

# 西部地区油气资源开发与水资源协同发展模式探索

朱永楠<sup>1</sup>, 苏健<sup>2</sup>, 王建华<sup>1</sup>, 李国欣<sup>3</sup>, 刘合<sup>2</sup>, 何国华<sup>1</sup>, 姜珊<sup>1</sup>, 张国生<sup>2</sup>, 马建国<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司, 北京 100027)

**摘要:** 西部地区是我国油气增储上产的重要区域, 也是我国最干旱、最缺水的地区, 能源-水资源之间存在复杂的纽带关系, 加强能源-水资源领域的协同管理至关重要。本文在宏观研判我国西部地区油气生产前景和布局的基础上, 以中国石油位于西部地区的 7 家油气田企业为例, 调研不同类型油气田开发模式与用水现状, 分析油气田开发过程中的水资源、水环境保障风险。研究表明, 近年来西部地区油气产量稳步增加, 随着污水回收处理和循环利用效率的不断提升, 油气田新鲜水用量变化不大。但考虑到非常规油气资源的逐步开发, 未来西部地区油气开发很可能对区域地表和地下水系统带来诸多影响。建议发展精准注水和无水压裂技术实现稳油控水, 加大油气田生产水的循环利用和科学用水管理, 完善水资源综合配置保障体系, 在提升能源产业用水安全保证程度的同时全方位降低油气开发对水系统的影响, 以实现西部地区能源与水资源协同安全。

**关键词:** 西部地区; 油气资源开采; 水资源; 能源与水; 协同发展

**中图分类号:** TE341 **文献标识码:** A

## Coordinated Development Mode of Oil and Gas Resources and Water Resources in Western China

Zhu Yongnan<sup>1</sup>, Su Jian<sup>2</sup>, Wang Jianhua<sup>1</sup>, Li Guoxin<sup>3</sup>, Liu He<sup>2</sup>, He Guohua<sup>1</sup>, Jiang Shan<sup>1</sup>, Zhang Guosheng<sup>2</sup>, Ma Jianguo<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Exploration and Production Company, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Western China is an important area for increasing oil and gas reserves and production in China, and it is also the most arid and water-deficient area in the country; there is a complex linkage between energy and water resources in this region. Hence, it is important to promote the coordinated management of energy and water resources. In this article, we review the prospects and deployment of oil and gas production in Western China, investigate the development mode and water utilization status of different oil and gas fields from seven companies of China National Petroleum Corporation in Western China, and analyze the guarantee risks of water resource and water environment during gas and oil development. The research shows that oil and gas production has steadily increased in Western China in recent years, and the consumption of fresh water in oil and gas fields has changed little, owing

**收稿日期:** 2020-12-28; **修回日期:** 2021-05-18

**通讯作者:** 刘合, 中国石油勘探开发研究院教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为能源与矿业工程管理、能源与水纽带关系;

E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

**资助项目:** 国家自然科学基金基础科学中心项目 (72088101); 中国工程院咨询项目“中国西部地区化石能源与水资源协同发展战略研究”(2019-XZ-33)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

to the continuous improvement in sewage treatment and recycling efficiency. However, considering the progressive development of unconventional oil and gas resources, future oil and gas development in Western China is likely to significantly affect the surface and underground water systems. It is suggested to develop precise water injection and waterless fracturing technology to stabilize oil production and control water use, increase the recycling of produced water to strengthen scientific water management, and improve the comprehensive allocation guarantee system of water resources, so as to reduce the impact of oil and gas development on water system while ensuring water use security for energy industry, thereby realizing the coordinated development of energy and water resources in Western China.

