

美国页岩气开采的水环境监管经验研究*

丁贞玉 刘伟江 周颖 赵康平

(环境保护部环境规划院)

摘 要 页岩气开采所使用的核心技术——水力压裂技术不仅消耗大量水资源,而且向地下注入裂解液可能污染地下水。为应对页岩气开发所带来的环境问题,美国已开展并积累了相对丰富的环境监管经验和技 术。文章就美国页岩气开采场地的水环境监管体系、法规、制度及技术等进行探讨和研究,并提出我国在页岩气大规模开采初期的水环境监管思路及技术方向。

关键词 页岩气;压裂液泄漏;地下水污染;水环境监管

中图分类号: X37

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2013)04-0004-05

0 引 言

页岩气开发可以缓解能源压力、保障能源安全,同时也是人类应对全球变暖、减少大气环境污染的有效手段之一。国际能源署(IEA)2011年6月发布的解读天然气“黄金时代”的专题报告指出,到2035年全球以页岩气为主的非常规天然气产量可达到1.6 亿 m³,占同期天然气供应增量的2/3^[1]。然而,页岩气开发带来日益突出的环境问题,引起广泛争议,这是正在或即将开发页岩气资源的国家都不能回避的问题。

目前,美国是全球唯一实现页岩气商业化开发和规模利用的国家。近十年来,美国在水平钻井、水力压裂等关键技术取得重大突破,形成了一个技术创新特征明显的新兴产业,并开始向全球进行技术和装备输出,掀起全球页岩气革命。同时,美国在如何保障和促进页岩气资源的勘探开发技术和政策上,也对页岩气资源开发可能带来的水资源挑战、环境影响及其相应的防治和管理措施等问题做出有益的探索。

我国页岩气资源丰富,潜力巨大,不仅将为我国带来巨大的经济效益,也很有可能改变世界能源格局,所以我国页岩气开发利用势在必行。然而,页岩气开采潜在的环境影响让人担忧,尤其是对生态环境和水资源的影响,如页岩气的开采需要消耗大量的淡水资源,可能威胁到当地和区域的水资源可持续利用;页岩气开采过程中产生废水、废气造成的环境污染问题等。业内人士和环保专家指出,在页岩气开采

的初期,要着力加强页岩气开采、运输、储存和处理全过程中的环境风险评估以及由此对周边居民环境产生的影响。同时,针对不同区域的环境特点及敏感程度,结合主体功能区划相关要求,以及可能存在的环境问题,分区域推进页岩气开发的环境管理,形成全过程的监管机制。本文主要针对美国页岩气开发的水环境监管经验与教训进行探讨,借鉴其水资源保护和环境监管等领域的新思路及最新成果,为我国正在筹划的页岩气开发时期环境保护战略提供参考。

1 页岩气开发利用对水环境的影响与风险

1.1 水资源量消耗巨大

根据页岩构造的地质特性,页岩气储层的孔隙度和渗透率非常低,除少数裂缝发育区域具有较高的自然产能外,一般页岩气藏均需水力压裂后才可获得工业气流。在美国,页岩气开采采用的水力压裂法耗水量较大,压裂液中98%~99.5%为水和砂,一次水力压裂作业可能需要约1 000万L的水耗。由于钻井所使用的水要注入比地下蓄水层更深的页岩层,大量水主要被岩石吸收,不能再回收利用。这将限制水资源匮乏地区页岩气的开发,如德克萨斯州鹰滩页岩构造区在开采时期遭遇多年大旱。此外,页岩气开采也会影响当地水流和湖泊的季节性径流变化^[2]。

我国页岩气资源开发地区大部分处于水资源短缺区域,页岩气资源开发将进一步加剧水资源短缺的严峻形势。我国重点缺水地区主要分布在华北平原

*《全国地下水基础环境状况调查评估(2011—2015)》(项目编号:2110302)、环保公益性行业科研专项“华北平原典型地区地下水污染防治技术体系研究”(2013—2015,项目编号:201309004)。

