

Marcellus 页岩气开采的水资源挑战与环境影响

夏玉强

中国地质大学(武汉)环境学院;教育部生物地质与环境地质重点实验室,武汉 430074

美国天普大学土木与环境工程系自然资源开发与保护研究中心,美国费城 19122

摘要 页岩气作为一种重要的非常规天然气资源,已成为全球油气资源勘探开发的新亮点。美国 Marcellus 页岩是目前世界上最大的非常规天然气田,地质储量高达 42.47 万亿 m^3 ,最大可开采量约 14 万亿 m^3 ,可供其 20 余年的天然气消费。然而,2008 年以来 Marcellus 页岩气田的开采,因其消耗了大量的水资源及潜在的环境危害,引发了美国全国性的关于页岩气开采的环境影响大讨论。本文主要以美国 Marcellus 页岩气田为例,简述其开采现状及其产生的环境问题。针对中国目前正在积极筹划的页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想,总结了美国页岩气开发的资源环境效应带来的启示。

关键词 非常规天然气;Marcellus 页岩气田;水资源挑战;环境影响;可持续发展

中图分类号 X37

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0103-08

The Challenges of Water Resources and the Environmental Impact of Marcellus Shale Gas Drilling

XIA Yuqiang

Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of the Ministry of Education; School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Center for Natural Resources Development and Protection, Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA

Abstract Shale gas is a kind of unconventional natural gas resources that comes from hydrocarbon rich shale formations. In recent years, the advances in horizontal drilling and in hydraulic fracturing, and the fast rising of natural gas price as a result of significant demand pressures, have made the shale gas production economically viable. The US Marcellus shale, which covers an area of about 95000 square miles, is the largest unconventional natural gas reserve in the world. Its recent estimates give 42.47 trillion cubic meters of reserves and 14 trillion cubic meters of recoverable reserves, which can meet the natural gas demand of the USA for more than 20 years. However, the water availability, water management and environmental impacts pose challenges during the Marcellus shale gas drilling and development, triggering national discussions on the sustainable development for energy and environment. According to a Temple University Summit, "Marcellus Shale Natural Gas Stewardship: Understanding the Environmental Impact", it is estimated that each well drilled using hydraulic fracturing (a process which pumps highly pressurized water to break or fracture the shale to extract the gas) will require 1-8 million gallons of water, with much of that water coming back 10-times saltier than seawater. This paper reviews the status of Marcellus shale gas development along with its environmental impacts, such as the effect of the water withdrawal on the water quantity in headwaters and the need for a cumulative impact assessment study on the areas surrounding the drilling sites. The review would provide some insights into the emerging development of shale gas in China. It is suggested that a combined multi-resource assessment should be conducted before the shale gas drilling, especially for the sustainable availability of freshwater in a regional scale. The shale

收稿日期:2010-04-24;修回日期:2010-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40672167);高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B08030);Program of The Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council(070836)

作者简介:夏玉强,博士研究生,研究方向为滨海生态水文环境模拟、原油污染海滩的生物修复等,电子信箱:xiayqcug@gmail.com,xiayq@temple.edu

gas development should ensure that the water demands of communities and regional ecosystems are not affected and that water quality and surrounding environments are protected. In addition, infrastructure, laws and regulations along with the drilling technologies and facilities should be combined to reduce water resource risks and environmental impacts of the shale gas development.

Keywords unconventional natural gas; Marcellus shale gas; water resources challenge; environmental impact; sustainable development

0 引言

英国石油公司 (BP)2009 年发布的《世界能源统计年鉴 2009》^[1]显示,2008 年底全球已探明天然气储量达 185.02 万亿 m^3 (美国占 3.6%,中国占 1.3%),全球天然气产量为 3.06 万亿 m^3 (美国占 19.3%,中国占 2.5%),全球天然气消耗量(美国占 22%,中国占 2.8%)占世界能源消耗总量的 24.1%。该公司还预测,非常规天然气(页岩气、煤层气、致密砂岩气)资源量将达到天然气总量的 60%左右。随着水平钻探技术、水力压裂技术的发展以及天然气价格的快速上升^[2-3],页岩气作为一种重要的非常规天然气资源,已成为全球油气资源开发的新亮点。

目前,全球页岩气资源量为 456.2 万亿 m^3 ,约占非常规天然气资源量的 50%^[4]。《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会指出,2007 年美国页岩气产量接近 500 亿 m^3 ^[5]。美国清洁国土基金会 (ACSF) 和 Navigant 咨询公司 (NCI) 的统计分析^[6]表明,2007 年美国非常规天然气产量达 0.25 万亿 m^3 (约占美国天然气总产量的 46%),其中页岩气产量为 297.33 亿 m^3 (占非常规天然气产量的 11.84%),并预测 2018 年美国页岩气的产量将占其非常规天然气产量的 38%(图 1,修改自美国能源部^[2])。美国能源信息管理局 (EIA) 的统计结果^[7]显示,2008 年全美已探明的页岩气储量高达 9295 亿 m^3 (产量约 572.57 亿 m^3)。中国国土资源部的报道^[8]指出,美国页岩气资源量超过 28 万亿 m^3 ,2009 年美国页岩气产量接近 1000 亿 m^3 ,美国页岩气的快速勘探开发使其天然气储量增加了 40%,预计 2010 年页岩气产量将占全美天然气产量的 15% 以上。美国能源部 (DOE) 2009 年的报告^[2]显示,目前主要的页岩气田有 Fayetteville, Haynesville, Marcellus, Woodford, Barnett, Antrim 和 New Albany, 前 4 个区的可开采总量可达 15.57 万亿 m^3 ,其中 Marcellus 页岩气田的分布面积、地质储量和可开

