美国自然资源保护委员会（NRDC）特邀文章

借鉴国际经验：中国页岩气资源环境友好开发之路

Merisha Enoe, Yan He, Erica Pohnan
耶鲁大学环境保护问题研究所

编者: Michael Davidson, 美国自然资源保护委员会

美国自然资源保护委员会
2012 年 8 月

引言

随着能源需求的不断增长以及由于燃煤发电所导致的环境问题日益严峻，中国政府高度重视发展其天然气资源的供应，包括开发利用国内的非常规天然气储备。中国可能是全世界页岩气资源潜力最高的国家，据估测，其总可开采储量高达 25-36 万亿立方米。在 2012 年 3 月，中国国家能源局（NEA）出台了雄心勃勃的《页岩气十二五规划》提出了在 2015 年页岩气产量达到 65 亿立方米的目标，力争 2020 年的产量达到 600-1000 亿立方米。

在规划出台的几个月前，中国国务院批准了国土资源部的申请，决定将页岩气与常规油气开发区别对待，从而消除造成目前页岩资源勘探权仅掌握在中国几家大型国有油气企业手中的法律障碍。随着国务院 2011 年 12 月正式批准了这项申请，以及《页岩气开发十二五规划》于 2012 年 3 月出台，各方对页岩气行业的期望值亦水涨船高。

在未来几年中，中国计划继续探索与尝试页岩气储量开发领域的新技术，有可能会出现美国所经历的页岩气产量激增的情况。如果中国能够在页岩气投入商业化量产之前，抓住时机吸取美国页岩气开采的经验和教训，加强中国页岩气行业的监督管理和行业规范将有效减轻页岩气开发所带来的负面的环境影响。

本报告探讨了中美之间就页岩气环境友好开发开展国际合作的机遇；其中，着重强调双方技术的转让以及运营经验的分享。报告列出一系列中国应当考虑的重要管理措施，以期建立一套健全完善的页岩气开发利用的管理框架。

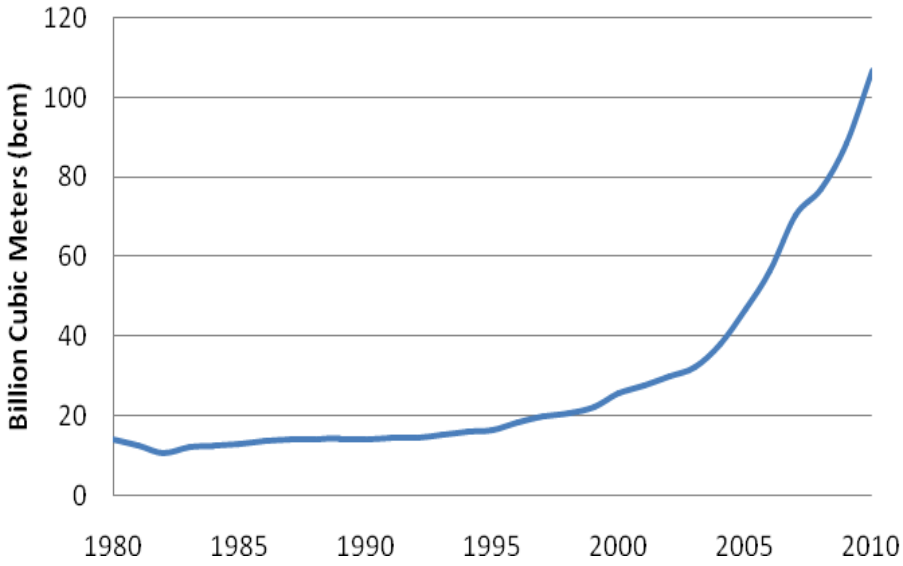
本报告的第一部分就中国天然气生产和消费趋势，以及刺激天然气生产的诸多要素进行简要的综述。**第二部分**根据美国的经验就页岩气的环境影响展开讨论。**第三部分**研究国际合作的发展趋势，并重点介绍中美两国私营部门合作的情况。该部分还分析了今后拓展该领域国际合作的机遇。**第四部分**列举在生产过程中降低环境影响的实践措施和技术方法。

I. 中国天然气和页岩气开发的基本状况

A. 中国快速发展的燃料

中国的天然气消费在过去十年中不断飙升，主要原因包括清洁燃料需求的增长以及一些天然气管道项目和液化天然气接收站的竣工。尽管天然气目前在中国能源结构中的比重仅为 4%[1]，中国政府计划在 2015 年前将天然气在一次能源消费中的比重提升到 8%[2]。根据国际能源署的预测，中国在 2015 年前将取代日本成为亚太地区最大的天然气消费国[3]。

图 1: 中国天然气消费量 1980-2010 年 （单位：十亿立方米）

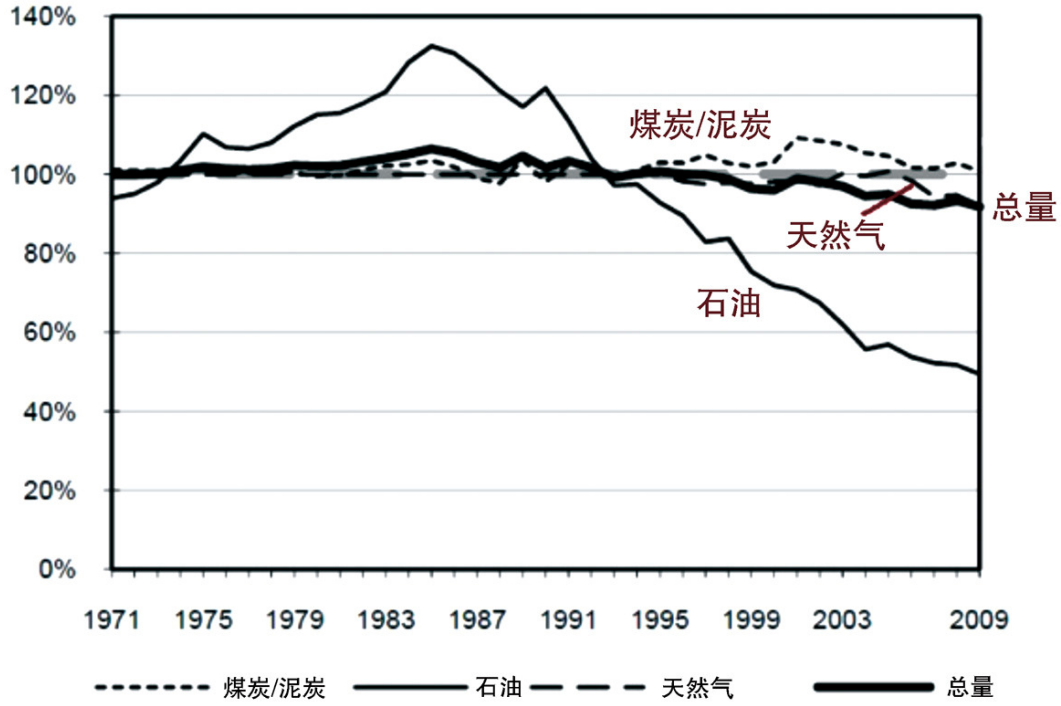


来源: 美国能源情报署

中国决心在 2020 年前将碳强度（单位 GDP 的二氧化碳排放量）在 2005 年的基础上降低 40-45%，这是中国大力推动天然气发展的主要动因。天然气燃烧所产生的温室气体污染仅为煤炭和石油等其他化石燃料的一半左右。中国在十二五计划中提出了降低碳强度的中期目标，即在 2015 年前将碳强度在 2010 年的水平上降低 17%。

中国政府和产业界正在对国内尚未开发的大规模天然气储量进行评估，因为这些储量有潜力在中长期内平抑天然气价格。例如，将液化天然气从澳大利亚船运到上海的成本可能是本土天然气资源开发利用成本的两倍。[4]与此同时，对于能源安全的关注度也在不断提高，因为能源供应难以跟上民用、化工以及电力部门旺盛的需求（见图 2）[5]。国内供需的缺口预计今后还会进一步拉大[6]。

图 2: 中国的一次能源自给率 (1971-2009 年)