丁贞玉,2010年毕业于兰州大学自然地理学专业,博士,2012年北京师范大学地理学专业博士后出站,现在环境保护部环境规划院从事地下水污染防治规划相关研究工作。通信地址:北京朝阳区安外大羊坊10号,100012

(黄淮海平原)、四川盆地、辽宁、山西、天山及河西走廊等地区,而我国页岩气勘探的有利区域也基本上处于这些地区或邻近区域。由于这些地区的地表水缺乏,页岩气开采的用水将主要依靠开采地下水。这将极有可能造成地下水资源枯竭、含水层储水能力丧失、水质恶化等不良影响。根据美国页岩气井的统计数据,单井总平均产气量约 $1\ 000\ \text{m}^3$,每口水平井需水量多达垂直井的5倍,每天需用水约 $114\ \text{m}^3$ 。假定达 $1\ 000$ 口钻井开采四川盆地中 $15\ \text{亿}\ \text{m}^3$ 的页岩气(约占2020年页岩气年产能目标的5%~10%),可知需要所有钻井24 h工作 $1\ 500\ \text{d}$ (约4 a),需用水 $1.71\ \text{亿}\ \text{m}^3$,相当于消耗该盆地地下水淡水可开采资源量的1.1%(每年0.25%)^[3]。另外,区域地下水位下降还会使平原或盆地湿地萎缩或消失、地表植被被破坏等。

1.2 地表水污染

数据显示^[4],在注入水力压裂液并释放压力后,10%~70%的原注液体量,或大约 $1\sim 6$ 万桶($160\sim 960\ \text{万}\ \text{L}$)液体会返回地表,俗称“返排废水”。如果管理不当,返排废水会威胁到地表水体水质。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,长期来看,每百万 m^3 的燃气产量会伴随 $3\ \text{万}\sim 13\ \text{万}\ \text{L}$ 的生产废水。尽管每个页岩构造不同,一口页岩气井的生命周期最长可以达到40 a,此单井的生产废水总量可以达到数百万 L 。“返排废水”和“生产废水”都含有用于水力压裂生产流程的各种潜在危害化学物质,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、盐分以及自然生成的放射性物质(NORM)。如果废水排放前的处理工作不到位,地表就会受到污染;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也可能会出现意外的地表溢漏。在美国某些地区的页岩气作业者,包括马塞勒斯区块作业者,会将废水运到公共污水处理厂(POTWS)进行处理。

1.3 地下水污染

水力压裂法开采天然气会对地下水造成一定污染。宾夕法尼亚州位于马塞勒斯页岩区,是目前美国进行页岩气开采的主要地区。宾夕法尼亚州在页岩气开发过程中环境污染频发,也促使其相关环境监管体系相对完善。宾夕法尼亚州在页岩气开采过程中共发生2 988起事故,其中1 144起环境事故,1 844

起行政管理事故。在环境事故中,地下水污染相关问题占35%,地表水污染占30.2%,水土流失占24.6%,水泥套管问题占8.7%,井喷沙涌问题占0.9%,气体横向运移问题占0.5%。

水平井钻井和水力压裂法是页岩气开采的核心技术,压裂液体和其它污染物(如来自气井的甲烷、重金属、放射性物质)可能会通过多种潜在途径流出,从而造成地下水污染。水力压裂中添加的化学物质是根据每个矿井的实际情况设计的,这些化学物质主要是为了降低黏度、抑制细菌生长等。根据目前公开的压裂液成分,添加的化学物质包括润滑剂、酸、杀虫剂等,主要包括柴油燃料、煤油、苯、甲苯、二甲苯、甲醛等,这些物质如果污染水体,足以对人体造成危害,甚至致癌。页岩气藏一般埋藏较深,与储水层之间还会隔着很多地层,因此在压裂的过程中污染地下水的可行性较小。但是,劣质套管和水泥灌注都可能成为污染物流出的通道。在完井作业(也称“井筒清理”)过程中,安装永久加工设备之前,刺激性的材料和其它泥石碎片会向上流出。此外,液体通过自然断层、裂隙、透水岩层、附近不恰当的弃井或完成井向上迁移、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。

