

涪陵页岩气田绿色开发关键技术

刘尧文

(中国石化江汉油田分公司页岩气勘探开发管理部,湖北潜江 433124)

摘 要:涪陵页岩气田地处山区,地下暗河溶洞发达,人口密集,开发过程中面临着环境保护问题。结合涪陵页岩气田地表自然环境特征和页岩气开发工程特点,分析了涪陵页岩气田开发过程中面临的主要环境问题,开展了土地集约化利用、水资源节约与保护、油基钻屑无害化与资源化利用、钻井和压裂污水循环利用及页岩气田开发绿色环境管理模式等技术研究,形成了适用于涪陵页岩气田的绿色开发技术体系。现场应用表明,应用绿色开发技术体系后节约土地 62.1%,钻井和压裂污水循环利用率达到 100%,处理后的油基钻屑含油率低于 0.3%,二氧化碳减排 64.47×10^4 t,实现了页岩气田开发零污染。研究认为,涪陵页岩气田绿色开发技术对我国页岩气田规模化开发中的环境保护具有示范作用和借鉴价值。

关键词:页岩气;环境保护;油基钻屑;污水处理;噪声污染;涪陵页岩气田

中图分类号:TE992 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2018)05-0008-06

Key Technologies of Green Development in the Fuling Shale Gas Field

LIU Yaowen

(Management Department of Shale Gas Exploration and Development, Sinopec Jianghan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei, 433124, China)

Abstract: The Fuling Shale Gas Field is located in a mountainous area, with well developed underground rivers and karst caves. It also has a highly concentrated population, so the shale gas development in this field is faced with environmental protection problems. Combined with the characteristics of surface natural environment in the Fuling Shale Gas Field and features of shale gas development engineering, the main environmental issues encountered in the development of the Fuling Shale Gas Field were analyzed. Studies on intensive land utilization, water conservation and protection, environmentally neutral utilization and disposal of oil-based drill cuttings, recycling of drilling and fracturing wastewater, and green environment management mode of shale gas development were conducted. They were used in order to establish the green development technology system suitable for the Fuling Shale Gas Field. Field applications showed that after applying the green development technology, the land occupation was reduced by 62.1%, the recycling rate of drilling and fracturing wastewater reached 100%, the oil content of treated oil-based drill cuttings is less than 0.3%, and carbon dioxide emission has been reduced by 64.47×10^4 t. Thus, the goal of "zero pollution" was realized during shale gas field development. The green and environmental protection development technology of the Fuling Shale Gas Field has served as a valuable model in the environmental protection of large-scale development of shale gas fields in China.

Key words: shale gas; environmental protection; oil-based drilling cuttings; sewage treatment; noise pollution; Fuling Shale Gas Field

自开发页岩气以来,美国、加拿大等国家出台了一系列经济和环保政策来规范管理页岩气开发,但环境问题仍然是页岩气开发过程中的短板,如美国在开发初期的环保立法落后于技术创新,导致近年来环境问题集中出现,延缓了开发步伐。我国对页岩气田开发中的环境保护非常重视,绿色开发工作稳步推进,在地下水保护、水资源利用、废弃物处理

收稿日期:2018-04-10;改回日期:2018-08-13。

作者简介:刘尧文(1967—),男,湖南浏阳人,1988年毕业于西安石油学院采油工程专业,2008年获长江大学石油与天然气工程专业硕士学位,高级工程师,主要从事页岩气田开发方面的研究与管理工。E-mail:liuyw.jhyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”(编号:2016ZX05060)部分研究内容。

和大气污染物防控等方面的技术水平与美国相当,具有中国特色的土地集约化利用技术甚至处于领先水平^[1-3]。

目前,我国页岩气开发主要集中在涪陵页岩气示范区、长宁-威远页岩气示范区、云南昭通页岩气示范区和延安陆相页岩气示范区等 4 个国家级示范区。其中,长宁-威远页岩气示范区进行了以“减量化、无害化、资源化”为重点的清洁生产技术应用,取得了较好的效果;云南昭通页岩气示范区和延安陆相页岩气示范区也进行了高效开发模式的有益探索。以上 3 个示范区在绿色开发方面做了积极的探索和实践,取得了较好的效果,但对绿色开发进行系统总结的报道很少^[4]。截至目前,涪陵页岩气田是我国规模最大、首个实现大规模商业化开发的整装海相页岩气田,自 2013 年初启动产能建设以来,始终以保护青山绿水为宗旨,以环保技术创新为驱动,以环境管理体系和技术体系为保障,较好地保护了当地的环境,极大地推动了我国页岩气开发行业的绿色健康发展和商业化进程。为此,笔者深入总结分析了该气田绿色开发实践及取得的成效和经验,以期对其他区块的页岩气田绿色高效开发提供有益借鉴。