来源: 国际能源署，非经合组织国家的能源平衡状况.
备注: 自给率是产量与一次能源总供应量的比率。

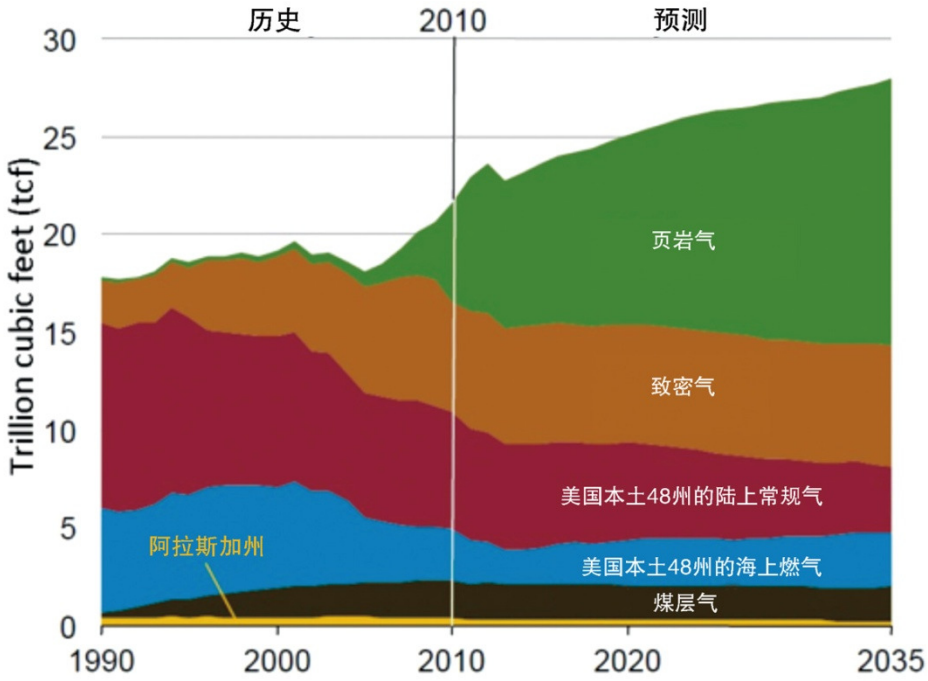
B. 页岩气：潜在的胜负手

美国从 20 世纪中叶就开始进行页岩气开采活动，但直到最近十年，页岩气生产才随着技术进步而开始具备商业可行性（见图 3）[7]。页岩气在美国被普遍称为“胜负手”，目前它也是发展最快的一种能源类型。随着页岩气产量的提高，美国在 2009 和 2010 年天然气产量超过俄罗斯，一举成为世界最大的天然气生产国[8]。

根据中国政府为页岩气行业所制定的五年规划，即《页岩气发展规划（2011-2015 年）》，中国国土资源部所估测的中国页岩气储量为 25 万亿立方米[9]。2011 年，美国能源情报署 (EIA) 所估测的中国页岩气储量为 36 万亿立方米，比中国国土资源部的估测量高出约 50%（见表 1）[10]。这两种估测量都包括了很多限定条件和假设条件。专家们也认为，目前页岩气储量评估并没有一种普遍接受的方法论。然而，这两种估测方法均一致认定，中国的页岩气资源储量很有可能是世界最高的。

对于页岩气资源充裕性的假定大幅度修改了天然气未来产量的预测。中国政府已经确定目标，在 2015 年每年开发 65 亿立方米的页岩气，到 2020 年前增至每年开发 600-1000 亿立方米[11]。中石油公司是中国页岩气资源开发的主要投资企业，周吉平总裁认为页岩气到 2020 年可以满足 5-10%的中国天然气需求[12]。

图 3: 美国干气的年产量 (万亿立方英尺)



来源: 美国能源情报署，《能源年度展望 2012》

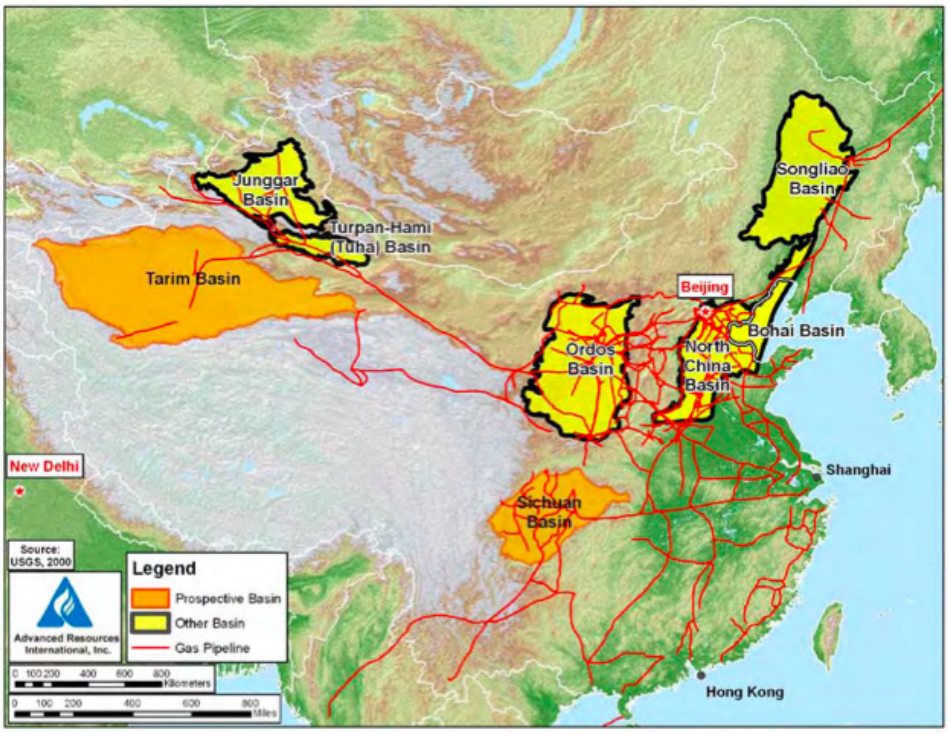
表 1: 美国和中国的页岩气实际以及预测资源和产量 (十亿立方米)

	美国 [a,b]	中国
页岩气估测总可开采储量	13,600	25,000[e]-36,000[d]
2010 年页岩气实际产量	92.9	0[e]
2015 年页岩气预测年产量	204	6.5[e]
2020 年页岩气预测年产量	275	60-100[e]
2035 年页岩气预测年产量	347	--
2010 年天然气产量	*595*	*94[c]*
2010 年天然气消费量	*682*	*107[c]*

来源: 美国能源情报署 [a] 年度能源展望 2011;
[b] 年度能源展望 2012 预览概要; [c] 中国国别概要； [d] 世界页岩气资源
[e] 中国国家能源局,页岩气开发规划 (2011-2015 年)

纵观中国的大型页岩盆地，目前页岩气勘探活动几乎全在四川盆地展开，这是以下因素所综合作用的结果：技术可行性、四川盆地拥有中国最密集的管网系统，以及四川盆地能提供水力压裂作业所需的水源供应。其他的页岩气储藏主要位于塔里木盆地（中国西北部）、鄂尔多斯盆地（华北）和松辽盆地（中国东北部），具体位置参见图 4。尽管塔里木盆地和鄂尔多斯盆地富含页岩气资源，它们却都受制于中国西气东输管道运能的不足。从 2011 年到 2015 年，这两个盆地内的作业活动将主要为地质研究，但是中国预测这两个盆地的页岩气产量在十三五计划期间（2015-2020 年）会大幅增加。

图 4: 中国的主要页岩气盆地



来源: 美国能源情报署[13]

II. 页岩气开发的环境影响: 美国的经验

水平井钻井和水力压裂法（或称压裂法）是页岩气开采的核心技术。在美国，超过一半的天然气都是通过压裂法开采获得的（包括页岩气、致密气和煤层气），而该方法的普及度也随着页岩气在天然气所占比重不断上升而迅速增加。在此流程中，化学物质夹杂着大量水（该混合体称为“压裂液体”）以及泥沙，被高压注入地下井，从而压裂邻近的岩石构造扩张裂口，使天然气能够流入井中以便收集。这些活动可能会对环境和人类健康产生负面影响，其中包括水体污染，空气污染和土地破坏等[14]。由于这些不确定因素，美国纽约州和特拉华盆地区在这些影响被进一步研究前叫停了在该地区的水力压裂项目[15]。在页岩气开发的每个阶段—勘探、生产、加工和配送—都必须采用适当的技术和保障措施以保护珍贵的水和空气资源，并且确保居民的健康。

A. 对土地覆盖的影响

中国的页岩气开发规划将土地使用列为首要关注的环境问题。除了气井施工需要用地外，页岩气开发还需要使用更多土地来修建道路、水槽以及输气设施[16]。例如，宾夕法尼亚州林区的钻井活动就引发了对土地破碎和生物多样性减少的忧虑。就中国而言，可能进行大规模钻井活动的四川盆地是人口稠密地区，页岩气开发地需要将与农业、工业和居民用地展开竞争。

B. 对水资源的影响

水源的取用

在美国，根据页岩构造的地质特性，一次水力压裂作业可能就需要一千多万升的水耗。这将限制水资源匮乏地区页岩气的开发以及当地的水资源供应，正如德克萨斯州鹰滩页岩构造区遭遇多年大旱所经历的尴尬[17]。此外，页岩气开采绝对量会对当地水文以及野生动物栖息地产生重大影响，因为它关系到是否能够保持对于当地水流和湖泊生态而言至关重要的季节性径流变化[18]。

地表水体污染

如果管理不当，水力压裂开采所产生的大量废水会威胁到地表及地下水体水质。在注入水力压裂液体并且释放压力后，10-70%的原注液体量，[19]或大约 1-6 万桶（160-960 万升）液体会返回地表，俗称“返排废水”。有些气井也会产生“生产废水”—指在地下地层自然存在，与油和天然气共同开采出来的水，从长期来看，每百万立方英尺的燃气产量通常会伴随 200-1000 加仑的生产废水（每百万立方米的燃气产量会伴随 3-13 万升的生产废水）。尽管每个页岩构造不同，一口页岩气气井的生命周期最长可以达到 40 年，此单井的生产废水总量可以达到数百万升[20]。

这两种类型的废水都含有用于水力压裂生产流程的各种潜在的危害化学物质，包括用于减小摩擦的有毒化学润滑剂，用于抗腐蚀和防细菌滋生的添加剂，以及自然生成的污染物，如碳氢化合物、重金属、盐份以及自然生成的放射性物质（NORM）[21]。如果废水排放前的处理工作不到位，地表与地下水就会受到污染；化学物质会渗透到浅层土壤，然后进入含水层；水力压裂液体和废水在储存和往返于钻井现场的运输过程中会出现意外的地表溢漏[22]。