2 美国页岩气开发过程中水环境监管经验

2.1 监管体系与水资源保护

美国的环境监管机构包括联邦级别的环境保护局(EPA),能源部,内政部土地管理局以及州级的职能部门等。能源部作为联邦监管机构中的主管部门,在页岩气方面的主要工作是研究和制定能源战略与政策,组织、协调而后自主关键技术的研发;内政部土地管理局主要负责管理联邦政府拥有的土地和油气矿权;环境保护局是联邦层面监管页岩气开发的主要机构,负责监管与页岩气开发相关的环境问题。各州根据其机构设置体系的不同,主管环境监管的职能部门也各不相同,如德克萨斯州的铁路管理委员会,宾夕法尼亚州的州长页岩气咨询委员会等。美国对页岩气开采活动的环境监管包括联邦和州政府两个层次。在联邦层面,目前正在积极设立针对页岩气开发时期环境保护的专项法律法规,但是对于页岩气开采活动的环境监管已穿插在各项联邦政府颁布的法律中,逐步建立了较为完备的环境监管法律体系,实现了从废气排放、废水排放、土壤污染、噪声污染及栖息地等多方面、覆盖开采前、中、后多环节的全方位监管,在一定程度上保障了美国在页岩气发展过程中的

环境保护,尤其是水环境保护。

美国 EPA 和各级州府环境保护局都有严格的油气水环境保护规划,明确水环境保护目标、应对措施和污染处理设施,这些对页岩气开发过程的水环境监管提供了有力保障^[5]。首先,所制订的水质和总量控制目标对页岩气开发地区的水体用途进行分类、分区,规定水质控制指标、排入矿区的污染物允许数量、分配至每个集中排放口的容许排放负荷,以及重点治理设施及其所需要的费用,使页岩气开发地区流域内低于水质标准的水体达到规定目标,防止高质量水体水质下降。其次,要求对页岩气等油气开发地区进行水环境系统规划。包括在规定期限内建设页岩气开发所需的水环境控制系统,对各类污染源提出控制措施,确定处理页岩气开发产生的废水与污染的途径与方法等,以及实现其规划的进度与费用。再次,对页岩气开发进行环境基础设施规划,在页岩气开发地区规划需建造的废水处理厂和相关设施以达到水质目标。

美国能源部报告中关于水资源保护部分强调指出,页岩气开发必须保证在不干扰当地工农业正常用水的前提下,当地水资源的供水能力能够满足页岩气井的钻探与水力压裂用水。美国地质调查局提出了页岩气开采三个水资源问题加以限制开发过程的耗水:①钻探用水不能给当地的水资源带来冲击;②应避免(乡村)小流域和河流的退化;③评估钻探回收水的利用程度。如果没有正确控制钻探取水的频率、时间和地点,则会对水资源保护产生不利影响。大量增加的页岩气开采用水可能会引起地表水及地下水资源的枯竭、含水层储水能力的丧失、区域水资源的可持续利用率减少等。美国内政部也于 2012 年 5 月提出,要求油气公司披露在美国本土作业的水力压裂中使用的化学品,并呼吁钻井公司应确保所使用的流体不从井筒逃逸。油气运营商还必须有适当的水管理计划,以处理压裂液。

2.2 地表废水监管

页岩气井中回收的废水含有碳氢化合物、重金属、污垢以及化学盐分,被外界普遍认为是最难处理的一类工业污水^[4]。目前,美国对于页岩气生产所产生的废水有五种基本的管理需求:①最大程度减少生产废水的量;②钻井作业中进行循环回收和再利用;③废水处理;④废水的处置;⑤处理后其它有益利用,这些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。

