



石油开采利用的水资源 外部成本研究

A STUDY ON THE EXTERNAL COST OF
WATER RESOURCE DURING OIL UTILIZATION

执行报告

EXECUTIVE REPORT

中国水利水电科学研究院



本课题属于中国石油消费总量控制和政策研究项目（下文简称‘油控研究项目’）子课题之一。

中国石油消费总量控制和政策研究项目 (油控研究项目)

中国是世界第二大石油消费国和第一大石油进口国。石油是中国社会经济发展的重要动力，但石油的生产和消费对生态环境造成了严重破坏；同时，石油对外依存度上升也威胁着中国的能源供应安全。为应对气候变化和减少环境污染，自然资源保护协会（NRDC）和能源基金会中国（EF China）作为协调单位，与国内外政府研究智库、科研院所和行业协会等十余家有影响力的单位合作，于2018年1月共同启动了“中国石油消费总量控制和政策研究”项目（简称油控研究项目），促进石油资源安全、高效、绿色、低碳的可持续开发和利用，助力中国跨越“石油时代”，早日进入新能源时代，为保障能源安全、节约资源、保护环境和公众健康以及应对气候变化等多重目标做出贡献。



自然资源保护协会(NRDC)是一家国际非盈利非政府环保机构，拥有逾140万会员及支持者。自1970年成立以来，以环境律师、科学家及环保专家为主力的NRDC员工们一直为保护自然资源、公共健康及环境而进行不懈努力。NRDC在美国、中国、加拿大、墨西哥、治理、哥斯达黎加、欧盟、印度等国家及地区开展工作。请登录网站了解更多详情 www.nrdc.cn。

本报告由中国水利水电科学研究院撰写

中国水利水电科学研究院

中国水利水电科学研究院是从事水利水电科学研究的公益性研究机构，旨在研究解决水利发展中战略性、全局性、前瞻性、基础性的科学技术问题，为国家和行业宏观决策提供科技支撑。

系列报告

- 《中国石油消费总量控制的健康效应分析》
- 《中国石油真实成本研究》
- 《中国传统燃油汽车退出时间表研究》



油控研究项目系列报告

石油开采利用的水资源外部成本研究

**A STUDY ON THE EXTERNAL COST OF
WATER RESOURCE DURING OIL UTILIZATION**

执行报告

EXECUTIVE REPORT

中国水利水电科学研究院

2019年06月



目录

Executive Summary	5
前言	8
1. 石油开发利用对水循环系统的影响	9
1.1 石油开发利用的水资源、水环境、水生态影响	
1.2 石油与水资源的纽带关系	
2. 石油开发利用的水资源外部成本	17
2.1 影响因子及测算方法	
2.2 量化分析	
2.3 不确定性及风险分析	
3. 结论及展望	26
3.1 主要结论	
3.2 政策建议	
参考文献	29

Executive Summary

Based on detailed analysis of the quantitative and qualitative impacts of petroleum production and utilization on water resources in China, this project examines the water-related externalities of the whole process and evaluates corresponding external costs. This work supports research on the true cost of petroleum with an emphasis on environmental limitations.

The research team carried out extensive research work and obtained the following results and findings:

(1) The impacts of the petroleum production and utilization process on the water cycle and the withdrawal, utilization, consumption and discharge of water resources for petroleum production demonstrates the close relationship between petroleum and water.

The distribution of petroleum resources often coincides with water resources in the eight main basins in China. Petroleum production and refining also often overlaps with water scarcity, shown in Figure 1. Excessive production and utilization of petroleum may damage water resources protection and sustainable water use.

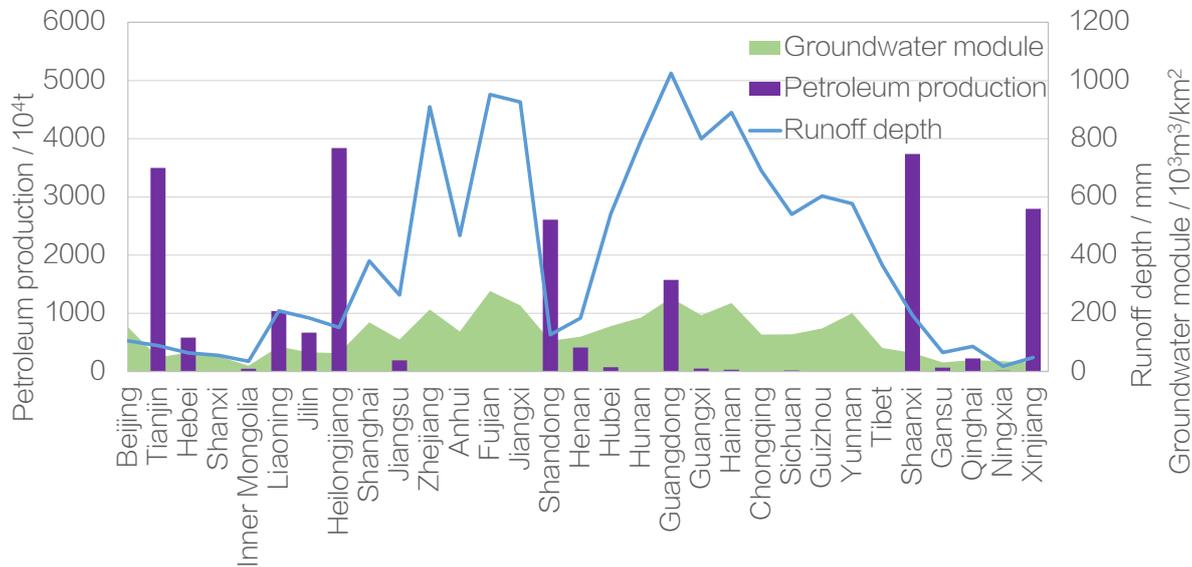


Figure 1 Petroleum production and water resources comparison by provinces in China

The whole life cycle of petroleum, including production, refinement, transformation and utilization, impacts regional water resources significantly. The natural water cycle system is disturbed by exploratory well drilling and water injection, both before and during petroleum extraction, along with high water utilization and wastewater discharge. Surface water, soil and groundwater are polluted by petroleum leakage and wastewater, which indirectly causes ecological regression. The petroleum refining and petrochemical industries, with intensive water demand and high-pollution rates, aggravate regional water supply and demand and contaminate the surrounding water environment.

(2) The external costs of petroleum extraction and refining on water resources depletion, water environment degradation and soil pollution are evaluated quantitatively.