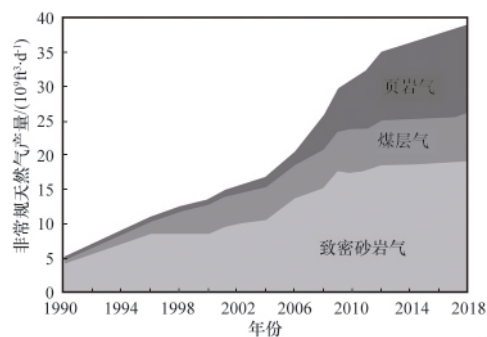


图 1 美国 1990—2018 年非常规天然气产量
(1ft=0.3048m)

Fig. 1 United States unconventional gas outlook
(1ft=0.3048m)

采量是美国目前最大的。Marcellus 页岩气田的开采属于美国近两年最新的天然气资源开发方向,它的开采引发了全美一系列环境问题讨论。

2009 年底以来,中国也正在积极筹划页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想,然而,目前中国各方面都将注意力集中在如何保障和促进页岩气资源的勘探开发技术和政策上,忽略了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。中国目前关于北美页岩气的介绍^[4-5,8-11]还未考虑此类问题,因此,本文简要介绍美国 Marcellus 页岩气资源的开发经验和相关资源环境影响讨论的最新成果,以期为中国正在筹划的页岩气勘探开发战略提供参考,也为促进中国水资源规划和环境影响评估等领域的发展提供新思路。

1 Marcellus 页岩气资源概况

美国 Marcellus 页岩气田是目前世界上最大的非常规天然气田^[12],位于东部 Appalachian 盆地,横跨纽约州、宾夕法尼亚州、西弗吉尼亚州及俄亥俄州东部(图 2)。Marcellus 页岩是富含有机质的黑色沉积岩,形成于中泥盆纪(约 350 百万年前)的一个浅内陆海^[13],其埋深在 1200~2600m 之间,平均厚度为 15~61m(50~200in,图 2),延伸面积达 24.6 万 km^2 。美国地质调查局 (USGS) 2002 年的评估^[14]显示,Marcellus 页岩气田的可开采量为 538 亿 m^3 ,2006 年的评估^[15]报道其可开采量达 8778 亿 m^3 。NCI 2008 年的报告^[6]称,Marcellus 页岩气的地质储量多达 42.47 万亿 m^3 ,占整个 Appalachian 盆地的 85% 以

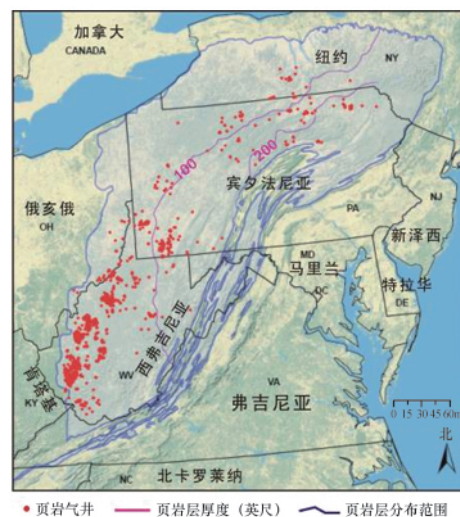


图 2 Marcellus 页岩气田分布

Fig. 2 Marcellus shale gas reservoir map

上, 其可开采量约为 7.42 万亿 m^3 。最新评估报告^[16]显示, Marcellus 页岩气的可开采量为 13.85 万亿 m^3 , 可供全美 20 多年的天然气消费。

美国第一口页岩气生产井完成于 1821 年, 它位于纽约 Fredonia 镇附近的泥盆纪页岩区^[2]。Marcellus 页岩气田的第一口钻井完成于 1880 年, 位于纽约 Ontario 郡的 Naples。宾夕法尼亚州的第一口 Marcellus 页岩气钻井位于华盛顿郡的早志留世 Rochester 页岩区, 由 Range Resources 公司于 2003 完成, 直至 2005 年才开始开采页岩气。截止 2009 年 3 月, 宾夕法尼亚州已完成的 Marcellus 页岩气井达 501 口^[12]。宾夕法尼亚州环境保护部 (DEP) 油气管理局网站的数据显示, 2009 年该州共完成 Marcellus 页岩气井 768 口, 2010 年 1 月新增 71 口。有报告预测, 2010 年该州的 Marcellus 页岩气井将达 1000 口, 日产量约 15.57 百万 m^3 , 2020 年的井数为 2800 口, 日产量高达 113.27 百万 m^3 ^[12]。根据西弗吉尼亚州的 Marcellus 页岩气井数目的统计和估计 (图 3), 美国能源部预测 Marcellus 页岩气可开采量在 2.83 万亿~4.25 万亿 m^3 ^[17]。

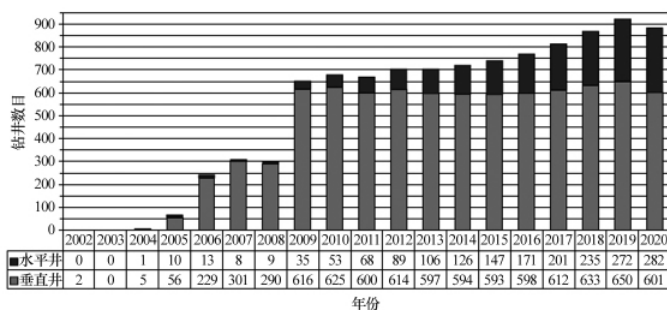


图 3 西弗吉尼亚地区已有的 Marcellus 页岩气钻井
(数据来源: 美国能源部)