总体上,废水处理的基本原则是将废水循环回收

和再利用,并开展生产现场内的废水处理工作。因此,美国废水监管条例的目的就是尽可能降低或消除接触废水污染物所带来的危害风险。联邦《清洁水法》条例彻底禁止将来自天然气生产点源的废水污染物进行直接排放,水力压裂作业方不得将废水直接排放到地表水体,而是运送到获得了排放授权的处理设施,并通过国家污染物排放消除系统(National Pollutant Discharge Elimination System,简称为 NPDES)许可证制度来落实。美国环境保护局的条例对进入公共处理设施的工业废水(间接排放)以及废弃物集中处理设施排出的工业废水都提出了预处理要求。各州针对这些,制定比联邦标准更为严格的要求。例如,宾夕法尼亚州环保局就推出了本州条例,实施《清洁水法》以及该州的《清洁水流法》,并制定了本州的工业废弃物排放标准。2010 年,宾夕法尼亚州环保局完成了对于本州条例的修订工作,就天然气生产作业所产生的废水向地表水体的排放做出了明文规定。这些条例禁止未获该州发放许可证就擅自排放“新的和更多的”页岩气废水。只有废物集中处理设施才能获得此类排放的授权;公共处理设施如欲获得新的或更大量页岩气废水的排放授权,就必须先进行废弃物集中处理。

2.3 地下灌注

美国《安全饮用水法》对天然气开采废水的地下灌注做出规定。《安全饮用水法》批准创建了“地下灌注控制项目”(UIC)。该项目旨在通过制订安全废水灌注实践标准以及严禁某些类型的灌注来防止所灌注的液体废物进入地下饮用水源。任何未得到该项目授权的地下灌注都被禁止进行。根据“地下灌注控制项目”的规定,美国环境保护局将地下灌注井分为五级,每个级别都适用于不同的要求和标准。在马塞勒斯地区,马里兰州、俄亥俄州以及西弗吉尼亚州都承认联邦法律优先原则,并由州政府实施“地下灌注控制项目”。纽约州、弗吉尼亚州和宾夕法尼亚州尚未承认联邦法律优先原则,因此美国环境保护局在这些州直接实施“地下灌注控制项目”。《安全饮用水法》旨在保障美国供水系统安全,预防向地下饮用水源排放液态废物。地下灌注控制项目其内容包括许可程序,检查、监测和报告制度等。可以通过这些气井向石油或含气区注入水和其它液体以处理生产废水。该法仅对向地下饮用水源注入废物进行限制。美国环保局为各州 UIC 设定最低标准,注入的流体严禁威胁或可能威胁当前以及将来的公共饮用水安全。UIC 对注水井的选址、建设、操作、维护、监控、测

试乃至关闭都做了相应的要求。所有的注水井需要根据一般规则或特别规则获得授权。立法初衷是要让各州在落实 UIC 项目时扮演主导角色。

美国联邦政府零散的条例不足以确保页岩气的安全开采,环境监管责任往往落到各州身上。就目前来看,各州在规范页岩气生产方面仍发挥主导作用。尤其水力压裂法几个核心环节从联邦法律中并没有具体体现,为填补这些空缺,一些州陆续开始完善与水力压裂有关的立法,并建立起更为严格完善的环境监管体系。

2.4 公开披露水力压裂液体化学成分

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。另外,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使天然气开采对水质和空气质量的威胁最小化。各相关单位及部门都应积极地寻找更加环境友好的替代物。随着对页岩气及其环境问题的关注度日渐提高,在各界的努力下,公开使用的化学物质、进行环境影响评价推广起来。2011 年 12 月,关于在怀俄明州帕维尼恩的调查,美国环保局作为联邦政府机构,首次发表了水压致裂法和地下水含有的化学物质可能存在因果关系的报告草案。另外,美国公开发布了一款“混合与测算模型”^[6]用来分析评估页岩气压裂液所产生废水的成分,以及废液中的有毒有害物质比例,可以用来进行废液监管评估,辅助管理者选择最适合场地的废水处理办法。