Three impacts on water resources, both directly and indirectly caused by petroleum extraction and refining, are taken into consideration, including water resources depletion, water environment degradation and soil pollution. The physical quantitative indices and magnitude of value indices are determined by surveys, literature research and analysis to calculate the external costs.

For the external costs of water resources depletion, we considered the impacts of petroleum extraction and refining on groundwater overexploitation and the value of water resources. For the external costs of water environment degradation, the average wastewater discharge from petroleum extraction and refining and the potential costs of

wastewater deep treatment were considered. For the external costs of soil pollution, the soil pollution around petroleum wells and its recovery costs were considered.

The results indicate that, as shown in Table 1, the external costs of petroleum extraction and refining on water resources was 28.16 yuan/t, in which that of petroleum extraction 24.21 yuan/t, and petroleum refining 3.96 yuan/t.

Table 1 External costs of petroleum extraction and refining on water resources in China (yuan/t)

Item	Petroleum extraction	Petroleum refining	Total
Water resources depletion	16.58	2.00	18.59
Water environment degradation	4.88	1.95	6.83
Soil pollution	2.75	-	2.75
Total	24.21	3.96	28.16

(3) Water resources-oriented proposals for petroleum production and utilization are brought forward for the harmonious development of water and petroleum.

We believe that the planning, production operation and impact management of petroleum related industries should be adjusted and restricted for water and environmental conservation. 1) The planning of petroleum projects should fully consider the restrictions of local water carrying capacity. 2) The production operation of petroleum enterprises should be assigned clear requirements for water utilization quantity, efficiency and wastewater discharge quality, which should be promoted gradually. 3) The impact management of petroleum enterprises should be enhanced through increased environmental impact monitoring and recovery.



前言

本报告在全国和地区石油开发利用对水资源影响分析的基础上，确定石油开发和利用的外部成本，为项目石油真实成本和生态红线的研究提供支撑。

首先，解析了石油开发利用全过程对水循环系统及水资源供-用-耗-排等影响，论证了石油与水资源之间存在紧密的纽带关系。从石油与水资源的分布来看，我国石油资源集中分布的八大盆地，与我国地下水赋水平原-盆地高度重合，且石油开发利用地区多属于缺水地区。石油开发、加工、转化、利用的全过程加剧了区域水资源供需矛盾，且对周边水体环境造成显著影响。

其次，综合石油开发利用造成的水资源耗减、水环境退化、土壤污染等影响，测算了石油开发利用在水、土等方面的外部成本。石油开发利用中的原油开采和石油炼制等两个环节，对水资源、水环境及生态影响较为直接且显著，本研究主要考虑了水资源耗减、水环境退化、土壤污染等三方面。

最后，针对石油石化行业及企业的规划布局、生产运营、影响管理等，提出了面向水资源约束的石油开发利用相关政策建议。



石油开发利用对水循环系统的影响

1.1 石油开发利用的水资源、水环境、水生态影响

1. 石油开发利用对水资源的影响

(1) 石油开采破坏了区域天然水循环系统

①水循环结构变化

石油开采需要建造采油井、注水井等设施，并通过开采过程中的采油、取水、注水等行为，对区域下垫面及地下水系统造成改变，进而影响水循环过程。

通过建造采油井、注水井等设施，导致区域地表与地下水发生直接联系和水量交换，地表和地下补给交换条件发生变化，造成区域地表水渗漏加大，同时地表污水容易直接对地下水水环境产生影响。

原油开采过程中，不同埋深的地层之间发生油气与地下水的混合，造成地下水循环改变，在部分地区出现回注的污水从岩层和泉眼中溢出现象，致使区域正常的生活和生产用水受到影响。

采油过程中大量需水，往往通过地表引调水和超采地下水来满足，导致区域地下水潜水位下降，导致地表产水过程中下渗增加，产水条件改变，同时深层地下水破坏，造成对地下水循环的长期影响。

②产汇流条件改变

地面沉降：采油及地下水水位下降引起含水层上部的局部疏干，孔隙压力得到释放，破坏了含水层原有骨架的应力结构，产生了压缩变形，传导至地面导致地面沉降。长期高强度地开采石油和地下水，将会改变地层的应力结构，在地面建筑物和岩层自重的作用下，岩层压密变形，引起地面沉降，进而影响区域产汇流^[1]。

地面隆起：油田进入主体开采期后就要对油藏进行高压注水，如果油层物性差、连通性较弱，就会在高压注水过程中形成高压区块，或者在井间、层间产生异常高压带。高压注采可以造成地表高程变化，且这种变形与同期地层压力变化较为一致。注采过程中的地面变形基本上是弹性变形。注水导致高压层地面抬升、隆起，停注后地面将停止升高，如果采取降压措施，地表还会下沉。注水压力的持续影响会带来井底流压及地层压力的变化。由于不同介质导压能力存在差异，非均质层内压力场使层间岩性变化不均衡，导致地面隆起变形，进而影响了地表水的产汇流过程^[2]。

(2) 石油开采造成水资源超载和地下水超采

石油开采用水包括勘探用水、钻井和完井施工用水、采油用水等。其中，勘探用水、钻井和完井施工用水是一次性用水，与勘探规模、钻井数量紧密相关；采油用水包括油层注水、原油生产用水和油田生活用水等。

多数油田的石油开采需要大量注水，以保持开采的压力。特别是在我国北方地区，主要油田所在地区多属于半干旱或干旱地区，区域水资源较为匮乏。大规模油田开发的用水需求，往往需要通过地表引调水或者开采地下水来满足，一方面加剧了区域本已紧张的供用水矛盾，造成水资源超载；另一方面导致深层和浅层地下水的超采、地下水位大幅下降，造成区域地下水取水日益困难，影响正常的生活生产需求。

(3) 石油加工转换高耗水行业加剧了区域水资源供需矛盾

石油化工指以石油和天然气为原料，生产石油产品和石油化工产品的加工工业。石油产品又称油品，主要包括各种燃料油（汽油、煤油、柴油等）和润滑油以及液化石油气、石油焦炭、石蜡、沥青等。生产这些产品的加工过程常被称为石油炼制，简称炼油。石油化工产品以炼油过程提供的原料油进一步化学加工获得。生产石油化工产品的第一步是对原料油和气（如丙烷、汽油、柴油等）进行裂解，生成以乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯为代表的基本化工原料。第二步是以基本化工原料生产多种有机化工原料（约200种）及合成材料（塑料、合成纤维、合成橡胶）。这两步产品的生产属于石油化工的范围。有机化工原料继续加工可制得更多品种的化工产品。