Fig. 3 Drilled and projected Marcellus wells
in West Virginia (data from DOE)

美国 Marcellus 页岩气的开采技术主要是水平钻井技术和水力压裂技术^[2]。水平钻井技术除了需要一个用于地下水水平钻进的特别装置外, 其余钻井过程与常规的垂直钻井一样。水平钻井的优点在于它可以最大化接触气藏岩层, 增加单井产气量; 在同一个地表点下可以布设多个水平钻井, 与垂直钻井相比, 减少了对地表的破坏。19 世纪 50 年代, 美国德克萨斯州发展了大尺度水力压裂法, 1986 年首次应用于 Barnett 页岩气开采。水力压裂技术的目的是增加井孔与气藏岩层的接触, 为油气提供一个向井孔流动的高渗透通道。其基本流程是在完成钻井的钻井和安装后, 将高压液体混合物注入钻井, 使气藏岩层裂开, 而高压液体中的支撑剂进入裂缝后使其保持开放状况, 从而使得这种水力裂缝成为将油气导向钻井的高速通道。高压液体由水和固体支撑剂 (如石英砂) 以及化学添加剂组成, 水砂含量一般为 98%~99.5%, 添加剂含量 0.5%~2%。用于高压液中的化学添加剂有 250 余种, 美国能源部^[2]总结了常用的 14 种添加剂, 例如减阻剂 (friction

reducer) 用于降低高液与钻井管道的摩擦, 杀菌剂 (biocides) 用于抑制液体中微生物的繁殖和裂缝中的生物沉积, 除氧剂 (oxygen scavengers) 和碳化物稳定剂 (stabilizers) 用于防止金属管道的腐蚀, 稀酸液 (diluted acids) 用于移除钻探泥浆对气藏岩层的破坏。

2 水资源挑战 and 环境影响

尽管 Marcellus 页岩气的开采给美国和当地政府带来了巨大的经济效应, 但其潜在的环境影响更让美国生态环境和水资源等领域的专家及当地民众担忧^[18]: 一方面是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; 另一方面是页岩气开采过程中产生噪声、废水、废气及其开采事故灾害等引起的环境污染。

2.1 水资源挑战

美国 Marcellus 页岩气田位于 Appalachian 盆地的上部, 穿越了包括 Delaware 河、Susquehanna 河、Ohio 河和五大湖的 St. Lawrence 河等在内的几个重要流域。1961—1990 年, Appalachian 盆地的年降雨量为 76~127cm, 高出美国大陆平均值约 25cm^[2]。Marcellus 页岩区的平均年降雨量约为 109cm, 按照 Marcellus 页岩的边界面积 (14 万~24.6 万 km^2), 因降雨每年流入该页岩区的水量为 0.71 万亿~1.25 万亿 gal (1gal = $3.785 \times 10^{-3} \text{m}^3$)。一个典型的页岩气水平钻井在钻探和水力压裂过程中需使用 100 万~400 万 gal 的水^[2], 而其中 50%~70% 的水在这些过程中会被消耗。根据美国能源部的统计^[2], Marcellus 页岩气田的每一个钻井平均用水量为 3.88 百万 gal (约 1.5 万 m^3), 其中用于水力压裂的水量占 98%。Barnett 页岩气田每个钻井需水 1 万 m^3 (水力压裂水占 85%), Fayetteville 页岩气井需 1.2 万 m^3 (水力压裂水占 95%), Haynesville 页岩气井需 1.4 万 m^3 (水力压裂水占 73%)。以 Susquehanna 河流域为例, 每天用于电力生产的累积淡水量约 150 百万 gal, 而每天用于 Marcellus 页岩气井钻探的水量估计达 8.4 百万 gal^[19]。该流域委员会初步估计最终在该流域 (宾夕法尼亚州和纽约州) 实施的 Marcellus 页岩气井数目达 5000 口。

根据前面统计的 Marcellus 页岩气钻井数目, 预计 2010 年宾夕法尼亚州的页岩气井需消耗 1500 万 m^3 的水, 西弗吉尼亚州则需消耗 1017 万 m^3 的水。换句话说, 2010 年仅宾夕法尼亚和西弗吉尼亚两州的页岩气井需水量占 Marcellus 页岩区总水量的 0.52%~0.92%。尽管这个水量比该区域水量小, 但由于页岩气井的钻探周期较短 (24h 作业, 一个水平井需 4~5 周, 再加 3~5d 的水力压裂处理), 在此期间内大量消耗当地地表水或地下水 (每口 Marcellus 页岩气井每天需用水约 3 万 gal), 很可能会影响当地水生生物的生存、捕鱼业、城市和工业用水等。另外, 页岩气开采的水资源消耗问题在 Barnett 页岩气开采过程中一直饱受争议。

针对 Marcellus 页岩气开采, 美国地质调查局的报告^[13]提出了需要着重注意的 3 个水资源问题: 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 评估选定合适的处理方法处置含有污染物质的大量钻探回收水。美国能源部的报告^[2]强调,页岩气是否能够成功开发的一个关键因素是,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是否能够满足页岩气井的钻探与水力压裂用水。如果没有正确控制钻探取水的频率、时间和地点,则会对河流的有效利用产生不利影响。例如,河流流量的减少会造成下游公共给水的不足,对水生和陆地生态系统、湿地、含水层补给等生态环境带来负面影响,同时也可能会加剧干旱效应。换句话说,在现有工农业用水的基础上,大量增加的页岩气开采用水可能会引起对环境的累积影响^[18],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,以及区域水资源的可持续利用率减少等。