**Keywords:** Western China; oil and gas resource exploitation; water resource; energy and water; coordinated development

## 一、前言

能源是人类社会生存和发展的重要物质基础,攸关国计民生和国家安全竞争力[1]。在我国能源格局中,西部鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地所在的内蒙古、山西、陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海、四川等地区(本文简称为西部地区)是油气资源的富集区[2],资源探明率低,勘探开发潜力大,对于保障我国能源安全具有重要的战略地位。同时,西部地区作为我国水资源最短缺的地区[3],多年平均降水量为365.8 mm,水资源量为 $5.2747 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,仅占全国水资源总量的19%。因此西部地区是我国能源与水资源协同安全最富挑战的地区,目前水资源可利用量和生态环境保护已经对区域油气资源的开发形成了明显约束[4]。

识别西部地区水资源与能源保障风险,构建油气产业与区域资源环境的协同发展政策与技术体系,是实现我国能源产业可持续发展的关键,也是推进西部大开发战略稳步实施的重要环节。在中国工程院战略咨询项目“中国西部地区化石能源与水资源协同发展战略研究”的支持下,项目组从气候、水资源、油气、煤炭等多角度探讨西部地区能源与水资源可持续发展的路径。本文在宏观研判我国西部地区油气生产前景和布局的基础上,以中国石油位于西部地区的7家油气田企业为例,分析油气田开发用水现状和用水问题,提出保障西部地区油气资源与水资源协同发展的技术策略和管控建议。

## 二、西部地区油气发展与用水现状

### (一) 西部地区油气发展现状

近年来我国能源需求快速增长,对外依存度不断升高。稳定和发展国内能源产业,对维持我国经

济社会顺利运转、保障经济发展有着重要的意义。

在我国能源格局中,西部地区是全国化石能源最富集的地区和重要战略接替区,是能源的主要输出区,已探明的石油资源储量为 $6.672 \times 10^{10} \text{ t}$ [5],常规天然气储量为 $5.17 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,页岩气储量为 $7.77 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,分别占全国的42%、76%和71%。2014年国务院办公厅印发的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》(国办发[2014]31号)以及2016年国务院批复的《全国矿产资源规划(2016—2020年)》(国函[2016]178号),都提出以塔里木、鄂尔多斯、准噶尔等盆地为重点“增储上产”区域,加大油气勘探开发力度,提高油气产量,并提出重点建设9个千万级大油田、8个年产量百亿立方米级天然气生产基地,其中西部地区共有包括新疆、塔里木、长庆、延长等4个大型油田和鄂尔多斯、沁水等天然气生产基地。

2000年以来,依靠地质理论创新和工程技术进步,我国在四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、准噶尔盆地取得了多项重大油气发现[2,6]。近年来,西部地区油气储量快速增长,石油、天然气探明储量分别从2000年的 $2.71 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $4.007 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 增长至2018年的 $5.39 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $6.301 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。与此同时,区域油气产量稳步提升(见图1),石油、天然气年产量分别从2000年的 $2.927 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $1.52 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增长至2018年的 $6.549 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $1.32 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ;石油、天然气全国产量占比分别从2000年的18%、55%增长至35%和83%,战略接替地位日益凸显。

### (二) 西部地区油气开发用水现状分析

石油、天然气作为水资源需求非常集中和强烈的能源类型,水资源的消耗贯穿油气勘探开发的整个过程,需要消耗大量的水资源(见表1)。油气勘探是寻找、探明油气储量的基础,是油气开采的第一个环节。其中,钻井勘探是研究储油构造、探