炼油一般是指石油炼制，是将石油通过蒸馏的方法分离生产符合内燃机使用的煤油、汽油、柴油等燃料油，副产石油气和渣油；比燃料油重的组份，又通过热裂化、催化裂化等工艺化学转化为燃料油，这些燃料油有的要采用加氢等工艺进行精制。最重的减压渣油则经溶剂脱沥青过程生产出脱沥青油和石油沥青，或经过延迟焦化工艺使重油裂化为燃料油组份，并副产石油焦。润滑油型炼油厂经溶剂精制、溶剂脱蜡和补充加氢等工艺，生产出各种发动机润滑油、机械油、变压器油、液压油等各种特殊工业用油。如今加氢工艺更多地用于燃料油和润滑油的生产中。此外，为石油化工生产原料的炼油厂还采用加氢裂解工艺。

石油炼制用水主要包括：工艺用水、锅炉软化用水和脱盐水、循环冷却系统补水、生活用水、消防和基建用水等。其中，工艺用水约占10%，锅炉软化用水和脱盐水约占50%，循环冷却系统补充水约35%，生活及其他用水占5%。

与石油消费密切相关的石油加工、炼焦及核燃料加工业，以及化学原料及化学制品制造业，均属于高耗水工业行业，石油的加工和炼制过程均伴随着水资源的消耗。根据相关研究，2011年，石油石化行业耗水量高达13.0亿 m^3 ，在高耗水行业中排名前列。

2. 石油开发利用对水环境的影响

(1) 石油开采对水环境的影响^[3]

石油开采对水环境的影响包括渗透污染、穿透污染以及事故型污染等。其中，渗透污染和穿透污染往往造成区域地表水、土壤水和地下水的污染源，事故型污染容易造成点源污染。石油开采导致地表水和地下水水质变差，使得区域在资源型缺水的现状下进一步造成水质型缺水，严重影响了水安全。以东北地区为例，重工业和油田开发区地下水污染严重，松嫩平原的主要污染物为三氮、石油类等；下辽河平原三氮、挥发酚、石油类等污染普遍。

①注水对地下水的影响

注水多为分离的含油污水，或为矿化度较高的承压水，经过处理后一般矿化度和硬度还是较高，并含有溶解氧、硫化氢、二氧化碳、硫酸盐等还原菌和腐生菌。在注水过程中易产生沉淀而堵塞污水处理系统与地层孔隙，导致注水不畅，严重时易造成注水污染地表水及潜水。同时，易造成污水处理系统及管道的腐蚀穿孔，也可能使回注水层渗漏，污染地下水。

②油水串层对地下水的影响

不同埋深的地层之间发生油气与有开采价值的地下水混合，造成地下水污染的现象。一般是由于开采过程中井壁腐蚀穿孔，形成浅层地下水与深层油气的通道，出现油气水的混合现象。

③井喷事故对地下水的影响

在钻穿高压油气层时，因处理措施不当，极易造成井喷，大量油气散逸到周围环境和土壤表层中，严重污染环境，在长时段内，由于降雨下渗会对地下水产生影响。

④管道及设备腐烂穿孔引起的原油泄漏事故

多发生在油田投产若干年后，事故发生时会有大量原油溢出，对环境造成污染。人为破坏等因素也会造成管道破裂，使原油泄漏，污染环境，当原油进入包气带，会因渗透作用对浅层地下水产生影响。

⑤钻井质量事故对地下水的影响

如果钻井时固井质量不高，封闭不严，可使原油从油层上升进入含水层而污染地下水，也成为地表污水进入地下含水层的通道，使污染物随地下径流扩散迁移，致使地下水的污染长期无法恢复。

(2) 石油加工转换

石油炼制工业生产产生废水中污染物种类有：石油类、COD、硫化物、挥发酚、

BOD等。炼油企业生产过程中产生的污水分为含油污水、含硫污水、含盐污水、含碱污水、生活污水和生产废水，需经清污分流及污污分流分别处理。

①含硫废水：送到酸性水汽提装置，除去硫化氢和氨氮，净化后的酸性水送回相关装置回用，多余部分送到含油污水处理场处理。

②含油污水：主要包括装置油水分离器排水、容器及地面冲洗水、机泵冷却排水、油罐切水、化验室含油废水以及未回用的汽提净化水及生活污水、初期雨水等。含油污水送到含油污水处理场处理后回用于循环水场。

③含盐废水：主要包括含污染物浓度较高的电脱盐污水、含碱废水、码头船舶压舱水、污泥滤液及循环水场旁滤罐反冲洗排水等。含盐污水处理合格后通过排海管深海排放。

④生产废水：主要为污染物含量很低的清净污水。包括循环水系统合格排污水、除盐系统排污水、锅炉排污水以及装置排放的生产废水，这部分生产废水通过排水管同含盐废水一同深海排放。

炼油废水中污染成分复杂，若不经妥善处理就直接排放，将造成河流、湖泊等地表水体以及土壤及地下水体的严重污染。石油炼制工业废水处理设施的建设、运行，应严格按照国家建设项目“三同时”政策进行，石油炼制企业须配套污水处理设施并保证正常运行。

3. 石油开发利用对生态环境的影响

(1) 土壤污染

石油开采和中间转化过程中，容易发生原油、石油制品以及油水混合物的外流，导致周围的土壤受到污染，进而影响区域水体、植被等的生态环境安全。油井喷漏、输油管线泄露、油井场原油落地、石油化工厂油气泄漏、水基钻井液冒漏、废气废液排放扩散等问题，其中尤以油井落地原油与水基钻井液冒漏造成的污染最为严重，例如贮油池油水混合物的外流聚集。据调查，以大庆为中心的周边地区其土壤层受到了各种矿物质的严重污染，约有 0~20cm 深度的土壤分布有不同密度的铅镉等重金属、石油以及各种酚类化合物。油场中落地原油污染最为严重的区域是油井场的 20~40 米范围内，在 150 米范围内污染程度依然在重度范畴^[4]。

(2) 土地盐碱化

造成土地盐碱化扩大和加重的原因主要是大规模开采石油和地下水，使区域地面沉降，导致降水不易汇流外泄，只靠蒸发排泄使盐分在地表不断地积累，促使盐碱化土地逐渐扩展和加重。其次，在石油勘探开采过程中遍地打井、处处钻孔、挖埋输油管线、架高压电缆、修路筑路和大型机器设备压实，铺设大量的管线和安装探头设备，使土体结构遭到破坏，地形变低，从而盐碱化程度加重^[1]。