1 页岩气田开发面临的环境保护问题

涪陵页岩气田地处武陵山脉,山体植被茂盛,地表沟壑纵横,地下暗河、溶洞发达,区内人口分布密集,开发中存在的潜在环境风险,会影响生态及居民生活。

1.1 土地占用

一般情况下,页岩气井单井产量比常规天然气井低,建成同等产能的页岩气田所需气井数量比常规气田多,占用土地资源多。据统计,美国页岩气田的单个井场面积为 12 000~28 000 m²^[10]。目前,涪陵页岩气田单个井场的占地面积约为 7 800~12 000 m²。涪陵地处山区,人口密集,土地资源紧张,可能会加剧人地矛盾,导致土地资源更加紧张^[9]。

1.2 水资源消耗与污染

页岩气田开发采用水平井大型水力分段压裂技术,用水量是常规天然气直井压裂的 5 倍左右,因此,消耗大量水资源会对当地居民用水造成影响^[5-6]。涪陵页岩气田地处山区,水资源匮乏,而每口井压裂平均用水量达到 3.5×10^4 m³。大量

消耗水资源,不仅给周边或区域水资源供应提出挑战,而且对当地植被和城乡生活与工业用水产生较大影响。

另外,涪陵地区地下裂缝发育,存在暗河溶洞,钻井过程中易发生井漏,若钻井液大量漏失将污染地下水;同时,如果控制不当,还存在井喷风险,不仅造成井眼报废、人员伤亡的恶性事故,还会破坏地面植被、严重污染水资源。页岩气开发采用水力压裂技术,试气过程中返排污水量大,水质复杂,处理难度较大。

1.3 油基钻屑污染

页岩地层黏土含量高,遇水易发生水化膨胀,导致井眼失稳。目前页岩地层主要采用油基钻井液钻进,由此产生的钻屑含油量大,处理难度大;并且页岩气田开发钻井数量多、水平段长,油基钻屑产生量大。涪陵页岩气田开发之前,国内无成熟可靠的处理技术。

1.4 温室气体排放

页岩气的主要成分为甲烷,其进入大气层产生的温室效应远高于二氧化碳。研究认为,页岩气井压裂液返排和采气过程甲烷泄露比较严重,约占页岩气产量的 3.6%~7.0%^[7]。据统计,测试排液阶段页岩气的平均排放量约占预测总产量的 1.6%,储层压力越高,逸散量越大^[8]。由于页岩气水平井钻完井和分段压裂作业过程耗时较长,导致甲烷泄露量较大,一般是常规天然气开发的 30%~100%。

1.5 噪声

页岩气田开发时,钻机、压裂车等重型机械设备运行时会产生高分贝噪声污染;页岩气集输系统中的空气压缩机长期运行也会持续产生噪声污染,严重影响周边居民的身心健康^[9]。

2 页岩气田绿色开发关键技术

2.1 土地集约化利用技术

页岩气田开发钻井数量多、占地面积大,研究采用丛式水平井布局优化设计、土地复垦等技术,形成了页岩气田土地集约化利用技术,并在涪陵页岩气田全面推广应用,减小了用地面积,缓解了人地矛盾。

2.1.1 丛式水平井布局优化

传统钻井采用单井平台,占地面积约 7 920 m²,占地很大,为此通过数学模拟研究优选了丛式井布井方式,并对钻井平台修建方案进行了优化。现场试验中,涪陵页岩气田实现了 4~9 口的丛式井布井方式,并结合山地“井工厂”技术,最大程度节约了土地使用面积、缩短了钻井周期,降低了对区域生态环境的影响^[10-11]。

2.1.2 井场分区防渗保护土壤技术

为保护井场平台周边土壤,根据井场钻井工程要求并结合地下水防渗要求,对井场采取分区防渗措施。井口区采用厚度为 800.0 mm 的钢筋砼;机房、油罐、泵基础采用厚度为 200.0 mm 的 C30 砼;循环罐、储备罐基础采用厚度为 300.0 mm 的 C30 砼;排污沟底部浇筑厚度为 250.0 mm 的 C20 砼,沟

