采。2012 年 12 月,为了推进页岩气开发,英国能源与气候变化部宣布开采前必须开展页岩气勘探和风险评估,并就勘探计划和如何解决地震风险向政府报告。2013 年 7 月,英国财政部将页岩气开发收益税率由 62% 下调至 30%,进一步刺激页岩气开发。2014 年 1 月,英国宣布取消对水力压裂法的禁止。2 月,能源与气候变化部公布了页岩气开发的监管路线图以及战略环境评估报告征求意见稿,该监管路线图规定了一系列许可和权限,开发者在开发陆上石油和天然气之前必须获得这些许可。2015 年 8 月,英国发布 27 个页岩气开采许可证<sup>[28]</sup>,还对页岩气开发延迟现象进行干预<sup>[29]</sup>。

法国作为欧洲页岩气储量最大的国家之一(坐拥巴黎盆地和罗纳河谷约 5 万亿 m<sup>3</sup> 的页岩气资源),法国一直禁止使用水力压裂技术勘探和开采页岩气。2005 年,法国时任总统希拉克提出要在环境问题上采取“预防原则”,即国家必须预防经济活动对环境的危害。在 2011 年 7 月,法国正式通过了一项法案禁止使用开采页岩气所必需的水力压裂技术。根据这一决定,法国多个页岩气开采的许可可被废止。2013 年 10 月,在美国企业 Schuepbach 能源公司针对该禁令提出其与法国宪法相违背的申诉背景下,法国宪法委员会经过核准,重申要维持页岩气水力压裂禁令,以保护生态环境。2015 年法国现任总统奥朗德宣布,在其任期内仍将禁止开采页岩气。

德国政府对页岩气开发持谨慎态度,规定在一定条件下可使用水力压裂开采页岩气技术。2013 年 2 月,受工业界的压力,德国政府公布一项法律草案,在一定条件下允许利用水力压裂开采页岩气,但禁止在保护区和饮用水附近进行水力压裂,并表示任何项目都应开展环境影响研究,该草案适用于德国 14% 的领土。2015 年 4 月,德国总理默克尔签署一项法律草案,要禁止采用水力压裂法进行页岩气商业开采。该法律草案规定,2019 年前,若采用水力压裂法进行页岩气商业开采,则必须通过特别委员会钻井测试。2019

年之后,水力压裂将会被禁止使用。同时,也禁止任何钻井低于 3 000 m 的领域采用水力压裂法。仅有深井钻探或者致密气藏才可以使用水力压裂法。同时水力压裂受严格的环境评审以及法律条例管束。任何供应饮用水的区域也将被禁止使用水力压裂法,包括水坝和水库所在地。

#### 4.2 欧美主要国家水力压裂环境政策评价

综合上述对美国、欧盟、英国、法国、德国等主要

国家页岩气开发环境政策的分析,表 1 表示这些国家对页岩气水力压裂技术是否使用的态度、是否开展水力压裂环境研究、是否制定环境政策、是否实施环境监管、环境政策当前效应、是否在继续制定相关政策等方面开展对比。值得一提的是,目前各国除应用常规的环境监管法规政策外,还特别制定针对水力压裂技术的环境监管政策。其中德国、法国的政策最为严厉,属于直接否决制。

表 1 欧美主要国家水力压裂环境管理评价表  
Table 1 The environment assessment of hydraulic fracking in Europe and America

国家	对水力压裂的态度			环境研究		环境政策		是否实施监管		政策效应			是否在继续制定政策	
	支持	反对	有条件支持	是	否	有	无	是	否	中	强	严厉	是	无
美国	各州决定			✓		✓		✓			✓		✓	
欧盟			✓	✓		✓		✓		✓			✓	
英国	✓			✓		✓		✓			✓		✓	
法国		✓				✓						✓		
德国			✓			✓						✓		