(3) 植被退化

石油开采过程中，使植被遭到破坏，施工活动使土壤层次发生改变，土壤结构遭到破坏，土壤表面被压实、板结后，由于通透性变差，进而导致土地次生盐碱化；石油开采和转化利用期间，试油、采油、集输等各种生产活动，产生跑、冒、滴、漏等落地油、工艺废水等，造成植被退化、土壤板结、土地沙化，使区域优势植被群落发生变化，生物量减少，进而使区域珍稀和重要经济植物濒临灭亡；由于各种道路、站场的建设，包括修建、挖掘各种引水渠和排污渠等永久性占地，使地表覆被支离破碎，生态系统遭到破坏^[6]。

1.2 石油与水资源的纽带关系

(1) 石油与水资源的分布格局对比

① 石油与水资源的逆向分布

我国石油资源集中分布在渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯、准噶尔、珠江口、柴达木和东海陆架八大盆地，主要位于东北、华北和西北地区。而水资源的总体分布是从东南到西北递减，主要油田分布的东北、华北和西北地区属于半干旱半湿润及干旱地区。因此，石油资源与水资源呈逆向分布。各省 2016 年原油产量及多年平均地表径流深、地下水模数的对比如图 1- 1。

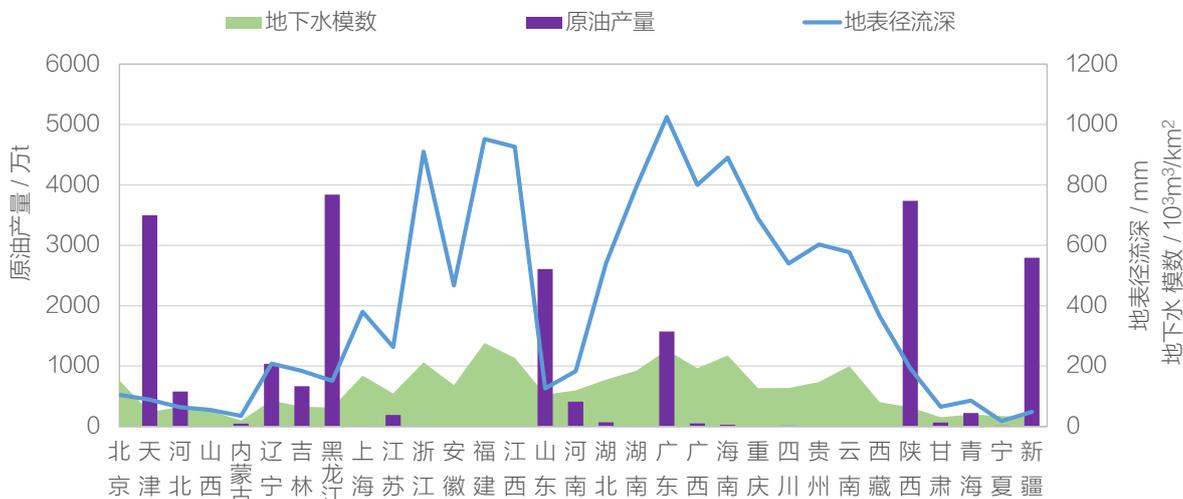


图 1- 1 各省原油产量与水资源量对比

与石油开发利用紧密相关的石油和天然气开采业，石油加工、炼焦及核燃料加工业，以及化学原料及化学制品制造业等，属于高耗水高污染行业。石油开采和加工转换需要耗费大量水资源，相关产业的发展受到区域水资源条件的制约；同时产生的大量废污水也对区域生态环境造成极大威胁。各行业取水量及废污水排放量在工业中的占比如图 1-2。

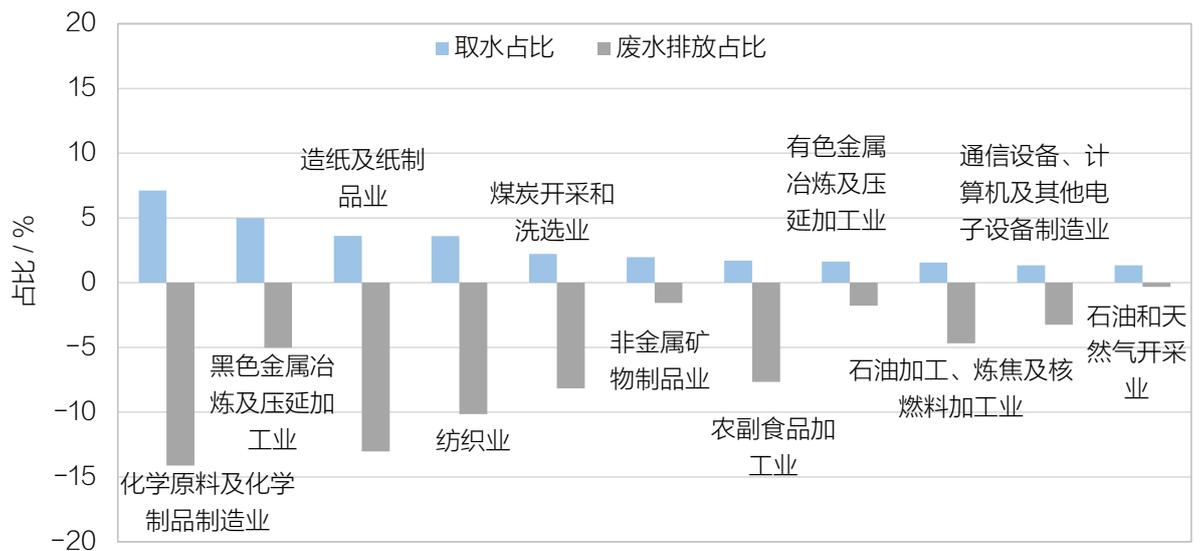


图 1-2 工业主要行业取水及废水排放占比

②石油与地下水的盆地分布

根据我国地下水的赋存、分布特点，全国地下水类型可划分为平原—盆地地下水、黄土地区地下水、岩溶地区地下水和基岩山区地下水。平原—盆地地下水主要赋存于松散沉积物和固结程度较低的岩层之中，一般水量比较丰富，具有重要开采价值，分布于我国的各大平原、山间盆地、大型河谷平原和内陆盆地的山前平原和沙漠中，主要包括黄淮海平原、三江平原、松辽平原、江汉平原、塔里木盆地、准葛尔盆地、四川盆地、以及河西走廊、河套平原、关中盆地、长江三角洲、珠江三角洲、黄河三角洲、雷州半岛等地区。