2.2 环境污染及事故灾害

近年来,Marcellus 页岩气资源开发的蓬勃发展不仅消耗了大量的水资源,也对生态环境造成了新的威胁。纽约环境保护署(NYSDEC)2009年9月起草的关于油气矿开采的环境影响评价的方案^[18]中归纳了油气资源开采对水资源、淡水湿地、生态环境和野生动植物、空气质量、自然景观及道路等的潜在影响。在Barnett页岩气开采过程中,其用水和废料的运输专车挤占了常规交通工具使用的公路,不仅在当地社区造成混乱,而且由于运输车的重量超过当地道路的承受能力,对道路也产生了严重破坏。如德克萨斯州的Parker郡由于Barnett页岩气的开采,道路受到严重破坏。实际上,类似的影响在Marcellus页岩气资源开发中同样存在。限于篇幅,下文将主要介绍Marcellus页岩气井产生的压裂液(hydraulic fracturing fluids)和地层水(natural formation water)潜在的环境危害,这两种水统称回流水(flowback water)。

回流水的体积占原来注入高压液体的30%~70%^[2],例如Marcellus页岩气井的回流水体积在50万~100万gal之间。钻探泥浆和回流水一般先存储于现场的废水池或储存车中,然后运往指定处理中心进行后期处理。回流水中除了含有高压液体中的化学添加剂成分外,还含有烃类化合物、重金属和高溶解固体(TDS)等,其中TDS组分包括钙、钾、钠、氯化物和碳酸盐以及来自气藏岩层的天然放射性物质(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)如铀、钍及其衰变产物等^[2]。Marcellus页岩管理委员会透露,回流水TDS平均含量为90g/L,硫化物含量约20mg/L,氯化物平均含量达60g/L。预测2010年TDS负荷含量为40万lb/d(1lb=0.4536kg),2020年达110万lb/d;2010年硫化物负荷含量在91lb/d左右,2020年估计为225lb/d;2010年氯化物负荷为30万lb/d,2020年约为80万lb/d。实际上,回流水的水质变化很大,有咸水(TDS含量5~35g/L)、卤水(TDS含量35~50g/L)、超饱和卤水(TDS含量50~200g/L),有些TDS甚至超过400g/L^[2]。Marcellus页岩层大部分埋深在1mi(1.6km)以上,有研究表明它是一个高放射性(highly radioactive)的页岩。尽管目前回收与循环利用方法有可能减少80%需要处理或处置的回流水,但预计2010年需处理的回流水每天仍有55万gal,2020年达150万gal/d。如

此多的高盐度回流水,若不进行及时处理或造成泄漏,对水质和生态环境的影响不可低估。由此,2009年以来针对Marcellus页岩气资源开采的环境影响、回流水处理技术、立法政策和社会经济效应等方面已经进行了多次研讨。

2010年3月的“Marcellus页岩气开采的环境影响讨论:天普大学峰会”^[20],就页岩气开采的风险、水资源和土地使用权问题、开采的立法与管理政策、回流水和河流水文地球化学指标监测方案、开采对环境和健康的累积影响评估、公民环境保护的责任等进行了交流、研讨。2010年4月的“天普大学第二个关于Marcellus页岩气开发的公开讨论会”^[21]上有报告指出,页岩气开采产生的废气中有61%的成分是对健康有害的,该镇开采地附近的许多树木因开采产生的污水和废气已经枯死或正面临死亡。

实际上,因存储池或地面蓄水设备破裂、设备故障、溢油、人为破坏、交通事故、火灾以及错误操纵等泄漏的含有有毒物质的液体,会经地面径流或地下水流入地表水体或渗透到地下土壤和含水层,造成环境污染和健康危害^[18]。Damascus民间组织在天普大学峰会上的报告指出,虽然DEP称页岩气开采中的事故发生率可能在2%~5%,但该州Dimock Cabot开采的已知事故率高达11%。该报告还指责说,尽管DEP证实Cabot地区已有23.3km²的区域被污染,使得当地居民没有可饮用水开采,但它仍在颁发在该地区及其他地区的钻探许可证。峰会的统计报告表明,每口页岩气开采时的用水量为100万~800万gal,每100万gal水中含约20t化学物质(如苯、甲醇、杀菌剂等),回流水比海水咸10倍。目前,大量回流水被倒入特拉华河流域,而该流域是宾夕法尼亚州、纽约州、特拉华州和新泽西州许多地区的饮用水来源。

3 中国页岩气资源开发前景

3.1 页岩气资源

中国国土资源部2008年12月发布了《全国矿产资源规划(2008—2015)》^[22](以下称《规划》)。《规划》对天然气资源开发提出的目标是:2008—2010年天然气新增探明储量1.5万亿~1.8万亿m³;2011—2015年新增天然气探明储量2.8万亿~3.5万亿m³;到2010年,天然气产量1100亿m³以上,2015年达1600亿m³以上。实现这些目标,光靠常规天然气和煤层气勘探开采是远远不够的,必须寻找新的天然气来源。目前,中国页岩气资源调查与勘探开发还处于探索起步阶段,至今尚未对其潜力进行全面估算^[8]。初步估算,中国页岩气资源量为30万亿~100万亿m³,超过其常规天然气资源量,大致与美国页岩气资源量相当^[4]。中国地质大学(北京)专家对比中美页岩气成藏地质条件和初步估算发现^[23-24],中国主要盆地和地区的页岩气可开采资源量约为26万亿m³,其中以南方和西北地区最为有利,分别占可采资源总量的46.8%和43%,北方和青藏地区占约10%。中国石油对四川盆地的页岩气资源量的初步估算^[9]表明,该盆地寒武系页岩气资源量为7.14万亿~14.6万亿m³,志留系页岩气资源量为2万