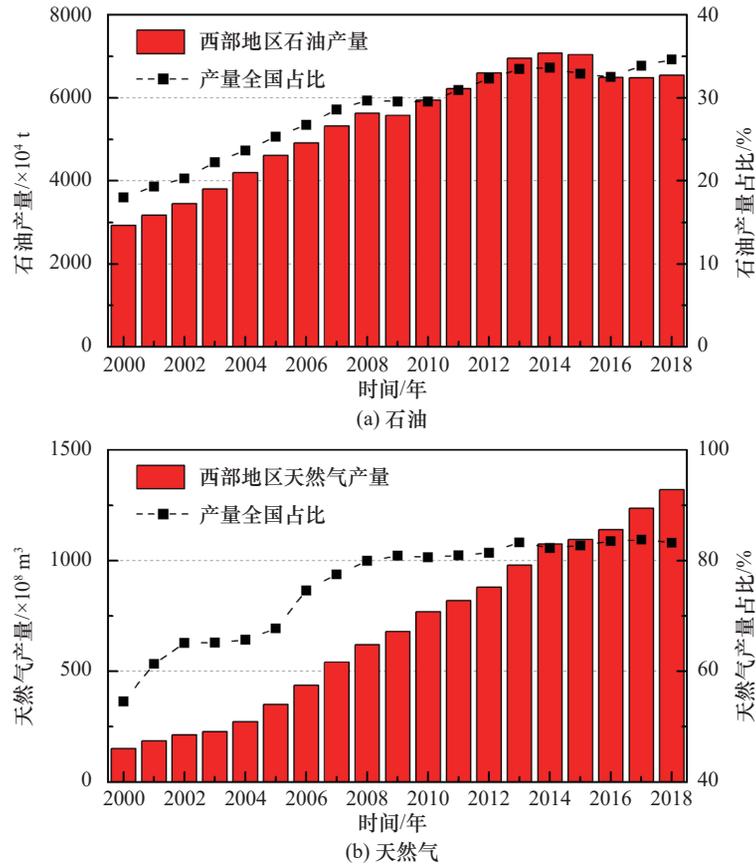


图 1 西部地区石油、天然气产量及占比

表 1 油气生产主要用水环节

资源勘探	开发建设	开采生产	石油化工
爆破钻机用水	爆破钻机用水	注水开采	工艺用水
井下注浆用水	井眼清洗	石油预加工用水	锅炉软化和脱盐水
工作面降尘洒水	运移岩屑	汽车运输清洗洒水	循环冷却用水
	固井施工	矿区生活用水	运输清洗洒水
	水力压裂	绿化用水	生活用水
	工作面降尘洒水		消防和基建用水

明油气面积和储量的重要手段。经过前期初步勘探取得发现后,筹备一个新的油气田还需进行一系列的油气田开发建设,包括确定开发井的井位以及压裂作业等具体开发方案的研究工作。开发建设后,油气田则正式进入油气生产作业阶段。钻井工作是油气田勘探、开发建设、开采生产的重要环节,钻井过程中,水在钻进时的钻机冲洗、冷却等环节均发挥了重要作用,也是运移岩屑、固井施工等环节的重要载体。近年来,水力压裂技术被广泛应用于裂解岩体、形成导流裂缝,压裂过程中需要消耗大量的水资源,以美国页岩气开发为例,其单

井耗水高达  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$  [7]。油田注水也是油田开采过程中确保油层压力,提高采收率的重要措施。此外,石油化工也是水密集型工业 [8],目前我国节水型石化炼油厂每吨原油加工的新鲜水消耗约为  $0.4 \sim 0.5 \text{ m}^3$  [9]。

本研究以长庆、新疆、塔里木、吐哈、青海、玉门等的 7 家油气田企业为例,分析西部地区油气田生产总体用水情况和发展趋势。随着新疆、长庆等油气生产基地的规模开发,西部油气田总用水量不断增加。由 2010 年的  $3.18 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加至 2018 年的  $3.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,增加了 14% (见图 2)。但新鲜水

用量变化不大, 2010年西部油气田新鲜水用量为 $2.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2018年为 $2.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在勘探及油田建设环节, 中国石油天然气集团有限公司在西部地区每年约使用 $0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 新鲜水, 其中压裂用水约占45%。注水开发是油气田用水的主要环节, 2010年西部油气田注水总量为 $1.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2018年注水总量则升至 $1.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 注水量增加了57%。近年来, 随着污水回收处理和循环利用效率的不断提升, 各油田污水回注、回灌量均呈增加趋势, 其他水源如污水回用等注水量由2010年的 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 增加至2018年的 $0.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但为保证油气田生产的稳定和高效, 注水水质管理过程对水中的悬浮物、溶解氧、腐蚀性等均有较高要求 [10], 仍需取用大量的地表水或地下水。此外, 油田工业用水和矿区生活、绿化用水也是油气生产用水的主要环节, 2018年中国石油天然气集团有限公司西部7家油气企业油田工业用新鲜水共计 $8.326 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 占总新鲜水用量的31%; 矿区生活、绿化用新鲜水共计 $7.314 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 占总新鲜水用量的28%。