盆地一般具有持续拗陷和接受巨厚海相或陆相（其中主要是湖相）沉积的特点，并具有油气生成和聚集的有利条件，其规模差异很大，主要由地质构造环境决定。我国陆上七大含油气盆地包括松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地以及塔里木盆地。

可以看到，含油气盆地与主要地下水赋水盆地的分布具有较高的一致性。在石油开



采中，往往伴随着浅层和深层地下水的使用和破坏，因而这些盆地区域的石油开采对水资源、特别是地下水资源的影响巨大，对于区域整体水安全也有显著影响。

(2) 石油开发利用与水资源之间的影响和约束

根据《石油发展“十三五”规划》，2020年国内石油产量2亿t以上，构建开放条件下的多元石油供应安全体系，保障国内2020年5.9亿t的石油消费水平。

根据我国最严格水资源管理制度的要求，2020年全国用水总量控制在6700亿m³，并将其分解到县级行政区，明确了水资源开发利用红线。部分地区水资源开发利用率已经超过40%的警戒线水平，用水增长空间已经十分有限。

基于石油与水资源的逆向分布特点，主要油田地区的大规模石油开发、转换和利用，一方面将对区域水循环系统造成扰动，对河流、湖泊以及地下水等不同水体造成影响，对生态环境造成破坏，加剧区域资源型缺水、水质型缺水等水资源匮乏的状况；另一方面，高耗水高排放的石油相关行业加剧了区域水资源供需矛盾，引起地表水和地下水资源的过度开发，部分地区超出了水资源的承载能力，影响了社会经济和水资源的可持续发展。

因此，在部分水资源紧缺、生态环境脆弱地区，石油开发利用与当地水资源及生态环境之间存在着突出矛盾，水资源承载力是影响石油相关行业可持续发展的重要制约因素。在石油开发利用中，必须基于水资源承载力的强约束进行严格论证，否则可能造成严重的水资源和生态环境问题。

2

石油开发利用的水资源
外部成本

2.1 影响因子及测算方法

石油开发利用带来的水资源外部成本主要考虑水资源耗减、水环境退化、土壤污染等三方面，主要测算对象涵盖原油开采和石油炼制等两个对水资源、水环境及生态影响较为直接且显著的环节。

首先确定各方面影响的影响量指标和价值量指标，然后用二者的乘积确定该项的外部成本，最后对全部影响的外部成本进行合计，得到石油开发利用的水资源综合外部成本。

1. 水资源耗减成本测算方法

水资源耗减成本是指核算期内经济社会活动对水资源的过度消耗而导致的水资源可利用价值的减少，或作为资产减少的经济成本。可通过分析研究水资源耗减量和水资源价值予以反映，核算期内水资源的耗减成本即为水资源耗减量与水资源价值的乘积，可通过下面公式来表示：

$$V_{wc} = W_c \cdot P_w \quad (2-1)$$

式中： V_{wc} 表示水资源耗减成本； D_w 当年水资源耗减量； P_w 单位水资源价值。

关于资源耗减量的核算，综合环境经济核算提供了两种思路，第一是从资源对经济过程的贡献看问题，将经济活动对资源的实际利用量作为耗减量；第二是从资源看持续性角度考虑，将资源再生、恢复作为递减项，以递减后的资源净减少作为耗减量，就是说，如果资源消耗比超过资源的再生能力，在总量上不减少，就可以视为没有资源耗减发生。

本研究主要根据第二种思路，重点考虑石油开发利用对区域地下水超采带来的影响，测算原油开采和石油炼制的取用水过程中超出地下水恢复能力的部分相对应的价值量。对于单位水资源价值量，以水资源影子价格结合工业分摊系数确定。

2. 水环境退化成本测算方法

直接测算水环境退化是难以做到的，无论是实物量核算还是价值核算。间接核算环境退化价值的两条思路：第一是所谓成本原则，核算为防止环境退化所需要支付的成本，以此作为环境退化价值；第二是所谓损害原则，核算环境退化所带来的损害，反过来也就是规避环境退化所获得的收益，以此作为环境退化价值。

本研究主要基于成本核算水环境退化价值，实际上就是要核算为维护水环境质量而需要花费的成本，简称水环境维护成本。以这种方法核算水环境退化价值，隐含的假设是：

如果采取足够的行动即可保证水环境不发生退化，那么为维护水环境不退化所付出的经济代价就代表了环境退化价值。需要特别指出的是，这里核算的维护成本并非实际发生的成本，而是在假定其发生前提下应该花费的成本，是虚拟计算的成本。

从污染物的产生、排放和治理过程分析，基于成本的水环境退化成本核算可分为预防成本法，消除成本法和恢复成本法。预防成本法：在生产和生活阶段，通过技术方法改进、产业结构调整等手段减少污染物的产出量，为了这种目的所发生的成本即为环境退化成本。消除成本法：在污染物排放之前进行处理，达到一定的标准后再排放到天然水体中，将处理污水或削减污染物的投入视为环境退化成本。恢复成本法：一旦污染物进入水体，超过水体自净能力的污染物将会对水环境造成损害，为了避免损害发生或进一步加剧，可以采取特定的手段对受到污染的水体进行治理，使水体达到一定的标准，将恢复水体质量而投入的费用视为环境退化成本。

针对石油开发利用行业，采用消除成本法计算其造成水环境退化成本较为可行。基于污水处理的水环境退化成本：

$$C_{sr} = c_s \cdot S_r \quad (2-2)$$

式中， C_{sr} 为基于污水处理的水环境退化成本， c_s 为污水处理的单位成本， S_r 为应处理的污水量。

3. 土壤污染成本测算方法

石油勘探和开发阶段，油井周围土壤受油水混合物污染，石油开采过程中地面沉降，进而造成区域土壤盐碱化、植被退化等生态影响，且长期影响水资源的产汇流过程及水质。本项目采用恢复费用法测算石油开采带来的土壤污染成本：

$$E_s = P_s \cdot e_s \quad (2-3)$$

式中， E_s 为油井周围污染土壤修复费用， e_s 为单位面积土壤修复的费用， P_s 为土壤污染面积。

2.2 量化分析

1. 影响量指标测算

(1) 水资源耗减

根据典型调查及相关用水定额标准要求，原油开采取水量为 $2.80\text{m}^3/\text{t}$ ，石油炼制取水量为 $0.7\text{m}^3/\text{t}$ 。在此基础上，考虑超出水资源更新能力的部分，即地下水超采的影响；综合原油生产和加工所在地区的地下水超采情况，对取水量进行折算，得到原油开采的地下水超采影响量为 $1.49\text{m}^3/\text{t}$ ，石油炼制的地下水超采影响量为 $0.18\text{m}^3/\text{t}$ 。