地下水污染

来自气井的甲烷、重金属、放射性物质，压裂液体和其他污染物可能会通过多种潜在途径流出，从而污染地下水资源[23]。劣质套管和水泥灌注都可能成为污染物流出的通道[24]。在完井作业（有时也叫“井筒清理”）过程中，安装永久加工设备之前，刺激性的材料和其他泥石碎片会向上流出[25]。此外，液体通过自然断层、裂隙、透水岩层、附近不恰当的弃井和完成井向上迁移、以及向地下蓄水层内或者上方的直接灌注都可能对地下水造成威胁[26]。

C. 对空气质量和气候变化的影响

当地空气质量

天然气行业是甲烷排放、挥发性有机化合物（VOCs）以及有害空气污染物排放的主要来源。天然气生产过程的不同阶段—井口，储罐以及其他生产设备—都会释放挥发性有机化合物并导致地面臭氧的产生。长期接触挥发性有机化合物会导致皮肤不适、头痛以及生殖系统紊乱[27]。

中国的页岩构造还含有达到有害浓度水平（1%或更多）的硫化氢（H_2S）。硫化氢是一种可燃的毒性气体。四川盆地的威远页岩气区块所含硫化氢浓度在 0.8% 到 1.4%之间，而川东北区块所含硫化氢浓度高达 15%[28]。此外，硫化氢的职业性接触，以及居住在钻井现场附近的学生以及居民对硫化氢的接触也引发了广泛关注[29]。

气候变化

燃气发电产生的碳排放远低于燃煤发电，但其产生的未燃烧甲烷—不仅是造成当地空气污染的主要罪魁祸首—也是一种高强度温室气体，其温室效应影响是二氧化碳的 25 倍[30]。在油气生产过程中，散性甲烷排放最常泄露于，甚至是故意排放于井口，管道和阀门。在美国，37%的甲烷排放总量来自油气行业。该行业每年释放的甲烷量达到 1200 万吨，其中 80%为不必要的排放，造成的后果相当于 2 亿吨以上的二氧化碳排放[31]。

非常规天然气生产与传统天然气生产相比，可能因更大量的甲烷泄露的隐患而广受关注[32]。对此尝试进行量化的各种研究受制于有效数据的匮乏[33]。 尽管有些排放值高低的不确定性，根据已有信息，美国环保署在 2011 年修正了对 2009 年非常规气井完井工作所产生的甲烷排放估测值，在原来数字基础上提高了两倍以上[34]。

本文第四部分对于减少页岩气开发造成的环境影响可用的一些技术及工艺解决方案做了进一步的阐述。

III. 中国页岩气开发领域所开展的国际合作

中国还处在开发页岩气资源的萌芽阶段。在目睹美国页岩气行业的高速发展以后，中国政府和企业正积极寻求开展国际合作，以便获得发展国内页岩气行业所需的技术和知识。2009 年 11 月，中国国家能源局（NEA）和美国能源情报署(EIA)共同推出了旨在推动中国页岩开发的“美中页岩气资源计划”，其重点放在资源评估和技术交流上[35]。自签署该协议后，美国地质调查局（USGS）和中国政府在中国合作开展了多次页岩气资源评估，包括在四川和最近又在中国东北地区开展了该项评估[36]。两国研究机构也积极地推动中美之间的技术转让[37]。

中美页岩气领域最早开展的一次合作可以追溯到 2007 年 10 月。当时中国石油天然气总公司（CNPC，也称为中石油）与位于休斯敦的新田勘探公司开展了一项联合研究，对四川盆地威远区块的开发潜力进行了分析[38]。过了不到 4 年的时间，中石油于 2011 年 4 月成功地在威远区块钻了第一口页岩气水平气井。

此后，中石油与多家国际油气企业开展了合作。2009 年 11 月，中石油与荷兰皇家壳牌公司签署协议，共同对四川盆地富顺-永川区块页岩气储量进行评估[39]。壳牌公司是在中国新兴页岩气行业内最为活跃的西方油气企业之一。到 2011 年初，壳牌已经开始在该区域打勘探井[40]，并于 2012 年 3 月 20 日宣布与中国石油天然气总公司签署页岩气生产分成合同，这也是中国签署的第一份此类合同[41]。

除了在四川盆地开展活动外，中国石油天然气总公司近期还批准了其子公司，吐哈油田公司与壳牌和赫斯公司在新疆联合开发区块的申请。根据该协议，外国企业将承担

勘探期间的全部成本和风险，而所有参与方将根据投资比例进行投资并分享产量[42]。除了在中国开展合作外，中石油还于 2012 年 2 月购买了壳牌公司加拿大不列颠哥伦比亚省 Groundbirch 项目 20%的股份[43]。建立这些合作伙伴关系的主要目的就是引进先进技术，加强项目管理。中石油公司首席执行官周吉平指出，中国需要进一步在钻井工艺和供水要求进行研究，应该超越美国目前的技术水平[44]。

中国第二大国有油气企业，中石化，也参与国际合作。根据一项报告显示，该公司曾与 BP 公司商讨在贵州省内一块面积为 2000 平方公里的页岩气区块以及江苏省一块内面积为 1000 平方公里的区块开展勘探工作[45]。埃克森美孚公司与中石化在 2011 年签署了一项协议，准备在面积为 3644 平方公里的四川五指山区域进行联合勘察[46]。雪佛龙公司在近期向美国证券交易委员会所提交的一份文件中透露，该公司于 2011 年 4 月签署了一项联合研究协议，准备在黔南盆地开展页岩气勘探工作。雪佛龙公司已于当年 2011 年 7 月份开始地震探测作业[47]。尽管雪佛龙公司未透露其中方伙伴，但是据报道，中方企业是中石化的一家子公司，在第一轮招标拍卖中获得了该区块的勘探权[48]。康菲公司与中石化在数个焦油砂和液化天然气项目上开展过合作，该公司据称也在和中石化讨论页岩气勘探合作[49]。

此外，中石化一直在北美地区大刀阔斧地进行非常规能源的海外收购，目标包括页岩气、页岩油和致密油项目。2011 年 10 月，中石化斥资 21 亿美元收购了加拿大日光能源公司[50]。三个月后，中石化宣布支付给戴文能源公司 25 亿美元，以购买戴文公司在路易斯安娜、俄亥俄、密歇根、俄克拉荷马以及怀俄明州五个页岩区块的 1/3 股份[51]。

中国海洋石油总公司（CNOOC）在安徽省获得了其首个国内勘探权，并于 2011 年底开始地震探测。尽管其在国内的作业进度远落后于两个竞争对手，中海油却是首家通过海外并购获得相关技术的中国企业。迄今为止，它已经与切萨皮克能源公司完成了两笔交易，斥资 23 亿美元获得了该公司在德克萨斯、怀俄明、以及科罗拉多州页岩油气区块的少数股权[52]。

其他国有能源和电力企业也积极投入到中国页岩气开发大潮。2012 年 2 月，中国最大的煤炭生产商神华集团的全资子公司，神华地质勘探公司，与挪威国家石油公司签署了一份关于页岩气勘探合作的意向书[53]。自 2011 年 12 月以来，包括中国华能集团和中国华电集团公司在内的电力企业与湖南省政府和重庆市政府等地方政府签署了战略合作协议[54]。中国核工业集团公司也在和湖南省能源局洽谈合作事宜[55]。这些作业活动利益相关方可能会寻求开展国际合作，以获得专业知识和先进的勘探实践做法[56]。

中国的页岩气开发浪潮也吸引了一些来自石油服务行业的国际企业。斯伦贝谢公司于 2012 年 1 月与中国华电公司签署了一份关于页岩气开发的战略合作协议[57]。中国的石油服务企业也寻求在美国以外开展国际合作，以获得相关技术。烟台杰瑞石油服务集团参与了威远区块第一口水平井的钻井作业。该公司于 2011 年和一家名为美国径向钻井有限公司的美国企业成立了合资公司，并于 2012 年 2 月宣布拨款 3000 万美元用于开发加拿大的气田[58]。

IV. 环境友好的页岩气生产中，降低环境影响的实践和技术选例

随着中美两国在页岩气开发领域探索新的合作，在提高效率，通过利用废弃产品创造额外收入，以及减轻页岩气勘探和开采所产生的环境影响等方面会不断涌现很多新的合作机遇。各家企业可以在生产流程中贯彻改进现有的做法和技术，从而确保在开发页岩气资源的同时尽可能减少对周边环境的影响。

2011 年 8 月和 11 月，在美国能源部的支持下，能源部长顾问委员会下属的页岩气委员会发布报告，就页岩气开发中最大程度降低环境影响的实践做法提出建议[59]。在美国国会的要求下，美国环保署正在开展一个多年研究，主要研究水力压裂开采与饮用水之间的关系，预计最终报告草稿于 2014 年完成[60]。

此外，美国自然资源保护委员会（NRDC）就页岩气开发的环境影响和最佳实践进行研究，并完成两份报告，报告内容侧重于废水管理和甲烷排放控制技术[61]。表 2 列出了这些报告中所提出的建议，并提供了美国相关州和联邦政府的监管做法，以供参考。NRDC 目前正准备对与天然气生产有关的六个地区的最佳实践和州立法规进行分析，预计于 2012 年秋季完成。