3 我国监管基础与问题

页岩气已经作为一种新型能源受到党和政府的高度重视,并强调开发过程中需要一系列法律法规的制约。目前来看,现行监管法律包括《中华人民共和国矿产资源法》及其配套法规,此外还包括《水污染防治法》、《循环经济促进法》、《清洁生产促进法》、《环境信息公开条例》等法律法规。依托这些立法,可以形成一定的环境保护制度对页岩气开发加以监管。但是,这些制度有很多不完善的地方,也与页岩气开发的时序性及用水特征无法匹配。如我国某些缺水区域的水资源规划制度很有可能由于页岩气开采造成隐患,而所需的相关设施在控制水污染和保护水资源方面 also 具有重要意义。所以,需要加强对目标区域进

行详细规划,才能从源头保证水资源保护的相关制度和措施的执行。

再比如,我国《水污染防治法》规定了排污收费制度。但暂时没有对页岩气开发排污收费的具体要求和措施。我国还缺乏对水力压裂法液体成分有效的环境评估、监管措施。

目前我国页岩气废水主要的排放方式为直接排放,如果废水在废弃物集中处理设施或公共处理设施未能充分处理的情况下排放,会污染排放点下游的地表水体(包括饮用水源)。如果排放废水中所含的污染物量或浓度过高,或者接受水体缺乏足够的吸收能力,这种污染会严重危害生态系统和人体健康。

我国从 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。依据我国现有利用土地处理污染物之深井处理污染物可与地下灌注相近,但目前我国关于深井的定义并不明确。仅《上海市深井管理办法》规定“凡是井管深度从地面往下超过 10 m 的水井,称为深井”,且通常是为了开采利用地下水资源,而不是用于污染物处理。

所以,我们不仅需要借鉴各国页岩气开发经验,也急需提出一系列页岩气开发环境保护战略管理和保障措施,并充分考虑我国页岩气资源开发的地理环境局限(水资源、基础设施等)、开采潜在的环境影响及其相应的防治和管理措施等问题。

4 结论与建议

本文总结了美国页岩气开采造成的水环境影响,以及水环境保护的监管经验,对于我国未来开展页岩气开发的相关环境管理提供了决策参考。当前,我国已经开始了页岩气开发的示范项目,如中石化与康菲联合勘探项目、中国石油西南油气田复合桥塞多段(层)压裂推广项目、国投重庆页岩气开发利用项目等,然而我国在这方面的管理措施还处于空白,亟待出台一些措施规范这些示范项目的管理,保护生态环境,尤其是地下水资源,具体建议如下:

◆ 尽快完善页岩气开采环保法规标准。在制定岩气资源勘探开发优惠政策的同时,对现有的水环境保护等法律法规以及油气开采鼓励技术政策等进行修订,明确环境保护排放标准,编制页岩气开发的水环境保护规划,提出页岩气开采的质量目标和设施要求。

◆ 页岩气开采前要认真做好水环境影响评价工作。要求将页岩气资源的勘探评估与区域水资源规划和环境影响评估等结合在一起,综合评估开采的可行

性。本着不影响当地和区域的居民饮用水、工农业用水、动植物生态需水等水资源平衡的原则,防治和减少页岩气资源开发中潜在的环境污染和生态破坏。由于我国页岩气资源的勘探开采属于起步阶段,应该避免“末端治理”、“末端管理”的思想。

◆ 页岩气开采过程中要定期开展环境监测和评估。加强对污染物的排放量以及浓度限值严格限制和监控,并对排入地表地下水体中允许存在的污染物限制做出更加严格的规定。明确页岩地表水和地下水监测技术规范,明确监测点位、指标和频次,定期评估页岩气开采对地表水和地下水环境风险。

◆ 加强页岩气水污染控制技术研究。引进和自主研发回流水的关键处理技术,鼓励废水循环利用及处理处置技术创新。利用来自其他工业作业的循环回收水,例如酸性矿排水;开展地下水灌注技术研究,建立相关可行性规定,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。