(2) 水环境退化

根据典型调查及石油石化行业排水要求，取原油开采排水量为 $1.00\text{ m}^3/\text{t}$ ，石油炼制排水量为 $0.40\text{ m}^3/\text{t}$ 。

(3) 土壤污染

根据相关统计数据，2015年，全国油气勘探开发总投资为 2493.49 亿，完成油井总数为 23102 口，其中探井 3023 口，开发井 20079 口。根据文献调研及典型调查情况，油井周边 500m 范围内污染风险较高，因此取井口周边 500m 范围作为土壤污染面积。2015 年原油开采量为 21455.6 万 t，折算得到每千吨原油开采的土壤污染面积 3.66m^2 。

综上，石油开发利用的影响量指标如表 2- 1。

表 2- 1 石油开发利用的影响量指标

分类	指标	原油开采	石油炼制	合计
水资源耗减	地下水超采 (m^3/t)	1.49	0.18	1.67
水环境退化	排水量 (m^3/t)	1.00	0.40	1.40
土壤污染	油井周边污染面积 ($\text{m}^2/\text{千 t}$)	3.66	-	3.66

2. 价值量指标测算

水资源耗减成本测算中的价值量指标采用水资源影子价格，主要考虑石油开发利用在一定程度上引起了地下水超采，也挤占了其他行业以及生态用水，因而需要在整个经济社会全口径下测算其价值。根据相关研究^[6]，全国平均水资源影子价格取 21.57 元/ m^3 ，在此基础上考虑石油产地地下水超采情况进行一定比例的折算，取该指标为 11.13 元/ m^3 。全国各地经济社会发展水平不同，水资源供需矛盾、缺水程度也有所不同，因而其相应的水资源影子价格也不同，华东地区经济发达、缺水矛盾突出，因而水资源影子价格较高。考虑到石油开发利用对水资源影响的数据可获取性，此处仅作全国平均分析。

水环境退化成本测算中的价值量指标选取废污水深度处理成本，主要考虑当前生态文明建设要求，为了最大程度减低石油开采和加工对区域水体质量的影响，需要对生产过程中全部废污水进行处理达标后排放。根据调研，取废污水深度处理成本为 4.88 元/ m^3 。需要说明的是，本文在水环境退化成本测算方面采用消除成本法，即从石油相关企业的排水端进行污染阻断，因而相应的成本相对不高；但是如果将不达标的废污水外排到周围水体中，则会引起更大范围的污染，随着时间推移还容易导致污染物蓄积于河流底泥之中，导致更为长期的水环境影响，这部分的治理成本是相当高的，亦即前文提出的恢复成本，但是由于数据等原因未进行定量测算。

土壤污染成本测算中的价值量指标选取土壤深度修复成本，需要对油井周边地下 20cm-100cm 左右深度的土壤进行原位修复；根据调研其成本为 750 元/ m^2 。

综上，石油开发利用的价值量指标如表 2-2。

表 2-2 石油开发利用的价值量指标

分类	指标	价值量
水资源耗减	水资源影子价格（元/ m^3 ）	11.13
水环境退化	废污水深度处理成本（元/ m^3 ）	4.88
土壤污染	土壤深度修复成本（元/ m^2 ）	750.00

3. 成本汇总分析

根据石油开发利用对水资源的影响量和价值量，计算其在水资源耗减、水环境退化、土壤污染等方面的外部成本，得到石油开发利用的水资源相关外部成本为 28.16 元/t，如表 2-3。

表 2- 3 石油开发利用的外部成本 单位：元/t

分类	原油开采	石油炼制	合计
水资源耗减	16.58	2.00	18.59
水环境退化	4.88	1.95	6.83
土壤污染	2.75	-	2.75
合计	24.21	3.96	28.16

在三项外部成本中，水资源耗减成本占 66%，水环境退化成本占 24%，土壤污染成本占 10%。

2.3 不确定性及风险分析

1. 不确定性说明

石油开发、转化和利用全过程对水资源、水环境、生态环境均存在不同程度的影响，其中部分影响是显性的、即时的、可量化的，而更多影响是潜在的、长期的、风险性的。因此，在目前的数据和认识条件下，在测算石油开发利用的水资源外部成本时难以面面俱到，需要厘清分析计算的边界。对可货币化的部分，不同研究方法、不同资料来源对应的结果也不同；对部分难以货币化的影响，仅作定性说明，但并不代表这部分影响不大或者不重要。

(1) 已货币化的部分

本项目计算的石油开发利用的水资源外部成本主要考虑水资源耗减、水环境退化、土壤污染等三方面，其中：水资源耗减成本针对的是石油开采加工引起的地下水超采影响，重点体现了石油石化企业在缺水地区的影响及水资源与石油逆向分布的特点；水环境退化成本测算采用的是原油开采和加工过程中的外排废污水深度处理费用，属于预防性成本，而不是废污水外排到周围水体后造成的水质恶化及其他间接影响等成本，因而该项成本数值相对较小；土壤污染成本仅考虑了油田范围内因勘探和开发等需要的钻井造成的周边一定范围内的土壤影响，并未包括次生的土地盐碱化、植被退化等损失。因此，

本项目的成本测算尚不能完整反映石油开采和消费对水资源的影响，但是基于目前的数据条件和计算方法，主要的项目均已有所体现。

（2）未货币化的部分

石油开发利用对水资源的诸多影响中，难以量化的部分主要包括以下几个方面：①原油开采的勘探井、采油井破坏了地下含水层结构，且在开采过程中容易因密封不严而导致油水串层，周边地下水中石油类、重金属等污染物超标，且容易随地下水转移，造成更大范围影响。这部分影响在实际生产中存在，例如新疆某油田地下水污染^[7]，但因缺乏客观的影响量指标，难以定量分析。②原油开采、炼制等过程中产生的废水需要处理后才能外排或者回用，这部分成本计算在石油石化企业运营成本中，相应的提标改造（由当前处理标准提高到更优水质标准）的成本计算在本项目研究的外部成本中。但是在废水处理过程中产生的浓缩污水、污泥等，部分甚至达到危险废物标准，若未得到妥善处理，将对水资源及生态环境造成严重影响；在分析计算中，这部分成本由于缺乏权威、规范的处理标准而难以量化。③原油生产运输过程中存在的渗漏、泄露风险，以及石油炼制和进一步加工转化过程中的事故风险，对水资源和生态环境影响巨大。例如，2011年中海油渤海湾漏油事故，中海油和康菲公司支付支付 16.83 亿元，用于秦皇岛市渔民补偿，赔偿溢油事故对海洋生态造成的损失，并承担保护渤海环境责任。但是这部分影响缺乏对事故风险概率的客观度量，也难以量化并平摊纳入石油真实成本。同时需要强调的是，清污和赔偿成本并不能完全覆盖生态环境损失。④受石油相关产业影响引发的水资源、水环境、水生态问题，进而导致水生生物、水体生态价值等间接损失，也未纳入本次外部成本计算。