美国环保署近期根据“清洁空气法”出台的联邦标准，将大大加强对天然气生产（包括水力压裂开采）中对污染空气的控制[62]。尤其是，这些法规将对挥发性有机化合物、甲烷和诸如苯的空气污染物提出限制性要求。然而，这些标准对新技术替换提出了有限的要求，并未要求对现有设施进行设备改装。对于包括绿色完井在内的节省成本的减污技术的应用要求到 2015 年才开始生效[63]。

表 2: 美国页岩气环境友好开发的部分措施选列[64]

加粗的措施将在第四部分进行更具体的阐释

较高的水足迹	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
利用来自其他工业作业的循环回收水，例如酸性矿排水	**宾夕法尼亚州：**鼓励水力压裂法使用酸性矿排水。 **参见文框：“美国的经验：宾夕法尼亚州”**
废水处理与处置	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
参见文框：“页岩气废水的管理方案”	
循环利用水力压裂法生产废水	**宾夕法尼亚州:** 很多在马塞勒斯区块作业的企业对水力压裂废水都进行循环回收。 **德克萨斯州：**在鹰滩区块作业需要遵循此要求。 **参见文框：“美国的经验：返排废水和生产废水循环利用”**
加强对地下污水灌注的规定	
在饮用水源所在区域禁止进行污水处置	
对钻井现场附近的水质进行持续的检测	**新墨西哥州：**该州的一些郡要求对处置井进行监控，并且/或者打下监控井[65]。
制定气井施工的最佳实践做法（套管、水泥浇筑及压力管理）	
在油气行业应用雨水排放许可要求	**科罗拉多州:** 对于涉及一英亩以上土地的施工活动要求出具雨水排放许可证。 **蒙大拿州:** 油气生产所有阶段都要求出具雨水排放许可证[66]。
空气污染与气候变化	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
在生产链的各个环节确定甲烷排放测量以及报告体系.	美国环保署将会从 2012 年起（根据 2011 年数据），要求天然气行业上报每年甲烷排放情况。所有重大甲烷排放环节都将被要求上报排放数据。
通过实施减少甲烷排放的十大盈利性技术，如绿色完井与设备更替	**德克萨斯州：**巴尼特页岩区块使用了绿色完井技术[67]。 **科罗拉多州[68]和怀俄明州[69]:** 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:** 新污染源行为标准将开始把甲烷排放纳入标准，提倡使用绿色完井等经济有效的技术。 **完整列表请参见：“解决*甲烷排放的十大盈利性技术*”**
在天然气钻探前收集空气质量的基线数据	该行业已经在鹰滩和马塞勒斯页岩气区块自愿采取此类行动[70]。

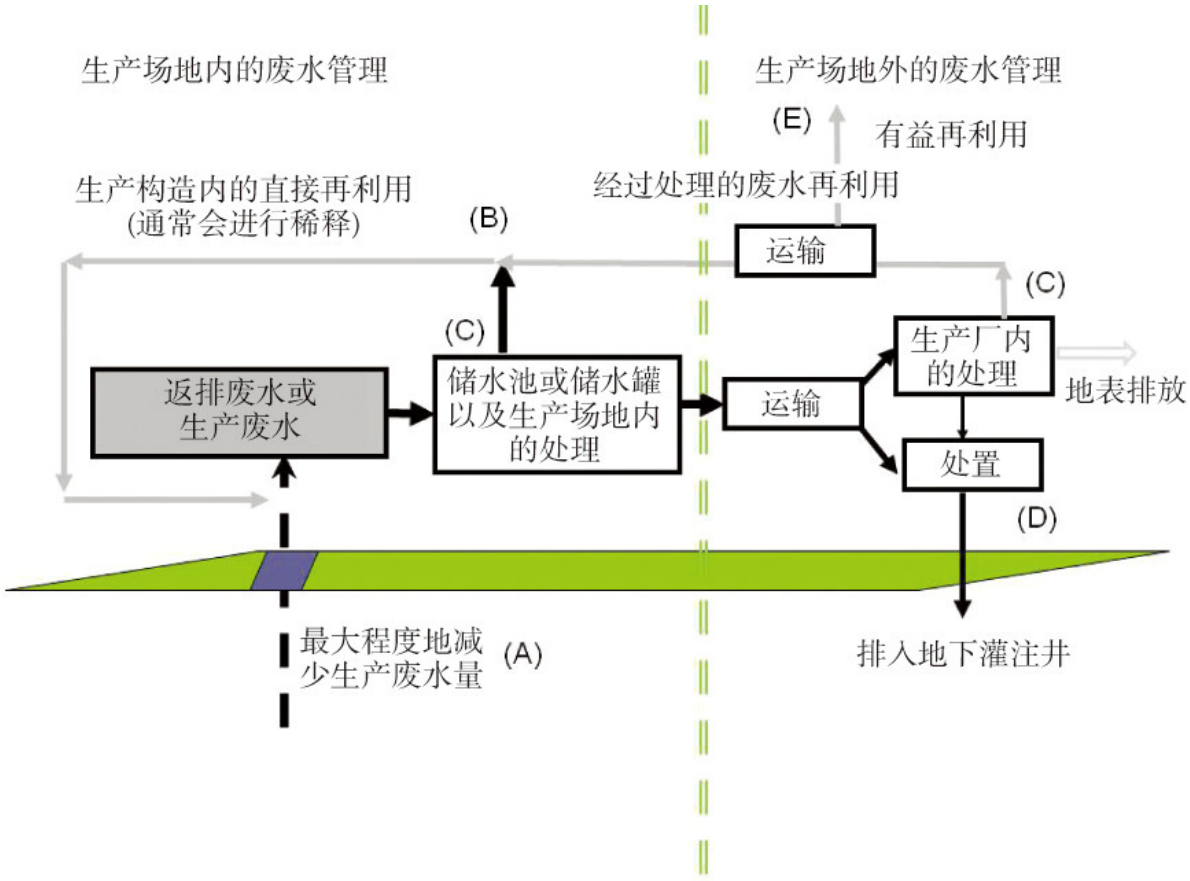
表 2: 美国页岩气环境友好开发的部分措施选列（续）

空气污染与气候变化	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
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的新污染源行为标准/ 有害空气污染物国家排放标准 **科罗拉多州:** 对完井工作的甲烷排放以及生产废水存储设备的挥发性有机化合物排放进行监管。
研究页岩气生产全生命周期的温室气体排放	几所大学以及美国环保署正在开展同行审查研究，但需要进行进一步的研究工作。
土地使用影响	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
科学方法测定重要景观，栖息地与生态走廊带	
在施工前与施工过程中监测评估累积区域，社区和土地利用影响	
水力压裂液体	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
在钻井之前收集水与空气的基线数据	**参见文框：“美国的经验：科罗拉多州”**
公开披露水力压裂液体的化学成分	蒙大拿州、怀俄明州、德克萨斯州、德克萨斯州、科罗拉多州、宾夕法尼亚州和阿肯色州均要求该项信息的公开 有些州要求化学药剂通过如 FracFocus（www.fracfocus.org）等方式电子化披露。但由于“绝大多数水力压裂法处理常用化学品都不会被公开”，这种方法远远不够有效[71]。 **参见文框：“美国的经验：美国各州水力压裂液体信息披露的要求”**
研究水力压裂液体所含有毒化学物质的替代品	行业正在牵头做这项工作。
减少气田设备和水力压裂液体中柴油燃料的使用。用天然气或电力替代油气田设备所用的柴油	**美国环保署**根据安全饮用水法对页岩气生产中的柴油使用进行监管。
建立问责制	**可借鉴的美国强制与自愿管理举措**
水供应被破坏时进行问责并补偿当地社区	**北达科他和宾夕法尼亚州:** 企业必须通过更换或恢复水源供应来对所破坏的水源进行赔偿。
在各州/省层面聘用更多的巡视员和监管人员	**宾夕法尼亚州:** 油气企业缴纳聘请巡视员的费用。
改进关于页岩气作业的公共信息	美国能源部要求建立国家数据库以统一记录公共信息[72]。
在各州监管机构之间创建经验交流平台	各州油气环境监管条例审查机制（STRONGER)和地下水保护委员会 (GWPC) 是现有的平台，但需要更多的联邦政府资金来获得更大的独立性。

鉴于联邦法规在油气生产方面的缺失，环境保护和公众健康方面的法规标准主要存在于州层面。在某些情况下，联邦条例还专门对油气生产的水力压裂和其他方面给予豁免待遇。例如，对于油、天然气或地热开采目的而进行的水、化学物质以及压裂用砂地下灌注得到了《安全饮用水法》的豁免待遇，除非水力压裂液体中含有柴油燃料[73]。因此，联邦政府缺乏必要的行政管辖权去全面监管地下灌注流程，而环保组织也在积极努力去废除这种豁免待遇。目前，监管责任往往落到各州身上，尽管很多州政府都在积极推动尽量减少环境代价的页岩气开发行为中处于领先地位，各州零散的条例却不足以确保页岩气的安全开采。联邦、州和国际监管机构应该要求统一推广最佳实践和技术，包括已经被州政府和行业领先者所采用的部分。

页岩气废水的管理方案

对于页岩气生产所产生的废水有五种基本的管理方案，大致可以按照生产现场内处理流程及生产现场外处理流程进行划分。在生产现场内，作业方可以最大程度地减少生产废水的生成，在钻井作业中将废水循环回收和再利用，并开展生产现场内的废水处理工作。在生产现场外，作业方可以对废水进行处理，妥善处置，或者将其进行运输，进行作业外的有益再利用。生产现场内的方案通常针对“返排”废水，而生产现场外的方案是生产废水管理的主要方法。



来源: 美国自然资源保护委员会, “水力压裂开采来势汹汹: 亟需制定新规定来保护我们的健康和环境免受废水污染的危害” (2012 年).