壁浇筑厚度为 400.0 mm 的 C20 砼,污水沟均采用 P6 防渗砼;井场污水池、清水池及放喷池均采用钢筋砼结构防渗。以上措施有效避免了钻井过程中渗漏对土地造成的污染。

2.1.3 土地复垦

按照集约用地原则,气井完钻后仅将井口外扩 30.00 m 范围、集气站、保留的清水池及污水池和 1 座放喷池占地作为永久征地使用,对井场外围用地、1 座放喷池、管线施工临时用地等临时扰动区域进行土地复垦,尽可能地减少永久占地面积,增加复垦区域。根据涪陵页岩气田的开发特点及社会经济实际情况,建立了完善的复垦评价机制,选择地表改造难易程度、地面坡度、土源保证率、社会因素和土壤有害物质含量作为评价指标,结合相关规程和标准,制定了适宜性土地复垦评价标准(见表 1)。

表 1 土地复垦评价指标划分标准

Table 1 Criterion of evaluation indicators about land reclamation

限制因素	分级指标	耕地评价	草地评价	
地表改造难易程度	几乎不需	1 等	1 等	
	难度小	1 等	1 等	
	难度较大	2 等或 3 等	2 等或 3 等	
	难以改造	不适宜	3 等	
地面坡度/(°)	≤6	1 等	1 等	
	6~15	2 等	1 等	
	15~25	3 等	2 等	
	>25	不适宜	3 等	
土壤保证率,% (耕地土壤厚度按 40.0 cm, 草地土壤厚度按 15.0 cm 计算)	80~100	1 等	1 等	
	60~80	1 等或 2 等	2 等	
	40~60	3 等	3 等	
	≤40	不适宜	不适宜	
社会因素	原地貌为耕地	1 等	1 等	
	原地貌为 非耕地	≤267	1 等	1 等
		267~467	2 等	1 等
		467~667	2 等或 3 等	1 等
		>667	3 等	1 等
	距村庄距离/m	≤500	1 等	1 等
		500~1 500	2 等	1 等
1 500~3 000		3 等	1 等	
>3 000	不适宜	1 等		
土壤有害物质含量	低于土壤质量标准二级	1 等	1 等	
	高于土壤质量标准二级低于三级	2 等或 3 等	1 等	
	高于土壤质量标准三级	不适宜	2 等或 3 等	

2.2 水资源节约与污染防控技术

遵循“减量化—再利用—再循环”的原则,从源头防控、过程保护和循环利用等方面入手,选用绿色化工原料,实现了工业污水的全部回收利用,万元产值耗水量仅 $0.63 \text{ m}^3/\text{万元}$,远低于其他行业。

2.2.1 钻井过程水污染防控

1) 井位优选防污技术。按照“工程服从地质、地面服从地下;地质兼顾工程、地下兼顾地面”的原则,在三维地形地貌图上整体部署平台位置后,严格按照安全、环保、土地、林业、水利、交通和规划等法律法规进行野外踏勘选址,适当调整井位,避开自然保护区、风景名胜区、森林公园等环境敏感区,避开滑坡、泥石流等地质灾害区域。

采用以探测岩石介质的导电性差异为基础的高密度电阻率法,对平台近地表进行勘查,进行安全评估,井眼轨迹避开地下暗河、溶洞、岩溶大泉区等地下水敏感区域,防止钻井过程中钻井液漏失污染地下水。以焦页 X 号平台为例,其高密度电阻率法成果如图 1 所示。

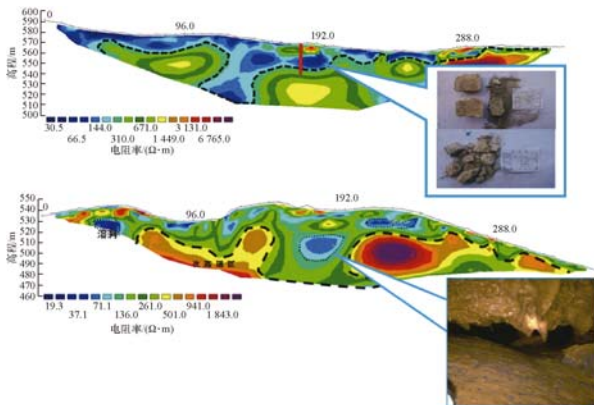


图 1 焦页 X 号平台高密度电阻率法成果

Fig. 1 Results of high density resistivity method survey on Jiaoye X platform

2) 井身结构优化技术。针对涪陵页岩气田区域裂缝岩溶发育、钻井易漏失等问题,充分考虑地下水保护,创新设计了“导管十三段式”井身结构(见图 2)。一开封固飞仙关组,及早封隔了浅层水系,避免后续钻井时钻井液对浅层地下水的污染;二开封固龙马溪组页岩地层之上的易漏、易垮塌层,确保井眼不漏失。采用高钢级套管、固井水泥返至地面等措施,确保井筒密封完整,彻底隔离浅层水系。