亿~4 万亿 m^3 。另外,四川盆地威远地区和泸州地区页岩气资源量高达 6.8 万亿~8.4 万亿 m^3 ^[41],相当于该盆地常规天然气资源总量(7.2 万亿 m^3)^[9]。上述这些初步研究表明,中国许多盆地均具有页岩气成藏的地质条件,页岩气资源潜力巨大。

页岩气资源已经引起中国油气界广泛而密切的关注,中国三大石油公司已经将页岩气勘探开发放在了非常规油气资源的首位^[8]。中国石油于 2007 年与美国新田石油公司签署了《威远地区页岩气联合研究》,2009 年又与壳牌公司在重庆富顺—永川区块启动合作勘探开发项目。2009 年 11 月,中国第一口页岩气战略调查并在重庆市彭水县连湖乡实施。2009 年,中国石油与挪威石油、埃克森美孚、壳牌、康菲等跨国石油公司开展联合研究,探索页岩气开发的国际合作方式,并且计划建立页岩气开发先导试验区^[4]。2009 年 11 月 17 日,发布了“美国—中国页岩气合作倡议”(U.S.-China Shale Gas Resource Initiative)^[25]。而且,中国正在制定的《科学发展的 2030 年国家能源战略》将页岩气摆到了重要位置^[8],发展和改革委员会与国家能源局 2009 年 9 月研究制定的“关于鼓励页岩气勘探开发利用”的政策也在征求意见和修改完善中。2010 年 3 月“两会”上,中国国民党革命委员会中央委员会(民革中央)也提交了《关于加快我国页岩气勘探开发的建议》书面提案^[26]。该提案建议将页岩气勘探开发、利用纳入“十二五”能源规划和应对气候变化方案,制定激励政策支持页岩气开发勘探,增大相关投入并设立专项资金,加快中国页岩气勘探开发。中国国土资源部公布的《我国页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想》^[8]中,提出了中国页岩气资源战略调查和勘探开发的战略目标:到 2020 年,在全国优选出 50~80 个有利目标区和 20~30 个勘探开发区,页岩气可采储量达到 1 万亿 m^3 ,2020 年实现页岩气年产能 150 亿~300 亿 m^3 ,页岩气产量达到常规天然气产量的 8%~12%。

3.2 面临的问题

中国国土资源部油气资源战略研究中心和中国石油总结了美国页岩气开采的成功经验,如国家政策的大力支持、关键技术的突破与推广、良好的市场条件与基础设施等。基于这些成功经验,对中国页岩气资源的勘探开发提出了一系列建议和措施,例如开展全国页岩气资源的调查与评价、制定优惠政策、引进和研发关键技术以及加强国际合作等^[49]。《中国页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想》^[8]中也提出了一系列页岩气资源战略调查和勘探开发的保障措施。然而,这些建议和措施都将注意力集中在了如何保障和促进页岩气资源的勘探开发技术和政策上,却忽略了中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。一方面,可以引进和自主研发页岩气开采的技术和设备,制定鼓励页岩气开采的优惠政策。然而,在积极提供页岩气资源战略调查和勘探开发的保障措施的同时,更需要加强其环境风险的识别和评估,借鉴国外先进的环境保护技术和管理理念。另一方面,需要注意页岩气开发的地理环境局限,中国特有的地理

环境和经济状况等更需要评估页岩气资源开采的可行性。

首先是水资源问题。中国是一个干旱缺水严重的国家。整体上,长江以北地区水资源普遍不足。中国水利部最近发布的《2008 年中国水资源公报》显示,东北、华北、西北和黄淮等部分地区发生了近 5 年来最严重的干旱,部分地区因干旱导致饮水困难。新华网^[27]报道,北方由于连年干旱造成资源性缺水,南方虽然水资源量较多,但由于水体被未经处理的污水污染造成水质性缺水,另外由水利工程滞后原因造成的工程型缺水在中部和西部地区尤其明显。世界自然基金会(WWF)于 2007 年 3 月 19 日发布了《世界面临最严重危险的 10 条河流》报告^[28],显示中国有 3 条河流(长江、怒江、湄公河)名列其中,它们与入选的世界其他 7 条河流一样,正面临着最严重的干涸和污染危险。报告称,长江流域几十年的重工业发展、大坝建设及大量的泥沙淤积等使长江成为世界上污染最严重的河流之一。

中国水利水电科学研究院的水资源^[29]分析显示(图 4),华北平原(黄淮海平原)、四川盆地、辽宁、山西、天山及河西走廊等地区都是重点缺水地区。而中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。四川省水资源公报数据显示(图 5),该省多年平均水资源量为 2547.58 亿 m^3 ,除 2003 年和 2006 年水资源量比多年平均值稍高外,2001 年以来该省水资源量总体呈现减少趋势,而用水量逐年递增(图 5)。其中,2006 年该省水资源总量比多年平均值偏低 26.76%,用水量比 2001 年增长了 3.5%。据中国国土资源部新一轮全国地下水资源评价的成果,四川省地下淡水天然资源($TDS < 1g/L$)每年为 545.98 亿 m^3 ,可开采资源量每年为 174.94 亿 m^3 ;四川盆地地下淡水资源每年为 389.19 亿 m^3 ,可开采资源量 153.69 亿 m^3 。根据美国页岩气井的前述统计数据,单井总平均产气