中国的页岩气十二五发展规划将大幅度提升页岩气勘探的投资额规定，从而保持市场准入的高门槛。企业被要求每年每平方米至少投资三万元（4747 美元），这是原油勘探最低投资额要求的三倍[74]。此外，2012 年 5 月 17 日推出的第二次页岩气招标要求投标企业拥有 3 亿元（4740 万美元）以上的注册资本[75]。这将使中国的市场动态与美国大相径庭，因为美国长期以来中小企业是页岩气勘探和开发的主要投资者。较高的市场准入门槛可能会影响到中国实现吸引多元化投资以及引入竞争的目标，但这种做法有可能降低环境风险。在中国的很多行业中，中小企业更难以监管，而且采纳最佳实践做法的财力和技术能力较低。

下文更为详细地分析了美国为降低页岩气开发的环境影响所采用的一些实践和技术，这些都将与中国未来页岩气开发息息相关。

A. 影响: 水力压裂的较高水足迹

循环利用来自其他工业来源的水源，例如酸性矿排水

鉴于四川的居民和工业用水需求较高，而新疆水资源匮乏，中国的水力压裂作业非常有必要利用循环回收水。利用循环回收的矿排水可能是一个潜在的选择方案。四川、陕西和新疆都是中国的产煤大省，对采矿排水的循环利用有助于将工业生态实践做法纳入水力压裂作业之中，并且推动建立能源生产的闭环体系。

如果采纳这种做法，就应该建立一套严格的监控系统，以确保返排废水能得到必要的处置。创建矿山作业废水市场可以激励企业在生产现场收集和处理这种矿排废水（中和，去除重金属），有助于降低水污染。然而，只有地下水管理条例得到加强，且中国积累足够的水力压裂作业减污的丰富经验，从而确保处理这些工业废水所产生的重金属废物得到适当的处置之后，这种做法才应该被采纳。

美国的经验: 宾夕法尼亚州

宾夕尼亚亚州是采煤区，每天大约 3 亿加仑的酸性矿排水被排放到地表水体，影响波及 5000 英里的水流。2011 年 11 月，宾夕法尼亚州环保局发布声明，鼓励油气行业将循环回收的矿排水用于水力压裂作业[76]。该声明的早期版本还包括要求在可以使用矿排水的地区抽取蓄水层淡水前，必须优先考虑利用酸性矿排水，或者资助当地开展蓄水层恢复行动[77]。宾夕尼亚亚州环保局正在制定进一步的指南，就矿排水的储存、使用的法律责任以及页岩气作业者与矿排水源配对等问题做出规定。

B. 影响: 废水处置

废水的处理和循环回收

美国页岩气革命引发了水处理和循环利用产业的不断创新，尤其是将“返排废水”和生产废水进行处理后将其再利用于水力压裂作业的技术（参见下文中“美国经验：返排废水和生产废水循环利用”章节）。废水还可以在经过处理后出售用于其他用途，例如未铺砌道路的灰尘控制[78]。返排废水—主要成分为原始水力压裂液体—在给定气井进行再压裂时更容易在施工现场进行再利用，而且所需处理也比生产废水要少[79]。

生产废水再利用所面临的最大挑战是其化学成分，主要含有大量的全溶解固体物（盐份）、微生物、油脂以及自然生成的发射性物质（NORM）。各气井的具体成分千差万别，这就意味着没有任何一种水处理技术可以包打天下。然而，一种典型的水处理系统通常包括以下处理阶段：（1）去除悬浮固体物；（2）去除油脂和溶解有机物；以及（3）脱盐。每个步骤都会形成残留物，必须在生产现场内外进行妥善处置[80]。

美国的经验: 返排废水和生产废水的循环利用

在美国东部，尤其是宾夕法尼亚地区，返排废水和生产废水的循环利用必不可少，因为地下灌注的方案有限。面对不多的废水处置可选方案，包括在马萨勒斯页岩区块作业的 HydroRecovery 公司和在巴尼特页岩区块作业的 Ecosphere 能源服务公司等企业生产出用于处理生产废水的专利方法。这些技术现在还被应用到其他地方。Ecosphere 能源服务公司正计划在德克萨斯州鹰滩页岩区块建立另一座处理设施，因为当地近年饱受大旱之苦，急需在水力压裂作业中采用废水循环利用技术，以取代以前在地下灌注井内处置废水的做法[81]。返排废水和生产废水的循环利用有助于降低干旱期间和自然干旱地区的水资源短缺压力。

加强地下废水灌注规章监管

美国地下灌注控制 (UIC)项目对进行液体地下储存或处置的灌注井施工、运营和关闭进行监管[82]。《安全饮用水法》包含了适用于美国地下灌注控制项目的相关条文规定，根据地下井的功能和运营特点进行相关管理[83]，将地下井分为五种类型。一类井比二类井实行更严格的管制，美国环保署视为“危险物”的废弃物必须在一类井中处置，以防止地震及污染物向饮用水源迁移。由于联邦豁免，石油和天然气生产的废弃物可以被弃置在二类井中，即使从另外的方面讲，这些废弃物也属于“危险物”。这项对于石油和天然气废弃物的豁免政策于 1988 年开始实施，那时美国的页岩气还没有被大量开采，如今由于水利压裂产生的废物与之前的情况不同，而且可能更加危险，所以这项豁免政策应该被淘汰。

尽管中国从 20 世纪 70 年代就开始进行灌注井实验，但目前却仍未建立确保将废水灌注到地下井而不会威胁到地下水的监管框架[84]。应该建立相关规定，以确保将废水灌注到地下井时（包括水力压裂产生的有害废水注入）不会威胁到当地供水系统。

C. 影响: 天然气钻探所导致的空气污染和气候变化

建立甲烷排放测量和报告体系

美国环保署通过其年度温室气体清单(Greenhouse Gas Inventory)，报告天然气和液体石油系统的甲烷排放量，从而确定哪些地区的甲烷排放可以被更好的控制。2011 年，美国环保署估计甲烷泄露已达到 6230 亿立方英尺(176 亿立方米)，虽然他们指出由于非常规完井和修井的增多，这些数字存在很大的不确定性。例如，美国环保署天然气 STAR 计划的合作伙伴发现，完井作业过程中的气体回收是之前预估的 1000 倍以上。泄露监测与维修技术（以下介绍的十种技术之一）也可以用于发现无意间泄露出的甲烷。

通过建立一套完善的甲烷排放测量与报告系统，中国的环保部门和石油天然气工业能够更好地在页岩气生产流程各个阶段监控排放情况。该体系能够帮助各省跟踪年度总排放量，以及确定生产链上主要污染源。地方法规可以具体地设定允许排放的最高限值，以促进该监控报告流程的顺利运行。

凭借十大盈利性技术来减少甲烷排放量

美国自然资源保护委员会近期的一份报告表明，在天然气钻井和运输作业中运用十项技术可以将甲烷排放量减少 80%以上（参见下文中“石油天然气工业解决甲烷排放的十大盈利性技术”）[85]。这些技术还带来其他空气质量效益。例如，根据美国环保署的估测，绿色完井技术可以在完井阶段将挥发性有机化合物排放减少 95%[86]。定期的巡视和更新有助于确保设备保持最佳状态，并且最大程度地捕获甲烷气体并在市场上出售以实现盈利的目标[87]。美国自然资源保护委员会的报告还指出，通过销售所回收的甲烷，这些技术的实施成本可以在技术实施后三年内得到回收，对于很多技术而言，回收期甚至会更短。

D. 影响: 天然气开采对公共健康的危害

钻井前收集基线数据

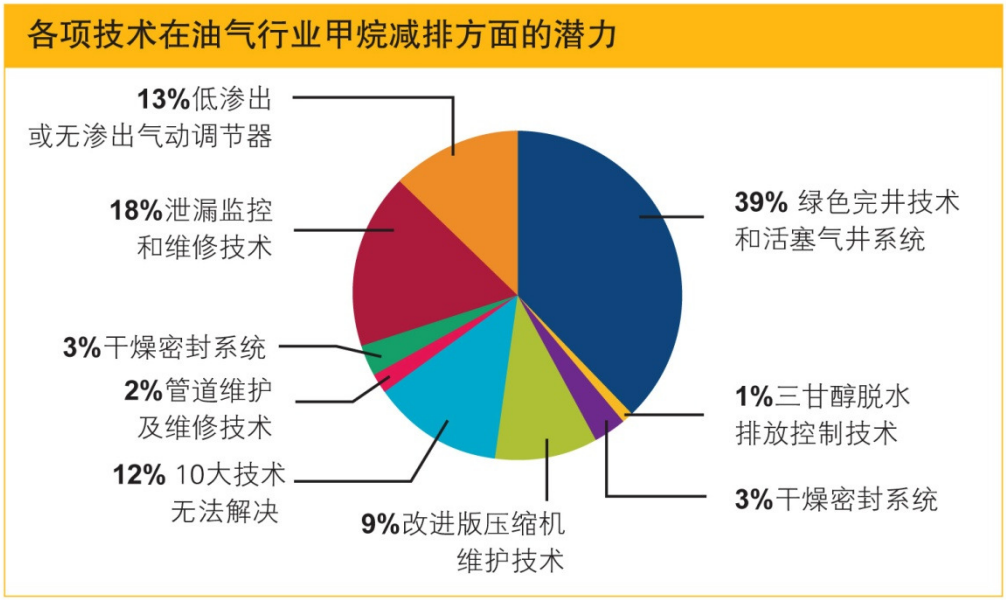
美国能源部长顾问委员会下属的页岩气委员会发布了一份 90 天报告，报告强调在天然气作业前收集土壤和水质基线数据的重要性[88]。 这将帮助监管者更好地计量天然气开采对水质的任何影响，并且，如在后续数据收集中发现污染将由企业承担相应责任。中国的十二五计划强调需要加强数据评估，这可以理解为钻井开始后要进行有效的环境恢复。企业也应该检测与天然气生产相关的甲烷和诸如挥发性有机化合物等污染物。