3) 环保钻井液体系。为了防止钻井液污染浅层地下水,井深 $1\,500.00 \text{ m}$ 以浅选用只含膨润土、

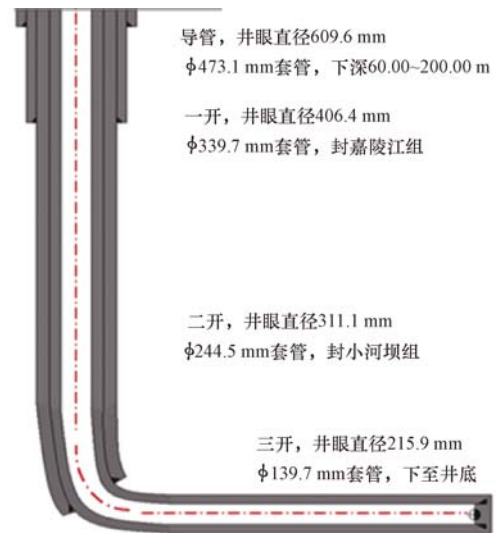


图 2 “导管十三段式”井身结构

Fig. 2 Casing program of “conductor and three sections”

无化学添加剂的清水钻井液体系,确保不污染地下水; $1\,500.00 \sim 2\,500.00 \text{ m}$ 直井段采用环保型水基钻井液体系,其主要添加剂为天然矿物(植物)类和改性天然高分子等绿色化工药剂; $2\,500.00 \text{ m}$ 以深井段采用可回收再利用的油基钻井液体系,主要成分为无毒或低毒材料。

2.2.2 压裂试气过程水污染防控

压裂前对井下套管、地面管线及作业装置进行高压密封测试,确保压裂过程中地面不渗漏、井眼无漏失。为避免影响当地群众的生产生活用水,压裂用水均取自乌江工业园区的生产用水,通过密闭管线系统集输至各压裂施工平台。压裂液体系不含重金属、有毒有害有机物,具有无腐蚀、无残渣和低伤害的特性。压裂液进入地层后会随着温度升高和时间延长自动破胶变成水溶液,并随着采气返排地面,避免了对地下水资源的污染。

2.2.3 污水处理及循环利用技术

为了减少污水产出,钻井完井和开发过程中严格控制钻井、压裂和采气污水的总量,平均单井产生钻井污水约 500 m^3 、试气污水低于 $1\,200 \text{ m}^3$ (返排率约 4%)、采气污水 $2 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为了节约用水,有效利用污水,研究了钻井污水、压裂废液的处理、检测和循环利用技术(如图 3 所示),污水经处理检测合格后,按一定量加入压裂液进行混配,实现了工业污水零排放,利用率达到 100%,同时降低了压裂作业成本。