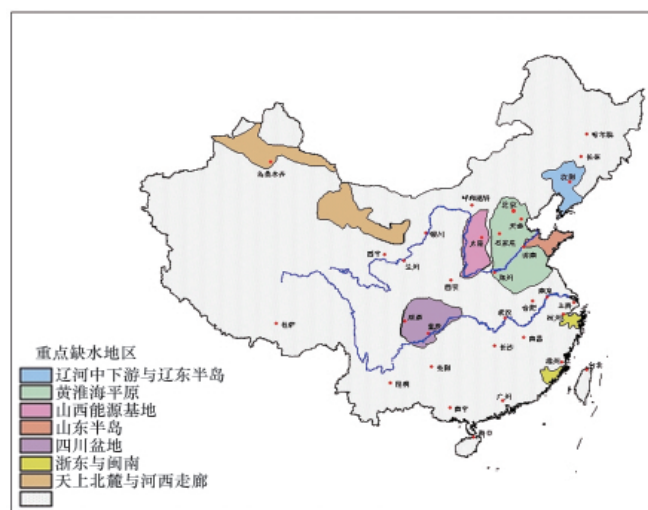


图 4 中国重点缺水地区分布示意图

(来源:中国水利水电科学研究院)

Fig. 4 Water shortage areas in China (data from China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

量约 1000m³, 每口水平井需水量多达垂直井的 5 倍, 每天需用水约 114m³。假定用 1000 口钻井开采四川盆地中 15 亿 m³ 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 24h 工作 1500d (约 4 年), 需用水 1.71 亿 m³, 相当于需消耗该盆地地下水淡水可开采资源量的 1.1% (每年 0.25%)。另外, 据四川省水资源公报, 2006 年城市居民用水 4.08 亿 m³, 工业用水量 15.87 亿 m³, 那么上述四川盆地页岩气开采每年的用水量分别占居民用水的 10.5% 和工业用水的 2.7%。虽然该水量占水资源总量的比例很小, 但该地区的区域性缺水 and 季节性缺水, 水资源的可持续利用很可能成为当地页岩气资源开采的一个局限。

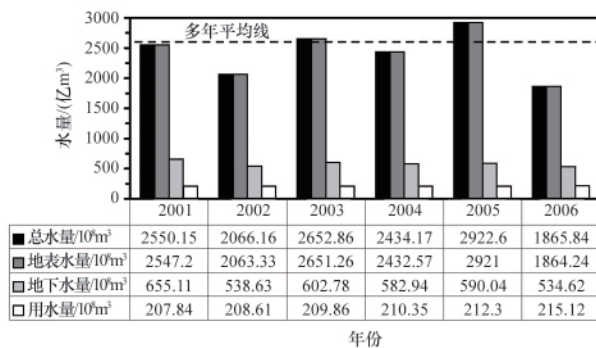


图 5 四川省 2001—2006 年水资源情况
(数据来源:四川省水资源公报)

Fig. 5 Situation of water resources during 2001—2006 in Sichuan Province (data from Sichuan Water Resources Bulletin)

其次是基础设施。建国以来, 中国兴建了大量水库调节水资源的时间不均匀性。但由于水利工程建设投资额大, 投资回报率不高, 中西部难以吸引更多建设资金, 造成了工程性缺水^[30]。以最缺水的西北地区为例, 其道路、水利工程等基础设施十分缺乏, 而页岩气资源的开采必须依靠相应的基础设施, 加大基础设施的建设无疑会大大增加页岩气资源的开采成本。以美国 Marcellus 页岩气井的开采成本为例, 垂直井为 80 万~130 万美元, 水平井为 300 万~400 万美元。因此, 基础设施很可能成为中国中西部地区页岩气开采的局限。同样, 基础设施的建设同样需要水资源的支撑, 因此, 在这些地区进行页岩气资源开发需要量水而行。

最后是环境影响与保护问题。前面的讨论说明, 页岩气资源的开采对生态环境的潜在影响是巨大的。以中国华北平原地区、沿海地区为例, 由于这些地区的地表水缺乏或水质污染严重, 那么页岩气开采的用水将主要依靠开采地下水。中国地质环境信息网报道, 全国形成了百余个区域地下水降落漏斗, 地下水水质堪忧。华北平原地区是目前地下水超采最严重的地区之一。沿海城市和地区地下水水位的下降, 引起海水入侵, 导致地下水水质恶化, 其中山东、辽东半岛海水入侵最严重。另外, 区域地下水水位下降还使平原或盆地湿地萎缩或消失、地表植被破坏, 导致生态环境退化。2006 年国务

院新闻办公室发布的《中国的环境保护(1996—2005)》白皮书^[31]指出, 中国环境与经济发展的矛盾日益突出, 资源相对短缺、生态环境脆弱、环境容量不足, 逐渐成为中国发展中的重大问题。2006 年环境保护部制定的《国家环境保护“十一五”科技发展规划》^[32]指出, 未来 5~15 年甚至更长时间内, 伴随中国经济的高速发展, 资源环境的瓶颈制约与胁迫影响将日益严峻。

可以看出, 页岩气资源的开发将对中国水资源的质与量、环境保护等提出严峻考验。目前, 针对页岩气的开采, 美国已着手进行了水资源保护和污染防治技术等相关政策的修改。而中国目前实施的水资源、环境保护政策以及正在制定的《石油天然气开采业污染防治技术政策(征求意见稿)》^[33]等还未考虑页岩气开采业引起的特殊资源环境问题。