随着常规油气资源勘探难度的增加, 勘探重点

已逐渐转向页岩油气等非常规资源。西部地区是非常规油气勘探开发的主要区域, 非常规油气开发技术要求高, 低品位或复杂油藏开发用水较大, 以低渗、稠油、碳酸盐岩等为主的长庆、新疆和塔里木地区的油田是用水大户, 占西部油气田总用水量的80%以上。以页岩气开发为主的西南油气田, 目前新鲜水用量仅占西部油气田总用水量的5%, 虽然现状用水量不大, 但从油气田生命周期的角度来看, 后期建产阶段可能对周边水源、河流及工业生活用水造成较大影响。

### 三、西部地区油气开发用水问题

《全国主体功能区规划》在能源开布局中提出, 重点在能源资源富集的山西、鄂尔多斯盆地、西南、东北和新疆等地区建设能源基地。西部地区作为我国能源最主要的生产区, 近年来油气产量占比持续上升, 未来一段时期也必然随着国家能源总产量的增加而增加。同时, 伴随着我国着力改善能源结构和生态保护的政策导向, 油气资源的开发利用与水资源更加息息相关。利用水平井和体积压裂技术、工厂化作业模式使得致密油/页岩油等非常规资源开发成本逐步降低, 但是大型压裂所需的巨大耗水量及环境问题仍是阻碍西部地区油气资源开发的重大问题。

西部地区是我国水资源最短缺的地区, 由于油气开发要消耗大量的淡水资源, 很可能对区域地表和地下水系统带来诸多影响, 进而引起生态环境的恶化 [11]。油气井开发用水量受自然条件与资源条件影响非常大, 随着井段深度、水平井长度、产层地质特点、油气井开发生命周期所处阶段的变化, 用水量可能会产生很大的变化。受季风气候影响, 西部地区降水在季节分配上具有夏秋多, 冬春少的特点, 存在明显的水资源自然周期。但是油气开发并不分季节, 开发周期往往与水资源条件不相匹配。在油气田开发尤其是在水力压裂过程中短时期用水量较大, 建产阶段则可能挤占当地工业、生活用水, 甚至造成河道断流, 严重影响区域水资源安全和生态环境系统。

油气层也赋存了地下水, 在开发过程中含油废水很可能会对地下含水层中的地下水造成污染。在压裂施工过程中, 会产生大量压裂返排液至地面,

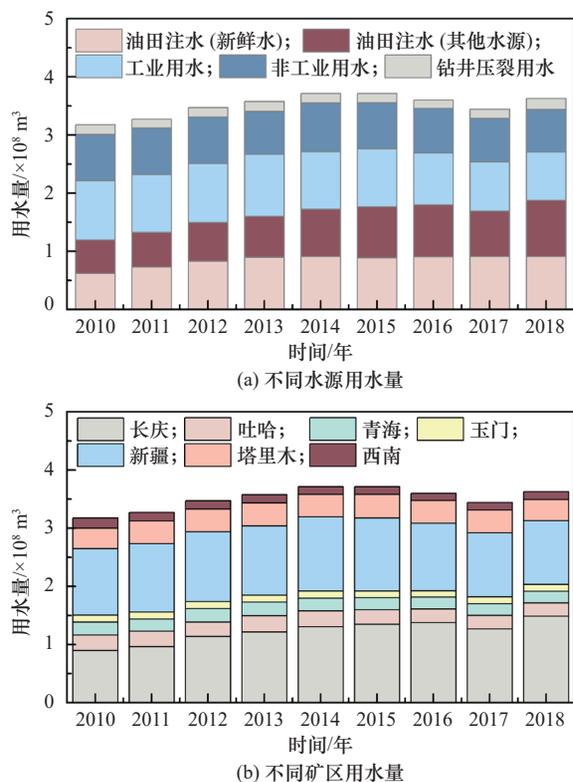


图2 西部油气田不同水源及各矿区用水量

废液中不仅含有地层中带出的天然杂质,还有压裂液中的添加剂,废水中化学需氧量(COD)、石油类、硫化物、挥发酚等污染物排放浓度远高于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的排放浓度[12]。钻井废水若不能及时处理,则可能污染周边的地表水、地下水环境,随着时间的积累,则会对人体造成严重的伤害。为实现西部地区油气持续增储上产与环境友好发展,亟需识别不同类型油气开发过程中的水资源、水环境保障风险,从开发规模、开发模式、节水关键生产技术和管控政策等方面全链条式创新,促进西部地区油气资源与水资源可持续利用与协同安全。