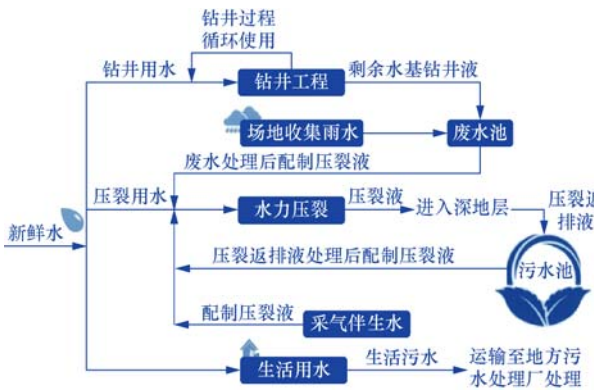


图3 涪陵页岩气田污水循环利用示意

Fig.3 Diagram of waste water recycling in Fuling Shale Gas Field

2.3 油基钻屑处理与资源化利用技术

涪陵页岩气水平井采用以柴油为基液的油基钻井液钻进储层,其钻屑属于高污染废弃物,不能直接固化填埋。为此,基于油基钻屑处理“不落地、无害化”原则,研究了油基钻屑热解吸处理技术,研制了油基钻屑热解吸装置。现场应用后,钻屑含油率由10.0%~20.0%降至0.3%以下,远低于北美2.0%的行业标准。处理后的钻屑残渣固化后集中填埋封存,实现资源回收和环境保护的双重效益,达到了油基钻屑的“资源化、减量化、无害化”处理目的,油基钻屑无害化处置率达到100%,油的回收率接近100%。研制了岩屑资源化利用装备,处理后的岩屑可制备免烧砖、混凝土等,已建成免烧砖5000块/d、混凝土100m³/d的生产能力,替代了传统的就地固化处理工艺,实现了钻屑的资源化利用。

2.4 大气污染防治技术

2.4.1 试气和采气过程中的气体减排控制

为了减少试气过程中井口放喷时页岩气燃烧产生的废气,开发了可回收利用型地面测试系统,研制了配套的自力式调节阀,研究了试气与采气一体化减排技术,形成了“边测试、边进站生产”工艺,大大减少了页岩气放喷燃烧时产生的废气量。

采气过程中采用密闭集输流程,对含气返排液进行气液分离,气体进入管网输送;采用撬装式、快装式地面CNG装置,确保单井探井产出气及时充装外销;制定集输设备检漏维修程序,避免异常泄露;集输管网、场站设置放空燃烧塔,可实现快速自动点火,避免甲烷气体排放。

2.4.2 柴油机组废气减排控制

钻机一般采用柴油机或柴油机发电机组作为动

力源,使用过程中能耗比较高,能量转换率较低,排出的CO₂等温室气体污染大气环境,且机械传动产生的噪声比较大,影响当地居民的生活。通过钻机改造,可将钻机的动力来源由柴油改为电能,使用高压电网替代柴油为钻机提供动力,从而减少能量消耗和二氧化碳排放。钻机实施网电改造需要解决以下问题:1)动力模块替代,就是把原来的柴油机驱动替换为电机驱动;2)网电接入变压和调整控制问题。根据井队实际情况进行设备对接,优化配置,网电设备达到安全可靠平稳运行,实现利用高压网电进行钻井作业。

2.5 噪声污染防控措施

为减少噪声,严格控制钻前施工机具作业时间和试气压裂求产时间,每天22:00—6:00期间严禁动用高噪声机具作业;选用自带消声器的固定机械设备并加装减震底座;集气站的水套炉换热系统改为两级节流换热系统,用吸声棉包裹管网,噪声降低5~10dB;大力推广网电钻机,钻机井场噪声基本符合国家工业场界噪声排放标准。

3 应用效果分析

3.1 土地集约化与复垦

涪陵页岩气田全面推广应用丛式水平井模式,减小占地面积。以ZJ50型钻机井场为例,采用单井模式所需井场面积为7920m²,采用丛式水平井平台技术后单井面积为3000m²,同比减小占地面积62.1%。此外,对涪陵页岩气田具备复垦条件的平台及集输管线开展了土地复垦技术应用,复垦土地面积61.04×10⁴m²,其中平台区复垦面积8.44×10⁴m²,集输管线复垦面积52.60×10⁴m²。

3.2 水资源节约与污染防控

页岩气田开发涉及钻井、压裂、试气和采气等多个工序,产生的污水主要包括钻井污水、压裂返排液和气井采出水。采用清水钻进技术,累计减少水基钻井液使用量20000m³;应用井身结构优化技术,累计减少钻屑产生量26666.4m³,减少清水使用量约271000m³,节约了大量的水资源,同时避免了地下水污染,取得了较好的经济效益、社会效益和环保效益。污水重复利用技术实现了污水循环利用率100%,累计重复利用污水119×10⁴m³,节约水费1300万元,减少了水消耗,实现了工业污水零排放。

3.3 废弃物处理

涪陵页岩气田共建设了7个油基钻屑回收利用厂(站),油基钻屑设计处理能力 $300\text{ m}^3/\text{d}$,实际处理能力 $230\sim 320\text{ m}^3/\text{d}$ 。涪陵页岩气田开发以来,累计处理油基钻屑 $72\ 000\text{ m}^3$,处理率达到100%。水基钻屑全部实现污水池就地固化回填,处理率达到100%。另外,采取了化工料桶厂家回收和生活固体垃圾统一收集后由环保部门统一处理等措施,涪陵页岩气田钻井固体废物处理实现处理率100%,达标率100%。