4 启示与结语

页岩气资源的开采将对中美及世界的能源战略储备、社会经济发展起到非常重要的促进作用。然而, 目前中国各方面都把注意力集中在了如何保障和促进页岩气资源的勘探开发技术和政策上。本文以美国 Marcellus 页岩气资源开采引起的水资源和环境影响为例, 针对中国目前正在积极规划的页岩气勘探计划和构思, 提出了如下几点建议。

1) 页岩气的开采需要大量的水资源, 中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理念和环境保护技术, 避免造成水资源的浪费、污染和枯竭。

2) 由于中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。从现在起, 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。

3) 做好页岩气开采产生的回流水的处置和处理工作, 引进和自主研发回流水的关键处理技术, 严禁向河流、湖泊和土壤中排放未经处理的回流水。

4) 页岩气资源的开采需要大量的工艺设备、加工处理器以及铺设无数的集气管线。因此, 页岩气的开采应充分考虑所处区域的基础设施情况, 量水量力而行, 最大限度地降低开采和输送成本。

5) 在制定鼓励页岩气资源勘探开发优惠政策的同时, 对现有的水、土、环境保护等法律法规以及油气开采的技术政策等进行修订, 提高环境保护基准, 加大公众与舆论的参与和监督力度。坚持油气开发与环境保护并举, 真正实现社会经济与生态环境的可持续协调发展。

致谢: 本文系作者应 Michel C. Boufadel 教授 (系主任、研究中心主任) 之邀在美国天普大学环境与土木工程系和自然资源开发与保护研究中心访问期间完成的, 对 Boufadel 教授和李海龙教授在访问期间给予的大力支持和帮助致以诚挚的谢意。

参考文献 (References)

- [1] British Petroleum. BP Statistical review of world energy June 2009[R]. London: British Petroleum, 2009.
- [2] Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy. Modern shale gas development in the United States: A primer[R]. Oklahoma: Ground Water Protection Council, 2009.
- [3] Editorial. The shale revolution[J]. *Nature*, 2009, 460: 551-552.
- [4] 潘继平. 页岩气开发现状及发展前景——关于促进我国页岩气资源开发的思考[J]. 国际石油经济, 2009, 17: 12-15.
Pan Jiping. *International Petroleum Economics*, 2009, 17: 12-15.
- [5] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Editorial committee of "Series of books on the geology and exploratory development of shale gas". Recent progresses of shale gas development in the North America[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [6] American Clean Skies Foundation. North American Natural Gas Supply Assessment[R]. Chicago: Navigant Consulting Inc, 2008.
- [7] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2010[R]. Report No: DOE/EIA-0383 (2010), Washington, DC: Energy Information Administration, 2010.
- [8] 张大伟. 我国页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想[R/OL]. 2010-01-29, http://www.mlr.gov.cn/xmdt/jrxw/201001/t20100129_135471.htm.
Zhang Dawei. Shale gas resources in China's strategic research and exploration and development of strategic vision [R/OL]. 2010-01-29, http://www.mlr.gov.cn/xmdt/jrxw/201001/t20100129_135471.htm.
- [9] 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, 29(5): 1-6.
Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chun mei, et al. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 1-6.
- [10] 张金川, 汪宗余, 聂海宽, 等. 页岩气及其勘探研究意义[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 640-646.
Zhang Jinchuan, Wang Zongyu, Nie Haikuan, et al. *Geoscience*, 2008, 22(4): 640-646.
- [11] 潘仁芳, 黄晓松. 页岩气及国内勘探前景展望 [J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 1-5.
Pan Renfang, Huang Xiaosong. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(3): 1-5.
- [12] Considine T, Watson R, Entler R, et al. An emerging giant: Prospects and economic impacts of developing the Marcellus shale natural gas play [R]. Philadelphia: Department of Energy and Mineral Engineering, College of Earth & Mineral Sciences, The Pennsylvania State University, 2009.
- [13] Soeder D J, Kappel W M. Water resources and natural gas production from the Marcellus shale[R]. USGS Fact Sheet FS-2009-3032, Baltimore, MD: US Geological Survey, 2009.
- [14] US Geological Survey. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Appalachian Basin Province, 2002[R]. National Assessment of Oil and Gas Fact Sheet, USGS Fact Sheet FS-009-03, 2003.
- [15] Milici R C, Swezey C S. Assessment of Appalachian Basin oil and gas resources: Devonian shale-middle and upper paleozoic total petroleum system [R]. USGS Open-File Report 2006-1237, Reston, VA: US Geological Survey, 2006.
- [16] Engelder T. Marcellus 2008: Report card on the breakout year for gas production in the Appalachian Basin [J]. *Fort Worth Basin Oil & Gas Magazine*, 2009, 20: 18-22.
- [17] National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy. Projecting the economic impact of Marcellus shale gas development in West Virginia: A preliminary analysis using publicly available data[R]. Pittsburgh, PA: NETL, US Department of Energy, 2009.
- [18] New York State Department of Environmental Conservation. Supplemental generic environmental impact statement on the Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program[R]. Albany, NY: New York State Department of Environmental Conservation, 2009.
- [19] Gaudlip A A W, Paugh L O, Hayes T. Marcellus shale water management challenges in Pennsylvania [R]. Fort Worth: SPE Shale Gas Production Conference, November 16-18, 2008, Fort Worth, Texas, USA, 2008, doi: 10.2118/119898-MS.
- [20] Temple University Summit. Marcellus shale natural gas stewardship: Understanding the environmental impact [D]. Philadelphia: Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, 2010.
- [21] Marcellus Shale Gas Development: Potential & Pitfalls. A Presentation by the mayor of dish texas, calvin tillman, followed by panel discussion with DEP and industry representatives [D]. Philadelphia: Department of Civil and Environmental Engineering, Temple University, 2010.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 全国矿产资源规划 (2008-2015 年)[R]. 2008.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National Mineral Resource Planning (2008-2015)[R]. 2008.
- [23] 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.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 136-140.
- [24] 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.
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 109-114.
- [25] Office of the Press Secretary, The White House. Statement on US-China Shale Gas Resource Initiative: Initiative to help reduce greenhouse gas emissions, promote energy security [R/OL]. 2009-11-17, <http://www.america.gov/st/texttrans-english/2009/November/20091117145333xjs-nommis0.4233515.html>.
- [26] 中国国民党革命委员会中央委员会. 关于加快我国页岩气勘探开发的建议[R/OL]. 2010-03-04, http://test.china-online.com.cn/minge/index/txt/2010-03/04/content_3403403.htm.
The Revolutionary Committee of the Chinese Kuomintang. Proposals on the shale gas exploration and development in China [R]. 2010-03-04, http://test.china-online.com.cn/minge/index/txt/2010-03/04/content_3403403.htm.
- [27] 新华网. 中国水资源现状 [R/OL]. 2005-09-19. http://news.xinhuanet.com/fortune/2005-09/19/content_3512629.htm.
XinhuaNet. The status of water resources [R/OL]. 2005-09-19. http://news.xinhuanet.com/fortune/2005-09/19/content_3512629.htm.
- [28] Wong C M, Williams C E, Collier U, et al. World's top 10 rivers at risk [R]. Gland, Switzerland: World Wildlife Fund International, 2007.