美国的经验: 科罗拉多州

科罗拉多州的条例目前并未要求对石油和天然气钻井进行普遍的地下水基线测试。然而，他们的确要求在进行排水的区域收集地表水基线数据，以保护供水源[89]，而且该州还要求在全州范围内某些天然气生产区域进行测试[90]。此外，由行业牵头的科罗拉多油气协会推出了一项地下水基线水质自愿取样项目。钻井作业前后在个体气井现场收集数据，并将结果递交到科罗拉多油气保护委员会的电子数据库，然后在线公开发布[91]。

石油天然气工业解决甲烷排放的十大盈利性技术

1. 在开始生产之前用**绿色完井技术**来捕获油气井排放物
2. **活塞气举系统** 或其他气井除液方法来逐步减少气井排放
3. **三甘醇脱水排放控制技术**来捕获来自脱水剂的排放
4. **干燥剂脱水系统**来捕获来自脱水剂的排放
5. 干**燥密封系统**来降低来自离心分离压缩机的排放
6. **改进版压缩机维护技术**来降低来自往复式压缩机的排放
7. **低渗出或无渗出气动调节器用**来降低来自燃气控制设备的排放
8. **管道维护及维修技术**用来降低来自管道的排放
9. **蒸汽回收装置**用来降低来自储罐的排放
10. **泄漏监控和维修技术**用来控制来自阀门、法兰、密封设备、接头和其他设备的易散性排放



来源: 美国自然资源保护委员会, “流逝的利润：美国的油气行业可以通过防止浪费甲烷来减少污染，保护资源，并且获取利润” (2012 年).

向主管机构披露水力压裂液体成分

在美国，一半以上进行着水力压裂作业的州都没有要求公开披露水力压裂液体的化学成分，这使得管理风险以及采取所需措施来确保公共健康免受页岩气开发所导致的污染事故影响变得比较困难。应该要求全面披露水力压裂液体的化学成分，以便负责监管地下水和地表水源质量的政府机构，例如环保部，水资源部以及国土资源部，可以开展适当的管理风险。

美国的经验: 美国各州水力压裂液体信息披露的要求

在美国，有 14 个州要求在一定程度上公开披露水力压裂液体的化学成分。有 7 个州要求报告具体的化学组成，其中只有两个州(蒙大拿州和怀俄明州)要求报告实际使用的化学品浓度。很多州条例都允许给予被视为“贸易机密”的化学成分信息的披露豁免待遇。关于各州信息披露要求的完整分析，参见“简介：各州水力压裂信息披露规则和执法比较”(NRDC, 2012)。

这些豁免待遇的具体实施各不相同。

- ***怀俄明州*** 曾经是美国第一个要求披露所有水力压裂液体化学成分的州，无论是有害或无害成分。企业可对所用化学成分提出商业秘密保护，但前提是必须获得权威机构的核准[92]。
- ***德克萨斯州*** 要求企业向一家在线数据交换中心，www.fracfocus.org 披露水力压裂液体的化学成分[93]。
- ***宾夕法尼亚州***最近修改了条例，要求企业将每口非常规气井所用的化学物质清单上传到 fracfocus.org 网站上面
- ***科罗拉多州*** 要求企业披露水力压裂所用的所有化学物质及其“最大浓度”。企业必须签署一份具有法律约束力的表格，承诺只有其专利产品才能作为属于贸易机密的特定化学物质，从而避免披露[94]。
- ***阿肯色、印第安纳、路易斯安那、密西根、蒙大拿、新墨西哥、北达科他、俄亥俄和西弗吉尼亚*** 也出台了化学物质披露条例。

“绿色”水力压裂开采:用毒性较低的化学物质

用毒性较低，或较“绿色”的成分来取代钻井和水力压裂液体中使用的有毒化学物质可最小化天然气开采对水质和空气质量的威胁。公共和私营部门都在积极地寻找更加环境友好的替代物。包括哈里伯顿在内的著名油气服务企业都宣布有意去研究对环境较为安全的化学物质，例如使用来自食品行业的产品[95]。Flotek 公司设计出可生物降解的化学物质，可用于某些特定用途（钻井、水泥浇筑、产量提升以及气井生产），包括研究出来据称可以提升气井产量及气藏完整性的复合纳米液体[96]。

V. 结论

中国的页岩气开发有助于提高能源安全，应对气候变化和解决过度依赖煤炭所造成的空气污染问题。与此同时，粗放的页岩气开发也可能导致严重的环境影响，包括大量消耗水资源以及空气、水源和土壤污染。美国在经历了十多年的页岩气快速开发后，遇到上述很多问题，由于产业标准差强人意，参差不齐，各州和联邦政府都在制定管理条例，力图减轻页岩气开发所产生的环境影响。

本报告提供了页岩气环境友好开发方面的一些实践做法，这些办法都可以减轻环境影响。在中国十二五期间开发页岩气资源的探索中，这会带来宝贵机遇，并确保这种自然资源得到安全生产和利用。

在中美页岩气开发的双边合作框架内，两国政府、民营部门、研究人员以及学术界已经建立了协作对话机制。在今后岁月里，这种对话机制应该得到加强，中国应该关注引进和开发环保型技术，采纳最佳实践做法，并确立积极监管的框架，以确保其页岩气资源得到安全的利用。

尾注

[1] “2011 Pacific Summit Report: Asia-Pacific Natural Gas Exploitation: Unlocking the Potential of Natural Gas Production in the Asia-Pacific.” *The National Bureau of Asian Research*. February 23, 2011. 参见: http://www.nbr.org/downloads/pdfs/eta/PES_2011_Summit_Vision.pdf.
[2] “能源局：“十二五”期间我国天然气消费将翻倍”。新华社，2010 年 6 月 19 日。 参见: http://www.gov.cn/jrzg/2010-06/19/content_1631249.htm.
[3] *Natural Gas in China*. International Energy Agency (IEA). 2009. 参见: http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2106
[4] “Special Report: Unconventional Gas.” *China Economic Review*. 2011 年 5 月。 参见: http://content.yudu.com/Library/A1s00p/CERMAGAZINE/resources/32.htm. 尚不清楚作者是否或如何将储藏岩石构造地质复杂性所导致的中国国内储量较高利用成本纳入报告数字之中。
[5] *Natural Gas in China*.
[6] *International Energy Outlook 2011*. U.S. Energy Information Administration (EIA). 2011 年 9 月 19 日。 参见: http://www.eia.gov/forecasts/ieo/index.cfm.
[7] *Annual Energy Outlook 2011*. EIA. 参见: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/. 如需了解美国油气开采的相关背景信息，敬请参阅 “Shale Gas: Applying Technology to Solve America’s Energy Challenges”, http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/brochures/Shale_Gas_March_2011.pdf
[8] “The U.S. surpassed Russia as world’s leading producer of dry natural gas in 2009 and 2010.” EIA. 2012 年 3 月 13 日。参见: http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=5370.
[9] 《页岩气发展规划（2011-2015 年）》国家发展和改革委员会，2012 年 3 月 13 日，参见: http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2012tz/t20120316_467518.htm.
[10] *World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States*. EIA. 2011 年 4 月. 参见: http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/fullreport.pdf.
[11] 《页岩气发展规划（2011-2015 年）》.
[12] 王佑，“掘金页岩气：中国的机会？”，第一财经日报，2011 年 7 月 6 日。参见: http://www.yicai.com/news/2011/07/914243.html.
[13] Figure XI-1 在 *World Shale Gas Resources*.
[14] 美国地质调查局编纂了一份关于生产废水溢漏之环境影响的完整参考书目，请参阅: Otton, James. “Environmental Aspects of Produced-water Salt Releases in Onshore and Coastal Petroleum-producing Areas of the Conterminous U.S. – A Bibliography.” Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2006. 参见: http://pubs.usgs.gov/of/2006/1154/pdf/of06-1154_508.pdf.
[15] Hon. Jack Markell, 特拉华州州长. “Re: Delaware River Basin Commission’s Natural Gas Development Regulations.” 2011 年 11 月 17 日. 参见: http://www.wdde.org/wp-content/uploads/2011/11/gov-fracking.pdf.
[16] Fan Gao. “*Will there be a shale gas revolution in China by 2020?*” The Oxford Institute for Energy Studies. April 2012: 26. 参见: http://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2012/04/NG-61.pdf。
[17] Nowlin, Sanford. “Drought may hamper Eagle Ford Shale production.” *Houston Business Journal*. 2011 年 7 月 1 日. 参见: http://www.bizjournals.com/houston/print-edition/2011/07/01/drought-may-hamper-eagle-ford-shale.html?page=all.
[18] Appleton, Albert F.于 2009 年 6 月 4 日在美国众议院自然资源委员会能源与矿产资源小组委员会上的证词。
[19] *Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer*. U.S. DOE. 2009 年 4 月. 参见: http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/epreports/shale_gas_primer_2009.pdf.
[20] Hammer, Rebecca 和 Jeanne VanBriesen. “In Fracking’s Wake: New Rules are Needed to Protect Our Health and Environment from Contaminated Wastewater.” NRDC, 2012. 参见: http://www.nrdc.org/energy/fracking-wastewater.asp.
[21]苯、甲苯、乙苯、二甲苯、乙烷、丙烯醛、乙醛以及甲醛是油气生产过程中所释放的常见挥发性有机化合物。
[22] “In Fracking’s Wake.” 参见: “Hydraulic Fracturing Can Potentially Contaminate Drinking Water Sources.” *NRDC*. 2012 年 7 月. 参见: http://www.nrdc.org/water/files/fracking-drinking-water-fs.pdf.
[23] “Hydraulic Fracturing Can Potentially Contaminate Drinking Water Sources.”
[24] 对于在怀俄明州一次事件的研究显示，如果一口井破了， 或者井的钢套管和保护性水泥衬砌之间出现裂缝，污染物可以进入周围的岩石层而污染地下水源。参见: “Investigation of Ground Water Contamination near Pavillion, Wyoming.” U.S. Environmental Protection Agency. DRAFT. 2011 年 12 月. 参见: http://www.epa.gov/region8/superfund/wy/pavillion/EPA_ReportOnPavillion_Dec-8-2011.pdf.
[25] Harvey, Susan; Vignesh Gowrishankar 和 Thomas Singer. “Leaking Profits: The U.S. Oil and Gas Industry Can Reduce Pollution, Conserve Resources, and Make Money by Preventing Methane Waste.” New York: NRDC, 2012. 参见: http://www.nrdc.org/energy/leaking-profits.asp.
[26] “Hydraulic Fracturing Can Potentially Contaminate Drinking Water Sources.”
[27] U.S. EPA: http://www.epa.gov/oaqps001/community/details/oil-gas_addl_info.html. 苯、甲苯、乙苯、二甲苯、乙烷、丙烯醛、乙醛以及甲醛是油气生产过程中所释放的常见挥发性有机化合物。
[28] *World Shale Gas Resources*.
[29] *Report to Congress on Hydrogen Sulfide Air Emissions Associated with the Extraction of Oil and Natural Gas*. U.S. EPA. EPA-453/R-93-045, 1993 年 10 月. 当含量超过 1.5 x10^5 ppb 时，硫化氢可能致命。