综上所述，本文计算的原油开采和炼制环节的水资源外部成本仅为在目前数据和方法条件下可量化的部分，但是实际考虑全口径影响下的石油开发利用的水资源外部成本显然更高，特别是在相关行业废污水未达标排放、泄露事故等非正常工况下，造成的潜在损失巨大，如图 2- 1。



图 2- 1 外部成本不确定性

2. 风险分析

石油在开采、运输、炼制、化工等各个环节均存在不同类型的泄露和污染风险，在真实成本计算中难以量化，仅在此处做定性分析及部分案例说明。

（1）原油开采和运输

国内外在原油开采和运输过程中均有不同程度的事故发生，如表 2- 4。原油及其产品的泄露使河流、湖泊、海洋、地下水等水体受到严重污染，造成水生生物生存和栖息相关的物理、化学、生物等多重损害，并通过生物链间接传导到人类及其他生物，其影响具有长期性。若仅从清污费用来说，据测算，墨西哥湾原油泄漏事件中原油清理费用预计高达 280 亿美元，超过英国石油公司年营业收入的 10%；相应的潜在损失巨大，难以估量。

（2）石油炼制、化工

对于石油化工相关项目，也存在不同类型的事故风险，对周围环境和水体造成严重影响，如表 2- 5。其中，原料和炼化产品的泄漏流入水体后，污染范围难以控制，且污染物成分复杂、处理困难，短期污染和长期损害并存，实际损失极大。

表 2- 4 国内外石油开采和运输重大事故

序号	项目位置	事故概况
1	美国墨西哥湾原油泄漏	事故损失: 2010 年 4 月 20 日, “深水地平线” 钻井平台爆炸沉没, 海下受损油井开始漏油, 每天有 5000 桶 (约 1 万吨) 原油泄漏到墨西哥湾。墨西哥湾沿岸水质、湿地、海滩严重污染, 对渔业及脆弱物种影响巨大。 事故原因: 甲烷气泡爆炸。
2	连接美国怀俄明州与蒙大拿州交界处油田和比灵斯市的输油管道	事故损失: 2011 年 7 月 4 日, 连接美国怀俄明州与蒙大拿州交界处油田和比灵斯市的输油管道发生的泄漏事件, 泄漏点在比灵斯附近的劳雷尔市, 大量原油流入黄石河, 污染了几十公里长的河段。 事故原因: 洪水导致管道破裂。
3	鹿特丹港输油管道	事故损失: 2007 年 1 月 18 日, 欧洲西北部地区遭受强烈暴风雨袭击, 管道在暴风中被损坏, 大量石油泄漏, 造成欧洲最繁忙港口航运中断。 事故原因: 自然灾害。
4	中石油兰郑长成品油管道渭南支线	事故损失: 2009 年 12 月 30 日, 中石油兰郑长成品油管道渭南支线泄漏柴油量为 150m ³ , 50m ³ 得到回收, 其余约 100m ³ 泄漏, 大量柴油经赤水河流入渭河。 事故原因: 第三方施工。
5	中国石油大连输油分公司输油管道	事故损失: 2004 年 7 月 25 日管道破裂造成大量原油泄漏, 管道破裂口所在地瓦房店市土城乡李小村受到严重污染。 事故原因: 管道自然老化破裂。

表 2- 5 石油化工项目事故类型及影响

事故可能性排序	事故严重性分级	事故影响类型
1	5	着火燃烧烟雾影响环境
2	3	油泄漏流入水体造成损失
3	2	爆炸震动造成厂外环境损失
4	4	爆炸碎片飞出厂外造成环境损失
5	1	毒气泄漏污染环境造成损失

资料来源：《连云港市某炼化一体化项目环境影响报告书》

3

结论及展望

3.1 主要结论

(1) 石油开发利用与水资源之间存在紧密的纽带关系。

我国石油资源集中分布的渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯、准噶尔、珠江口、柴达木和东海陆架等八大盆地，与我国地下水赋水平原-盆地高度重合，且多属于缺水地区，石油资源开发利用与水资源保护之间的矛盾较为突出。

石油开发、加工、转化、利用的全过程均对水资源产生影响。原油开采前期的钻井勘探、开采过程中的注水驱油，不仅破坏了区域天然水循环系统，耗用了大量水资源，而且原油泄漏、回注污水串层等对地表水、土壤和地下水造成污染，间接引起生态退化等问题。石油炼制和相关化工制品制造相关行业多属于高耗水高排放行业，加剧了区域水资源供需矛盾，且废污水排放影响周边水体环境。

(2) 石油开发利用造成水资源耗减、水环境退化、土壤污染等，对应不同的外部成本。

石油开发利用中的原油开采和石油炼制等两个环节，对水资源、水环境及生态影响较为直接且显著，本研究考虑和测算了水资源耗减、水环境退化、土壤污染等三方面。通过典型调查、文献调研和深入分析，确定各方面影响的影响量指标和价值量指标，在此基础上测算各项外部成本及其合计值。水资源耗减成本方面分别考虑了原油开采和石油炼制的地下水超采影响量，并按照水资源影子价格计算其相应价值；水环境退化成本方面分别考虑原油开采和石油炼制的单位排水量，并按照废污水深度处理成本计算其消除成本；土壤污染成本方面考虑石油勘探和开采中油井周围的土壤污染面积，结合单位土壤治理成本确定其修复费用作为外部成本。

综合分析结果表明，原油开采的水资源外部成本为 24.21 元/t，石油炼制的水资源外部成本为 3.96 元/t，石油开采和加工的水资源外部成本合计为 28.16 元/t。需要说明的是，本项目的成本测算尚不能完全反映石油开采和消费对水资源的影响。