注:德、法因还未正式开展页岩气开发,故没有正式实施环境监管工作。

#### 5 页岩气水力压裂环境防控建议

通过上述分析可知,页岩气水力压裂主要具有污染地下水、排放温室气体、诱发地震、破坏生物多样性、制造水压力等 5 个方面的影响,美国、欧盟、英国、法国、德国对此采取不同的应对策略。从页岩气开发的规划化及其环境监管实践来看,美国的经验值得借鉴。当前,我国还处在页岩气产业发展的初期,提出以下建议以帮助促进我国页岩气产业健康发展。

(1)开展页岩气开发中各阶段环境影响的系统研究与评价,充分认识页岩气开发的环境危害,促进相关监管政策的制订。对页岩气勘探、工程建设、压裂与抽采运行、及关闭后等各阶段对地下资源、地面环境、生物生态、诱发地震、职业安全等影响的研究,评价这些环境影响的可发性与危害程度,为我国建立相关的法律法规提供科学依据。

(2)仿效美国环境监管做法,制定适合我国的页岩气环境监管政策、风险防范和应对措施,建立监管体系,并保持信息及时上报与公开透明。时时监控页岩气勘探、开采与开采后的当地的水、空气、土壤中有毒有害物质的变化,以防范任何可能出现的风险,控制废气排放,包括温室气体排放(通过气体捕集);及时发现并预测可能发生的危害,以便采取应对措施;让公众了解在个别井中使用的化学品,确保在整个项目的环境安全。

(3)研究改善与替代水力压裂的方法。为了避免水力压裂所带来的环境风险,许多国家已经开展利用 CO<sub>2</sub>、丙烷、氮气、爆炸/推进剂等来开发页岩气技术的研究;应考虑对环境综合影响最小、成本低、相对成熟、可靠

可行的无水压裂技术作为水力压裂的替代方案。

(4)重视页岩气开发中水资源风险的评估。充分调动当地及管理机构、社区和页岩气开发企业三方的主动性,在页岩气开发前,三方应充分了解当地水供应与页岩气开发的水需求,开展水风险评估,确定与水相关的商业风险和优先领域,共同制定水源保护和管理计划,减少水资源的不确定性,尽可能减少淡水利用,多使用节水技术、水循环利用或水回收技术,以保障水资源安全,降低页岩气商业开发风险。

#### [参考文献]

- [1] Kok M V, Merey S. Shale gas current perspectives and future prospects in Turkey and the world [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 36 (22) 2492-2501.
- [2] John N Armor. Key questions, approaches and challenges to energy today[J]. Catalysis Today, 2014(236): 171-181.
- [3] Vamegh Rasouli, Andrew Sutheland. Geomechanical characteristics of gas shales: a case study in the north Perth Basin[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014(47): 2031-2046.
- [4] World Resources Institute. US-China Clean Energy Cooperation: Status, Challenges, and Opportunities[R]. 2014(4). <http://www.uscc.gov/sites/default/files/Forbes%20-%20testimony%204.16.14.pdf>.
- [5] Terry Engelder. Truth and Lies about Hydraulic Fracturing (Commentary). 2014(10)[EB/OL]. <http://www.aapg.org/publications/news/explorer/details/articleid/12416>.
- [6] Watch Live. France's Highest Legal Body Upholds Ban on Fracking. 2013(10)[EB/OL]. <http://www.france24.com/en/20131011-france-highest-legal-body-approves-ban-shale-gas-fracking>.