[30] Kenworthy, Ken 等. “Drilling Down on Fracking Concerns: The Potential and Peril of Hydraulic Fracturing to Drill for Natural Gas.” Center for American Progress. 2011 年 3 月 21 日. 参见: http://www.americanprogress.org/issues/2011/03/fracking_concerns.html.
[31] “Leaking Profits.”
[32] “Leaking Profits.”
[33]Howarth 等 “Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations.” *Climatic Change: 1-12* (2010). 如需查阅本文及其他关于天然气的温室气体影响之研究，请见: Lashof, Dan. “Natural Gas Needs Tighter Production Practices to Reduce Global Warming Pollution.” NRDC. 2011 年 4 月 12 日. 参见: http://switchboard.nrdc.org/blogs/dlashof/natural_gas_needs_tighter_prod.html.
[34] U.S. EPA, Proposed Mandatory Reporting of Greenhouse Gases: Petroleum and Natural Gas Systems (Subpart W), Technical Support Document, 2009, 表 1 在第 8 页和 Appendix B, Docket EPA-HQ-OAR-2009-0923. 在: “Leaking Profits” 的第十二页。
[35] “U.S.-China Joint Statement on Energy Security Cooperation.” U.S. Department of State. 2010 年 5 月 25 日. 参见: http://www.state.gov/r/pa/prs/ps/2010/05/142179.htm.
[36] “Assessment of Potential Unconventional Carboniferous-Permian Gas Resources of the Liaohe Basin Eastern Uplift, Liaoning Province, China, 2011.” U.S. Geological Survey. 2012 年 2 月. 参见: http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3018/FS12-3018.pdf.
[37] 美国天然气工艺研究院和中国能源研究学会主办了“全球非常规气大会”，以支持技术专知转让，并确定双边合作的新领域。中国石油天然气总公司的石油勘探和开发研究院也为双方专家交流搭建了平台。See: http://www.cnpc.com.cn/riped/en/.
[38] Bai, Jim 和 Chen Aizhu. “Factbox: China's fledgling shale gas sector.” 2011 年 4 月 20 日. 参见: http://www.reuters.com/article/2011/04/20/us-china-shale-factbox-idUSTRE73J13820110420.
[39] “Factbox: China's fledgling shale gas sector.”
[40] Bergin, Tom. “Shell strikes shale gas in China.” *Reuters*. 2011 年 12 月 6 日. 参见: http://www.reuters.com/article/2011/12/06/us-shell-chinashale-idUSTRE7B50I020111206.
[41] “CNPC and Shell sign first shale gas production sharing contract in China.” 壳牌. 2012 年 3 月 20 日. 参见: http://www.shell.com/home/content/media/news_and_media_releases/2012/cnpc_shell_shale_gas_psc_china_20032012.html.
[42] Bai, Jim 和 Chen Aizhu. “PetroChina in talks with Shell, Hess to explore shale oil.” *Reuters*. 2012 年 4 月 5 日.参见: http://www.reuters.com/article/2012/04/05/us-china-oil-shale-idUSBRE83405920120405.
[43] Lui, Alison. “PetroChina buys Canada shale stake from Shell.” *Reuters*. 2012 年 2 月 2 日. 参见: http://www.reuters.com/article/2012/02/02/petrochina-shell-idUSL4E8D258820120202.
[44] Ling, Song Yen. “New Frontiers: China's shale targets are big and for now, unreachable.” *Platts.* 2012 年 4 月 9 日. 参见: http://www.platts.com/weblog/oilblog/2012/04/09/new_frontiers_c_1.html.
[45] “Factbox: China's fledgling shale gas sector.”
[46] Wang, Ying 和 Winnie Zhu. “Sinopec Group Unit, Exxon Sign Agreement on Shale-Gas Area.” *Bloomberg*. 2011 年 7 月 18 日. 参见: http://www.bloomberg.com/news/2011-07-18/sinopec-group-unit-exxon-sign-agreement-on-shale-gas-area.html.
[47] *Form 10-K: Annual Report Pursuant to Section 13 or 15(d) of the Securities Exchange Act of 1934*. Chevron Corporation. 2012 年 2 月 23 日. 参见: http://investor.chevron.com/phoenix.zhtml?c=130102&p=IROL-secToc&TOC=aHR0cDovL2lyLmludC53ZXN0bGF3YnVzaW5lc3MuY29tL2RvY3VtZW50L3YxLzAwMDA5NTAxMjMtMTItMDAyOTc2L3RvYy9wYWdl&ListAll=1&sXBRL=1.
[48] 王冰凝，“页岩气战争：电力企业拟将其列为主业”，华夏时报，2012 年 3 月 3 日。 参见: http://finance.ifeng.com/news/industry/20120303/5698337.shtml (Chinese).
[49] Bai, Jim 和 Chen Aizhu. “China eyes tech breakthrough before shale gas leap.” *Reuters*. 2012 年 3 月 16 日. 参见: http://business.financialpost.com/2012/03/16/china-eyes-tech-breakthrough-before-shale-gas-leap/.
[50] McClelland, Colin 和 Bradley Olson. “Sinopec Buys Canada’s Daylight for $2.1 Billion to Gain Shale-Gas Assets.” *Bloomberg*. 2011 年 10 月 9 日. 参见: http://www.bloomberg.com/news/2011-10-09/sinopec-agrees-to-buy-daylight-energy-for-2-1-billion-to-meet-fuel-demand.html.
[51] “China's Footprint in U.S. Oil: A State-by-State List.” *Wall Street Journal*. 2012 年 3 月 7 日. 参见: http://cn.wsj.com/gb/20120307/dlj112101.asp?source=Billingual (需订阅).
[52] Hook, Leslie. “Cnooc strikes second US shale deal.” *Financial Times*. 2011 年 1 月 31 日. 参见: http://www.ft.com/intl/cms/s/0/6d8a6594-2cfa-11e0-9b0f-00144feab49a.html#axzz1ondD6vhL.
[53] 高立萍，“神华等煤电龙头罕见与石油巨头争抢油气资源”，北京商报，2012 年 2 月 29 日。参见: http://jingji.cntv.cn/20120229/109999.shtml.
[54] 李春莲，“煤电集团与石油巨头争抢页岩气 华电集团被质疑有技术软肋”，证券日报，2012 年 3 月 5 日。参见: http://finance.ifeng.com/roll/20120305/5704839.shtml. 2011 年 12 月，华能与重庆能源局和云南曲靖市人民政府签署了协议。2012 年 2 月，华电与湖南省政府签署了关于开发当地页岩资源的协议。
[55] “Shale gas wars.”
[56] 其他值得一提的合作包括烟台杰瑞石油服务集团（参与了威远区块首个水平气井的钻井作业）和美国径向钻井服务公司于 2011 年成立了合资企业，并拨款 3000 万美元用于开发位于加拿大的气田。该企业将促进产生双方技术和

专知交流的机会。参见："杰瑞股份涉足油气开采业务"，中国证券报，2012 年 2 月 7 日。参见: http://business.sohu.com/20120207/n333912590.shtml。

[57] "CHEC and CHDI Together with Schlumberger Company Signed the Strategic Cooperation Agreement in Shale Gas Development." China Huadian. 2012 年 1 月 17 日. 参见: http://en.chec.com.cn/news/186.