#### 四、西部地区油气开发重点节水举措及对策建议

节水是西部地区油气产业用水的优先前提与要求,为积极落实《国家节水行动方案》和《水污染防治行动计划》,油田水管理须从取用水、采出水、污水处理等各个环节,采取有效对策优化管理。进一步强化水的循环再生利用,降低水资源浪费,推广替代性节水技术,因地制宜加大非常规水利用量,实现油田水精细化管理。

##### (一) 发展精准注水技术,实现稳油控水

注水开发是提高油田产量、改善油田开发效果的有效方法,是油田提高采收率的重要手段,也是我国油田开发的主体模式。我国大多数油田为非均质多油层砂岩油田,由于油层间压力不均,不同层系开发效果存在较大差异。随着油田开发程度的进一步加深,我国油田整体处于“高采出程度、高含水”后期,低效、无效水循环问题突出,造成油田水资源、能源的浪费。针对采油工程中注水技术这一难题,亟需大力推进油田数字化转型,研制智能化、精细化分层注水及其配套技术,使地层间各类油层得到均衡的开采,实现剩余油的有效挖潜,最大限度地发挥油田节水节能效果。

##### (二) 发展无水压裂与增能技术,支撑油气资源绿色高效开发

随着油气勘探开发技术的发展和资源开发力度的加大,西部地区油气储量快速增长,同时仍具有

较大勘探开发潜力,未来西部地区将是保障国家能源安全的主战场。但是西部地区水资源匮乏,油气资源水力压裂开发模式不可持续,亟需发展无水压裂技术,以大幅减少油气开发过程中的水资源消耗。目前,利用氮气(N<sub>2</sub>)泡沫压裂、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)压裂和液化石油气(LPG)压裂技术均可代替水作为压裂介质,进行储层改造,以达到改善油气渗流条件提高单井产量的目的。但是,目前无水压裂技术所需的气源缺少充足保障,仍需跨行业进行战略布局,以进一步提升能源开发的经济和环境效益。

##### (三) 通过管理控降用水,加大科学用水管理

油气开采属高耗水、高污染行业,为推动西部地区能源产业绿色、可持续发展,油气行业应引进先进工艺对现有的生产装置进行技术改造,推广应用新的节水材料、技术和设备,实施企业水平衡测试,开展合理用水分析,完善计量器具管理网络,加强用水定额管理,提高水资源利用效率。

在油气勘探、压裂、开采等环节,开展科技攻关,加快压裂返排液、净化水配液研究和试验,降低回用成本,根据油气田特点因地制宜,实施不同的处理流程,提高压裂返排液和净化水配液的复配比率,减少新鲜水使用量。与此同时,开展环境友好型压裂液配液技术研究,从源头解决返排液处理、复配的技术难点,降低油气开发综合成本。

在矿区生活、环境管理环节,需加强对作业区的绿化用水管理,改变漫灌的绿化灌溉用水方式,实施必要的技术改造,采用地埋式喷灌、移动式喷灌、微喷灌等技术,节省绿化用水。加强矿区生活用水优化,提高污水回用率,减少新鲜水使用量。

##### (四) 完善水资源综合配置保障体系,提升能源产业用水安全保证程度

西部地区是我国最为重要的能源基地,而能源是西部地区经济社会发展的支柱产业,因此,应将能源产业的水资源安全保障放在突出位置,加快完善能源产业的水资源综合配置保障体系,因地制宜制定水资源保障策略,一方面要切实提升能源产业水资源安全保障程度,另一方面也要切实防治能源产业对水生态环境的影响,包括严格控制地下水超采、减少废污水入河入湖入土、降低取水工程生态影响等。

从水源方面,构建多元保障体系,合理利用常规水源,加大利用非常规水源,规范取用存量地下水。在局部能源产业水资源约束较突出的地区,切实落实节水优先战略,挖掘节水潜力,提升效率,创新水资源管理水平。