- [29] 中国水利水电科学研究院, 水利部水文局. 重点缺水地区分布示意图 [EB/OL]. 2010, <http://sdinfo.chinawater.net.cn/waterresources/ws001.jpg>.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research; Department of Hydrology, The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Map of key water shortage areas [EB/OL]. 2010, <http://sdinfo.chinawater.net.cn/waterresources/ws001.jpg>.
- [30] 中华人民共和国国务院. 国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定[R/OL]. 2005-12. <http://www.mep.gov.cn/ztbd/jd/>.
The State Council of People's Republic of China. Decision of the state council on implementing scientific outlook on development and strengthening environmental protection [R/OL]. 2005-12, <http://www.mep.gov.cn/ztbd/jd/>.
- [31] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的环境保护 (1996-2005) [R]. 2006-06, http://www.gov.cn/zwgk/2006-06/05/content_300288.htm.
Information Office of the State Council of People's Republic of China. Environmental protection in China (1996-2005)[R/OL]. 2006-06, http://www.gov.cn/zwgk/2006-06/05/content_300288.htm.

- [32] 国家环境保护总局. 国家环境保护“十一五”科技发展规划[R/OL]. 2006-06-22. http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_E24445620A09F71589EB67095146332D7B080200/filename/7384.pdf.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China National Environmental Protection Plan in the Eleventh Five-Years (2006-2010) [R/OL]. 2006-06-22, http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_E24445620A09F71589EB67095146332D7B080200/filename/7384.pdf.
- [33] 中华人民共和国环境保护部科技标准司. 石油天然气开采业污染防治技术政策 (征求意见稿)[R/OL]. 2009-10-13, http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_6D1A882D121EEC92AD6F35DEA06602FF10570200/filename/W020091019369619465677.pdf.
Department of Science, Technology and Standards, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Oil and gas industry pollution control technology policy (Draft)[R/OL]. 2009-10-13, http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_6D1A882D121EEC92AD6F35DEA06602FF10570200/filename/W020091019369619465677.pdf.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“纺织空调除尘高效节能减排技术研讨会”征文

中国纺织工程学会将于2010年12月1日在北京召开“纺织空调除尘高效节能减排技术研讨会”。

征文内容:当前低碳经济下的暖通空调制冷新技术;蒸发冷却空调技术在低碳经济中的作用;纺织空调除尘系统与设备的新技术与节能;“煤灰纱”治理的新方法和新措施;其他相关的新技术与新设备。

征文截止时间:2010年11月10日。

联系方式:电话:13801080984, 传真:010-65016538, 电子信箱:zhangru777@126.com。

会议网站:www.ctes.com.cn。

·学术动态·



“第二届全国平行管理会议”征文

中国自动化学会将于2010年12月18-19日在北京召开“第二届全国平行管理会议”。

征文内容:平行管理的理论和方法研究,基于计算与仿真的管理学研究,人工系统与复杂系统的建模个体和群体的心理、认知、行为研究,代理技术、人工智能、数据挖掘、人机交互等信息技术在管理中的研究与应用,管理决策、评估系统的研究,面向社会问题的管理理论和方法研究,面向工程问题的管理理论和方法研究,突发事件应急管理研究;管理与可持续发展战略,中国所面临的关键管理问题,面向军事问题的管理理论与方法研究,基于数字化流程的平行管理理论,基于演化仿真的平行管理理论,计算组织理论研究,复杂系统与复杂网络建模研究,舆论传播管理理论与方法研究,复杂系统同步动力学行为研究。

征文截止时间:2010年11月18日。

联系方式:电话:0731-84573557, 电子信箱:yf.nudt@gmail.com。

会议网址:<http://www.mrscn.com/notice.asp?id=39>