3.2 政策建议

(1) 在石油石化行业的规划布局方面，应充分考虑区域水资源承载力约束。

加强石油开发利用全过程对水资源影响的事前评估，特别是石油开采对地下水系统



造成的水循环改变、水体串层污染等的影响，并结合国家推行的水资源承载力评价，科学制定石油石化行业规划布局对水资源可持续利用的影响评价体系和风险防范机制。

对于水资源“超载”且石油石化行业影响较大地区，限制审批新上石油石化项目，并对现有项目进一步严格取用水量及废污水排放的要求。

(2) 在石油石化企业的生产运营方面，应明确并逐步提高水资源“量-质-效”指标要求。

依照最严格水资源管理制度、水污染防治行动计划等政策要求，明确制定石油石化企业的取用水量数量和效率以及废污水排放数量和水质等要求，并综合考虑政策、技术、成本以及生态文明建设要求等，逐步提升相应标准。

推广节水减排先进技术，提升石油开发利用的废污水处理回用率，减轻取用水及废污水外排对周边水体环境的影响。

(3) 在石油石化企业的影响管理方面，应加强其对生态环境影响的监测和修复。

结合取水许可、排污许可等相关制度，加强对石油石化企业水资源影响的管理和防范。强化石油开发利用全过程对水资源“取-用-耗-排”的监测，细化相关奖惩措施并严格执行。

对于石油开发利用过程中造成的水资源、水环境、水生态以及土壤、植被、水循环系统等多重影响，应明确主体责任，逐步建立切实可行的生态补偿和修复机制。

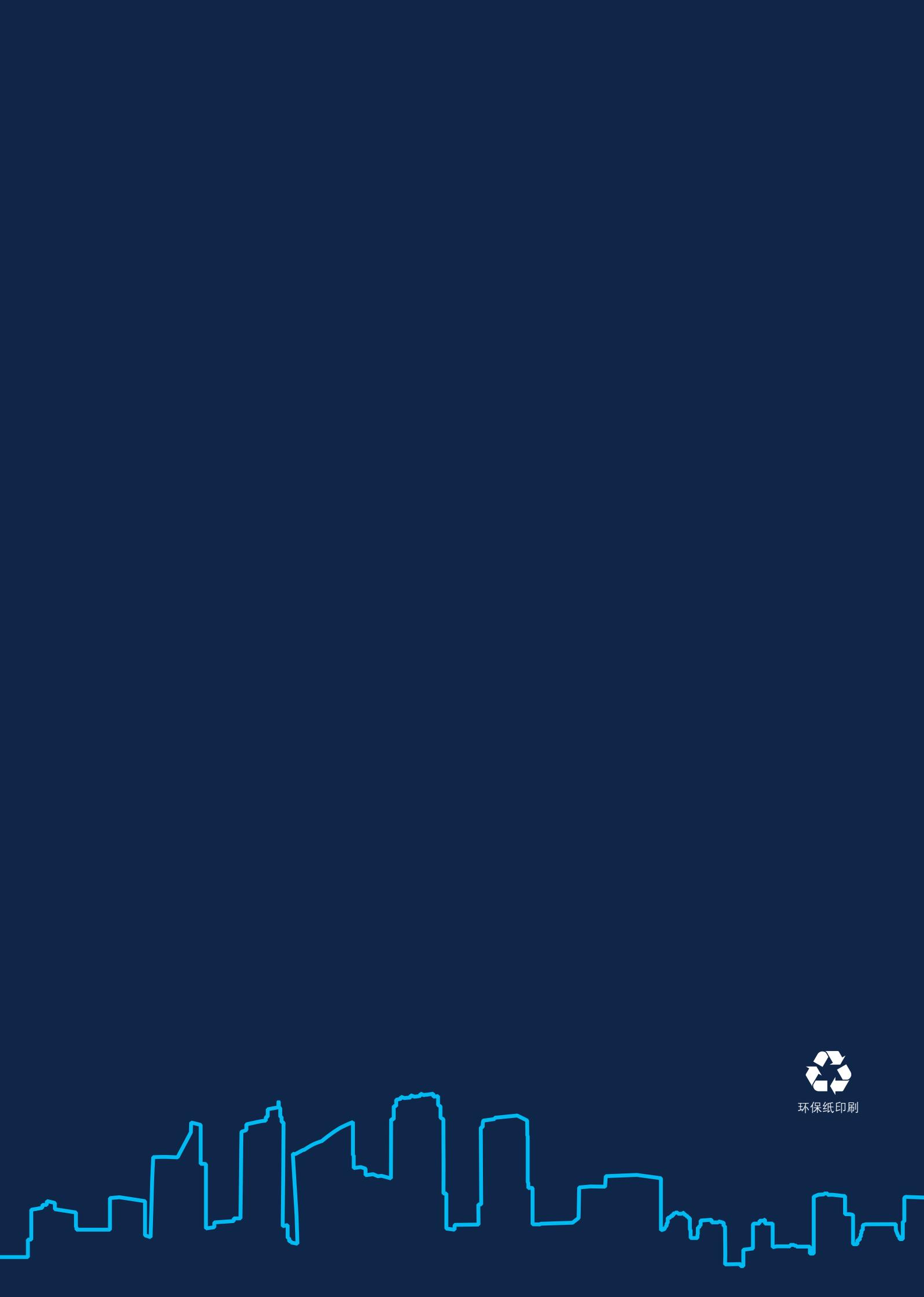
(4) 将石油开发利用的外部成本内部化，促进石油相关企业节水减排。

通过资源环境税等市场手段，将石油开发利用过程对水资源、水环境、水生态影响的外部成本加入石油相关企业的运营成本。在明确外部影响的总量指标和定额指标标准的基础上，对石油相关企业实行超额累进的资源环境影响经济处罚。

同时，通过水权、排污权交易等方式，促进石油企业提升节水水平、提高排放标准，并以此获得实际效益，提高相关企业降低石油开发利用的生态环境影响的积极性。

参考文献

- [1] 姜吉生, 王勇, 祁敏, 等. 大庆市主要环境地质问题及其综合治理 [J]. 黑龙江大学学报(自然科学版), 2004, 31(4):86-89.
- [2] 刘大平, 刘成玉. 大庆油田石油开采对水文地质环境的影响及应因对策 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2012, 44(3):136-141.
- [3] 郑自宽. 董志塬石油开发对地下水资源的影响与保护对策 [J]. 地下水, 2010, 32(1):59-60.
- [4] 沈卫军. 大庆油田石油开采对水文地质环境的影响及应因对策 [J]. 化学工程与装备, 2017(3):86-87.
- [5] 张亚非. 油田开发对生态环境的影响 [J]. 油气田环境保护, 2006, 16(4):28-30.
- [6] 中国水利水电科学研究院. 煤炭总量控制的水资源协同效应研究 [R]. 2015.
- [7] 刘宇程, 陈明燕. 新疆油田开发区域地下水资源污染现状分析与预防措施 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4):75-78.



环保纸印刷