◆ 加强环境信息公开。无论作业者使用哪种处理或处置方法来管理页岩气废水,都应根据要求公开披露所采用方法的液体化学成分及废弃物的最终目的地。

◆ 加强废水资源综合利用。对于在页岩构造中开展天然气生产所产生的废水,最大程度地减少生产废水量;在天然气钻井作业中进行循环回收和再利用;处理、处置以及作业外的有益再利用。生产现场采用最大程度减少废水量、循环回收和再利用等管理。页岩气的开采需要大量的水资源,我国在引进先进开采技术的同时,更要注重借鉴先进的水资源管理,避免造成水资源的浪费和枯竭。

◆ 针对页岩气开采可能导致的地表水及地下水资源枯竭,含水层储水能力丧失,饮用水安全受到威胁等问题,借鉴国外先进经验,结合我国饮用水水源环境保护的相关法规、政策及标准,明确页岩气开发的饮用水环境保护准则,编制页岩气开发的饮用水综合保护规划,提出页岩气开采对水量、水质的目标要求及配套技术。

参考文献

- [1] US Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2010[R]. Report No: DOE/EIA-0383 (2010), Washington, DC: Energy Information Administration, 2010.
- [2] Merisha Enoe, Yan He, Erica Pohnan. 借鉴国际经验: 中国页岩气资源环境友好开发之路[R]. 美国自然资源保护委员会, 2012.
- [3] 夏玉强. Marcellus 页岩气开采的水资源挑战与环境影响[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 103-110.
- [4] Hammer, Rebecca, Jeanne VanBriesen. In Fracking's Wake: New Rules are Needed to Protect Our Health and Environment from Contaminated Wastewater[R]. NRDC, 2012.
- [5] Ground Water Protection Council (GWPC), Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer [R]. National Energy Technology Laboratory, 2009.
- [6] Mixing and Scale Affinity Model. Water Treatment Catalog and Decision Tool[DB/OL]. http://www.all-llc.com/projects/produced_water_tool/.

(收稿日期 2013-01-07)

(编辑 王蕊)

页岩气开发环境保护关键技术研习会在成都顺利召开

2013年7月22—23日,由中国石油天然气集团公司科技管理部和国际部主办,中国石油集团安全环保技术研究院承办的“页岩气开发环境保护关键技术研习会”在成都顺利召开。来自美国莱斯大学李琪琳教授、美国佐治亚理工学院 John Crittenden 博士和 Bill Berzins 博士、耶鲁大学 Menachem Elimelech 教授和安全环保技术院有关专家分别作了专题报告。中国石油天然气集团公司科技管理部、勘探与生产分公司和安全环保技术研究院等有关领导,中国石油安全环保技术研究院、勘探开发研究院、钻井院、西南油气田公司、川庆钻探公司、长城钻探公司、西部钻探公司等多家科研单位和生产企业的50多位代表参加了会议。

会议围绕页岩气开发过程中存在的水资源管理和压裂返排液回用处理等重点难点问题,展开了深入的交流与讨论,专家们系统分析了北美和国内页岩气开发环境保护现状,对压裂返排液、钻井废弃物等处理工艺技术原理、装备特点及应用效果进行了对比分析,对电容法脱盐、正渗透脱盐等新技术在压裂返排液回用处理中应用研究成果进行了分享。同时,针对国内页岩气开发如何做好水的科学管理和污染防治等提出了良好建议。会上,大家一致认为构建开发区块区域水网络系统,最大限度提高污水回用率,开展水资源的科学管理是缓解水资源紧张矛盾的最有效途径;开展污水回用水质标准研究和相关处理技术及装备的攻关及引进是当前研究工作的重点;开展对外交流,加强各专业间的合作有利于加快推进我国页岩气开发环境保护技术发展。

(中国石油安全环保技术研究院 张爽 供稿)