3.4 大气污染防治

为了减少钻井过程中柴油机组的燃油废气对大气造成的污染,实施了网电改造,动力由“油”变“电”。截至2017年底,涪陵页岩气田41部钻机进行了网电改造并投入使用,现场施工363口井,节省成品油 $14.91\times 10^4\text{ t}$,减少 CO_2 排放量 $62.70\times 10^4\text{ t}$,取得良好的经济和社会效益。

为减少试气投产过程中的碳排放量,在涪陵页岩气田推广应用了可回收利用型页岩气井地面测试技术,成功率100%,累计回收页岩气 $960\times 10^4\text{ m}^3$ 。例如,焦页X井采用可回收利用型页岩气井地面测试系统进行放喷测试,累计进站回收页岩气 $49.7\times 10^4\text{ m}^3$,二氧化碳减排量达 914.48 t 。应用大气污染防治技术以来,累计减少页岩气放空燃烧量 $960\times 10^4\text{ m}^3$,减少二氧化碳排放量 $1.77\times 10^4\text{ t}$ 。

3.5 噪声污染防治

柴油在燃烧过程中会产生大量的碳烟微粒和氮氧化物,实施网电钻机改造后,提高了清洁能源利用率,减少了钻井作业现场柴油燃烧废气,同时降低了施工噪声,噪声声压由 $93.1\sim 94.3\text{ dB}$ 降至 76.1 dB ,改善了现场施工环境,减轻了施工噪声对周边居民的影响。

4 结论与建议

1) 涪陵页岩气田开发采用了系列绿色清洁生产生产技术,制定了管理体系,实现了资源开发与环境保护并重的目标。

2) 涪陵页岩气田应用绿色开发技术后,油基钻屑含油率降至 0.3% ,二氧化碳排放量、井场占地面积、水资源消耗和污染均大幅减小,对国内页岩气田绿色环保开发具有较好的示范作用和借鉴价值。

3) 建议尽快建立、健全和完善页岩气田开发环保行业标准、持续加强油基钻屑处理技术、装备和标准规范研究攻关,实现集中处理,为页岩气田绿色清洁开发提供标准和技术支持。

参 考 文 献

References

- [1] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1-6.
WANG Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.
- [2] 周贤海, 臧艳彬. 涪陵地区页岩气山地“井工厂”钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 45-49.
ZHOU Xianhai, ZANG Yanbin. Application of “well factory” drilling technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 45-49.
- [3] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 等. JY1HF页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80.
ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng, JIA Changgui, et al. Large-scale multi-stage hydraulic fracturing technology for shale gas horizontal Well JY1HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 75-80.
- [4] 刘志雄. 我国能源安全保障与环境保护的相互关系及影响机制[J]. 科学·经济·社会, 2014, 32(2): 125-130.
LIU Zhixiong. Research on the relationship and influence mechanism of energy security and environmental protection in China[J]. Science · Economy · Society, 2014, 32(2): 125-130.
- [5] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2011; with projection to 2035[EB/OL]. <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/demand.html>, 2011-04-08.
- [6] Ground Water Protection Council, All Consulting. Modern shale gas development in the United States; a primer[R]. Oklahoma: Ground Water Protection Council, 2009.
- [7] 王楠. 页岩气开发环境问题研究[J]. 当代经济, 2013(1): 62-65.
WANG Nan. Research on environmental problems in shale gas development[J]. Contemporary Economics, 2013(1): 62-65.
- [8] HOWARTH R W, SANTORO R, INGRAFFEA A. Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations[J]. Climatic Change, 2011, 106(4): 679-690.
- [9] 王亚运, 柯研, 周晓珉, 等. 页岩气勘探开发过程中的环境影响[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(3): 50-53.
WANG Yayun, KE Yan, ZHOU Xiaomin, et al. Environmental impact during shale gas exploration and development process[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2012, 22(3): 50-53.
- [10] ARTHUR J D, COUGHLIN B J, BOHM B K. Summary of environmental issues, mitigation strategies, and regulatory challenges associated with shale gas development in the United States and applicability to development and operations in Canada[R]. SPE 138977, 2010.
- [11] 陈平, 刘阳, 马天寿. 页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 1-7.
CHEN Ping, LIU Yang, MA Tianshou. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 1-7.

[编辑 滕春鸣]