- [7] British Energy and Climate Change Department. Getting Ready for Shale Gas—supply Chain Estimated to be Worth Billions as New Environmental Measures Announced, 2014 (4) [EB/OL]. <https://www.gov.uk/government/news/getting-ready-for-shale-gas-supply-chain-estimated-to-be-worth-billions-as-new-environmental-measures-announced>.
- [8] Vamegh Rasouli, Andrew Sutherland. Geomechanical characteristics of gas shales—a case study in the north Perth Basin [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 9, 47(6): 2031–2046.
- [9] Bernard D Goldstein, Bryan W Brooks, Steven D Cohen, et al. The role of toxicological science in meeting the challenges and opportunities of hydraulic fracturing[J]. *Tox Sci Advance Access*, 2014(4): 1–35.
- [10] Robert B Jackson, Avner Vengosh, Thomas H Darrah, et al. Increased Stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 7(110): 11250–11255.
- [11] Sang Wenjing, Cathelijine R Stoof, Zhang Wei, et al. Effect of hydrofracking fluid on colloid transport in the unsaturated zone[J]. *Environment Science Technology*, 2014, 48(14): 8266–8274.
- [12] Yaal Lester, Imma Ferrer, E Michael Thurman, et al. Characterization of hydraulic fracturing flowback water in Colorado—implications for water treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2015(2): 637–644.
- [13] Alex K Manda, Jamie L Heath, Wendy A Klein, et al. Evolution of multi-well pad development and influence of well pads on environmental violations and wastewater volumes in the Marcellus shale (USA) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014(142): 36–45.
- [14] J Peischl, T B Ryerson, K C Aikin, et al. Quantifying atmospheric methane emissions from the Haynesville, Fayetteville, and northeastern Marcellus shale gas production regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 3, 120(5): 2119–2139.
- [15] Dana R Caulton, Paul B Shepson, Renee L Santoro, et al. Toward a better understanding and quantification of methane emissions from shale gas development[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the American*, 2014, 3(111): 6237–6242.
- [16] David J C MacKay, Timothy J Stone. Potential greenhouse gas emissions associated with shale gas extraction and use[J]. *British Department of Energy & Climate Change*, 2013, 9(9).
- [17] Anjuman Shahriar, Rehan Sadiq, Solomon Tesfamariam. Life cycle greenhouse gas footprint of shale gas—a probabilistic approach [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(8): 2185–2204.
- [18] California Council on Science and Technology, Lawrence Berkeley National Laboratory[A]. *Advanced Well Stimulation Technologies in California*[R]. 2014, 8(28).
- [19] Daniel Zavala-Araiza, David T Allen, Matthew Harrison, et al. Allocating methane emissions to natural gas and oil production from shale formations[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2015, 3(3): 492–498.
- [20] Erik Kiviat. Risks to biodiversity from hydraulic fracturing for natural gas in the Marcellus and Utica shales[J]. *The Annals of the New York Academy of Sciences*, 2013, 5, 23(1286): 1–14.
- [21] Maryam A. Cluff, Angela Hartsock, Jean D MacRae, et al. Temporal changes in microbial ecology and geochemistry in produced water from hydraulically fractured Marcellus shale gas wells[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 5(48): 6508–6517.
- [22] Brian G Rahm, Sridhar Vedachalam, Lara R Bertoia, et al. Shale gas operator violations in the Marcellus and what they tell us about water resource risks[J]. *Energy Policy*, 2015, 7(82): 1–11.
- [23] J Quinn Norris, Donald L Turcotte, John B Rundle. Anisotropy in Fracking—a percolation model for observed microseismicity[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 1, 172(1): 7–21.
- [24] Paul Reig Tianyi Luo, Jonathan N. Global Shale Gas Development: Water Availability & Business Risks [R]. *World Resource Institute(WRI)*, 2014(9).
- [25] Vandecasteele L, Mari Rivero L, Sala S, et al. Impact of shale gas development on water resources—a case study in northern Poland[J]. *Environment Management*, 2015, 6, 55(6): 1285–1299.
- [26] Natasha Khan, Eric Holmberg. 8 Facts About the Shale Gas Industry’s Air Pollution[R]. *Pennsylvania*, 2015(5). <https://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2015/05/04/8-facts-about-the-shale-gas-industrys-air-pollution/>.
- [27] European Commission. *European Commission Recommends Minimum Principles for Shale Gas*[R]. Brussels, 2014, 1(22). [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-14-55\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-55_en.htm).
- [28] TV—Novosti. UK Offers 27 Shale Gas Exploration Licenses to boost economy, 2015, 8(28)[EB/OL]. <https://www.rt.com/business/312756-uk-shale-fracking-licenses/>.
- [29] Herbert SmithFreehills. *UK Government Intervenes to Overcome Planning System Delays for Shale Gas Applications*. *Globe Business Media Group*, 2015, 8(19) [EB/OL]. <http://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=c9f934f7-ee76-4f25-8bdb-fc17f2130804>.