同时,应加快完善工业与农业之间的水权交易制度,建立健全水权交易平台,建立法律依据与科学技术支撑,促进跨行业、跨区域、跨流域水权转换。借助市场手段高效配置水资源,鼓励能源企业出资进行灌区节水技术改造,在维持水生态健康的基础上保障能源开发。

## 五、结语

作为我国的能源接替区和资源战略储备区,近年来西部地区油气储量和产量均大幅增长,为保障国家能源安全和推进西部大开发战略稳步实施起到了重要的作用。未来西部地区仍将大力发展能源产业,油气产量将快速增长,但由于西部地区水资源短缺、水资源开发潜力不足,未来区域水资源的约束性将更加显著。针对西部地区油气开发的特征和用水现状,建议开展科技攻关,发展精准注水和无水压裂技术,减少水资源的消耗;因地制宜,通过技术进步和管理创新,加大油田生产水的循环利用力度,加大非常规水利用量,在减少新鲜水取用量的同时降低地表和地下水环境污染程度,全方位全过程降低油气开发对水系统的影响,实现西部地区能源与水资源协同安全。

### 参考文献

[1] 李悦,崔玉杰.中国能源消费总量的预测及影响因素分析[J].低碳经济,2020,9(1):1-9.  
Li Y, Cui Y J. Prediction of total energy consumption in China and analysis of its influencing factors [J]. Journal of Low Carbon Economy, 2020, 9(1): 1-9.

[2] 郭威,潘继平.“十三五”全国油气资源勘查开采规划执行情况中期评估与展望[J].天然气工业,2019,39(4):111-117.  
Guo W, Pan J P. Mid-term evaluation and prospect of the implementation of the 13th Five-Year Plan for the National Oil and Gas Resources Exploration and Mining Plan [J]. Natural Gas

Industry, 2019, 39(4): 111-117.

[3] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报2017[M].北京:中国水利水电出版社,2018.  
Ministry of Water Resources of the PRC. China water resources bulletin 2017 [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2018.

[4] 蒲春生,宋向华.试论我国西北地区油气资源开发与水资源可持续协调发展[J].能源技术与管理,2007(5):72-73.  
Pu C S, Song X H. On the coordinated development of oil and gas resources in Northwest China [J]. Energy Technology and Management, 2007 (5): 72-73.

[5] 李建忠.第四次油气资源评价[M].北京:石油工业出版社,2019.  
Li J Z. Fourth assessment for oil and gas resources [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.

[6] 赵文智,胡素云,董大忠,等.“十五”期间中国油气勘探进展及未来重点勘探领域[J].石油勘探与开发,2007,34(5):513-520.  
Zhao W Z, Hu S Y, Dong D Z, et al. Petroleum exploration progresses during the 10th Five-Year Plan and key exploration domains for the future in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 513-520.

[7] Jiang M, Hendrickson C T, Vanbriesen J M. Life cycle water consumption and wastewater generation impacts of a marcellus shale gas well [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 1911-1920.

[8] 郭宏山,林大泉,许谦.炼油厂用水与节水[J].石油炼制与化工,2002,33(3):61-63.  
Guo H S, Lin D Q, Xu Q. Water supply and conservation in petroleum refineries [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2002, 33(3): 61-63.

[9] 刘雪鹏.过程系统工程方法在炼油厂设计阶段节水优化中的应用[J].石油石化节能,2017,7(6):28-30,33.  
Liu X P. Application of process system engineering method in water saving optimization of refinery design stage [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7(6): 28-30, 33.

[10] 施建,苑培培.新疆油田注水水质处理控制技术应用研究[J].化工管理,2018(11):91.  
Shi J, Yuan P P. Application of water quality treatment and control technology in Xinjiang Oilfield [J]. Chemical Enterprise Management, 2018 (11): 91.

[11] 夏玉强,李海龙.油气能源开发背后的溢油污染和水资源匮乏[J].长江科学院院报,2011,28(12):77-81.  
Xia Y Q, Li H L. Predicament of unbalanced oil-gas extraction: Spilled oil pollution and water scarcity [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(12): 77-81.

[12] 邹启贤,陆正禹.油田废水处理综述[J].工业水处理,2001(8):1-3.  
Zou Q X, Lu Z Y. Survey of oil-field wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2001 (8): 1-3.