[58]"杰瑞股份涉足油气开采业务"。

[59] *Shale Gas Production Subcommittee Second Ninety Day Report*. Secretary of Energy Advisory Board, U.S. DOE. 2011 年 11 月 18 日. 参见: http://www.shalegas.energy.gov/resources/111811_final_report.pdf.

[60] "EPA's Study of Hydraulic Fracturing and Its Potential Impact on Drinking Water Resources." U.S. EPA. 更新: 2012 年 7 月 4 日. 参见: http://www.epa.gov/hfstudy/index.html.

[61] 参见"In Fracking's Wake" 和 "Leaking Profits".

[62]该标准分属于两个项目: New Source Performance Standards (NSPS) 和 National Emission Standards for Hazardous Pollutants (NESHAPs). 最终规定参见: http://www.epa.gov/airquality/oilandgas/pdfs/20120417finalrule.pdf

[63] Geertsma, Meleah. "EPA Starts Clean Up of "Fracking" Air Pollution." NRDC. 2012 年 4 月 18 日.参见：http://switchboard.nrdc.org/blogs/mgeertsma/epa_starts_clean_up_of_frackin.html .

[64] 该列表并不包括用于保证页岩气安全发展的所有做法。资料来源: *Shale Gas Production Subcommittee Second Ninety Day Report* (DOE); *Shale Gas Production Subcommittee 90-Day Report* (DOE); *In Fracking's Wake* (NRDC); 和 *Leaking Profits* (NRDC).

[65] "New Mexico County and Municipal Law." Intermountain Oil and Gas BMP Project. 2012 年 7 月 5 日发表. 参见: http://www.oilandgasbmps.org/laws/new_mexico_localgovt_law.php.

[66] "Storm Water Discharges" 在 *Water Quality Rules and Regulations*. Wyoming Department of Environmental Quality. Chapter 2, Section 6. 参见: http://deq.state.wy.us/wqd/WQDrules/Chapter_02.pdf.

[67] Woodward, Brian. "EPA Natural Gas Star Program." Devon Energy. 提交于 SPE America's E&P Environmental and Safety Conference 2007. 参见: http://www.spe.org/spe-site/spe/spe/meetings/EPESC/2007/GreenhouseGas_BrianWoodward.pdf.

[68] Colorado Oil and Gas Conservation Commission Rule 805.b(3)(A) 和 Rule 805(b)(2)(E).

[69] "Permitting Guidance" 在 *Oil and Gas Production Facilities*. Wyoming Department of Environmental Quality Air Quality Division. Chapter 6, Section 2.

[70] *Shale Gas Production Subcommittee Second Ninety Day Report*.

[71] Mall, Amy. "DOE panel finds natural gas production presents serious risks to public health and the environment." NRDC. 2011 年 8 月 12 日. 参见: http://switchboard.nrdc.org/blogs/amall/doe_panel_finds_natural_gas_pr.html.

[72] *Shale Gas Production Subcommittee 90-Day Report*.

[73] U.S. EPA. Water: Underground Injection Control: http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/basicinformation.cfm

[74] Guo, Aibing. "China Plans Shale-Gas Investment Floor to Tap Largest Reserves." *Bloomberg Businessweek*. 2012 年 4 月 23 日. 参见: http://www.businessweek.com/news/2012-04-23/china-to-set-minimum-investment-rule-to-boost-shale-exploration.

[75] 《页岩气探矿权投标意向调查公告》，国土资源部，2012 年 5 月 17 日. 参见: http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201205/t20120517_1099388.htm.

[76] "DEP Effort Encourages Oil and Gas Industry to Use Mine Drainage Water." Pennsylvania Department of Environmental Protection. 2011 年 11 月 18 日. 参见: http://www.portal.state.pa.us/portal/server.pt/community/newsroom/14287?id=19161&typeid=1.

[77] "White Paper: Utilization of AMD in Well Development for Natural Gas Extraction." Pennsylvania Department of Environmental Protection. 2011 年 11 月. 参见: http://files.dep.state.pa.us/Water/Watershed%20Management/WatershedPortalFiles/FINAL_WhitePaperReviewTeamFindingsForUseOfAMD_ForFracWater.pdf.

[78] "In Fracking's Wake."

[79] "In Fracking's Wake."

[80]处理方案的摘要参见 43 页表 3 "In Fracking's Wake" 。

[81] "Recyclers quench Eagle Ford thirst amidst severe drought." American Water Intel. 2011 年 7 月: Vol 2(7). 参见: http://www.americanwaterintel.com/archive/2/7/general/recyclers-quench-eagle-ford-thirst-amid-severe-drought.html.

[82] "Water: Underground Injection Control Regulations." U.S. EPA. 更新: 2012 年 5 月 4 日. 参见: http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/regulations.cfm. 美国的石油企业自 20 世纪 30 年代以来开始使用地下灌注井来处置生产作业所产生的盐水。到 20 世纪 50 年代，化工企业开始利用灌注井来处置工业废弃物。

[83] "Water: Underground Injection Control Regulations."

[84] "In Fracking's Wake."

[85] 蓝楠，"国外地下水资源保护法律制度对我国的启示"，《中国国土资源经济》，2011 年 第 8 期。

[86] 分析见"Leaking Profits"中图 6、图 7.

[87] "Leaking Profits." 参见: "Reduced Emissions Completions for Hydraulically Fractured Natural Gas Wells." EPA. 参见: http://www.epa.gov/gasstar/documents/reduced_emissions_completions.pdf.

[88] Harvey, Susan; Vignesh Gowrishankar 和 Thomas Singer. "Leaking Profits: The U.S. Oil and Gas Industry Can Reduce Pollution, Conserve Resources, and Make Money by Preventing Methane Waste."

[89] *Oil and Natural Gas Sector: New Source Performance Standards and National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants*. U.S. EPA. 2011 年 8 月 23 日.
[90] *Proposed Amendments to Air Regulations for the Oil and Natural Gas Industry*. U.S. EPA. 参见: http://www.epa.gov/airquality/oilandgas/pdfs/20110728factsheet.pdf.
[91] *Shale Gas Production Subcommittee 90-Day Report*. Secretary of Energy Advisory Board, U.S. DOE. 2011 年 8 月 18 日. 参见: http://www.shalegas.energy.gov/resources/081811_90_day_report_final.pdf.
[92] "Public Water System Protection" 在 *Hydraulic Fracturing Rules*. Colorado Oil and Gas Conservation Commission (COGCC). Rule 317B. 参见: http://cogcc.state.co.us/Announcements/Hot_Topics/Hydraulic_Fracturing/Rule317B.pdf.
[93] Neslin, David，科罗拉多油气保护委员会主任于 2011 年 4 月 12 日在美国参议院环境和公共工程委员会的证词。参见: http://cogcc.state.co.us/Announcements/Hot_Topics/Hydraulic_Fracturing/Director_Neslin_Senate_Testimony_041211.pdf.
[94] "Colorado Oil & Gas Association Voluntary Baseline Groundwater Quality Sampling Program." Colorado Oil and Gas Association. 2012 年 7 月 5 日发表. 参见: http://www.coga.org/index.php/BaselineWaterSampling.
[95] McFeeley, Matthew. "State Hydraulic Fracturing Disclosure Rules and Enforcement: A Comparison." NRDC. 2012 年 7 月。参见: http://www.nrdc.org/energy/files/Fracking-Disclosure-IB.pdf.
[96] Detrow, Scott. "How Pennsylvania's chemical disclosure rules stack up against other states." *NPR State Impact*. 2011 年 8 月 12 日. 参见: http://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2011/08/12/whats-in-the-frack-how-pennsylvanias-chemical-disclosure-rules-stack-up-against-other-states/.
[97] Detrow, Scott. "Texas Advances its Fracking Disclosure Rules." *NPR State Impact*. 2011 年 12 月 16 日. 参见: http://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2011/12/16/texas-advances-its-fracking-disclosure-rules/.
[98] "State Hydraulic Fracturing Disclosure Rules and Enforcement."
[99] Detrow, Scott. "Colorado Approves Fracking Disclosure Regulations." *NPR State Impact*. 2011 年 12 月 14 日. 参见: http://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2011/12/14/colorado-approves-fracking-disclosure-regulations/.
[100] "Halliburton working on greening fracking." *UPI*. 2011 年 9 月 7 日. 参见: http://www.upi.com/Business_News/Energy-Resources/2011/09/07/Halliburton-working-on-green-fracking/UPI-77011315393262/.
[101] Filloon, Michael. "In Search of Green Fracking Fluids: Flotek, Tetra Technologies, Newpark." *Seeking Alpha*. 2011 年 3 月 31 日. 参见: http://seekingalpha.com/article/261080-in-search-of-green-fracking-fluids-flotek-tetra-technologies-newpark.