



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院
碳中和与能源创新发展研究院

迈向“双碳” 指数系列报告

(I 系列-2021I01)

《 中国石油生产碳排放强度指数 》





中国石油生产碳排放强度指数 (摘要性报告)

核心结论

- 1960-2018 年中国油气生产碳排放强度指数呈现阶段式增长趋势，年均增长率为 0.62%，到 2018 年油气生产碳排放强度指数是 1960 年的 1.4 倍。
- 2018 年中国油气生产平均碳排放强度为 46.7 kgCO₂e/桶，中国石油、中国石化和中国海油分别为 54.6 kgCO₂e/桶、45.3 kgCO₂e/桶和 25.4 kgCO₂e/桶。
- 2018 年国内油田生产碳排放强度在 22.8-71.8kgCO₂e/桶间，其中海上油田整体生产碳排放强度比陆地油田低 52%。
- 2018 年油田生产区块碳排放强度处于 18.2-109.76 kgCO₂e/桶间，生产碳排放强度最低的三个区块为南海西部油田涠洲 11-4N、渤海油田锦州 25-1S 和旅大 5-2。
- 油田生产区块碳排放强度较高的主要原因有：开发时间久，油田高含水；单井产量低、开发强度大；资源品质差，部署提高采收率技术。

1. 研究背景与目的

双碳目标开启了我国能源系统的深度脱碳之路。在煤炭退出路径逐步清晰的背景下，同为化石能源的油气发展则十分重要，是中长期能源系统深度脱碳的关键之一。当今世界正处于百年未有之大变局，不稳定不确定性因素明显增多，油气安全依然是事关我国当前社会经济发展全局的战略性问题。当前我国石油、天然气的对外依存度已分别超过 70%和 40%。习近平总书记早在 2018 年 7 月做出了大力提升国内油气勘探开发力度、保障国家能源安全的重要指示。2021 年 10 月 21 日，习近平总书记在胜利油田考察时进一步强调石油能源建设对我们国家意义重大，中国作为制造业大国，要发展实体经济，能源饭碗必须端在自己手里。

基于此，油气安全、碳中和已成为中国油气生产需要面临的重要现实问题。在油气生产面临多重目标的背景下，科学认识中国油气生产的碳排放趋势及不同油气资源生产的碳排放差异，既是在碳中和背景下高质量推进油气生产保障能源

安全的战略需求，又是实现油气系统低碳化转型的重要抓手。本报告将基于油气生产视角，以国内 242 个正在开发的油田区块数据为支撑，对中国油气公司、油田、区块三个层级的生产碳排放强度进行核算，以刻画出 1960-2018 年的国内油气生产碳排放强度指数演进趋势，为系统认识油气资源的碳管理问题提供参考。

2. 主要研究思路与方法

2.1 油气生产碳排放核算数据基础

中国油气生产碳排放核算对象为油田生产区块，包括国内 242 个正在开发的油田区块，目前天然气生产仅包括石油生产中的伴生气体。所有生产区块隶属于中国石油、中国石化、中国海油和延长石油等旗下的 24 家油田。根据 2020 年的《中国能源统计年鉴》数据，本报告中核算的 242 个生产区块在生产期内的总产量占国内石油产量比例平均达 80% 以上。

2.2 油气生产碳排放核算边界

油田开发的碳排放核算主要包括**勘探阶段、钻井阶段、开采阶段、处理阶段和运输阶段的直接和间接排放**，如图 1 所示。直接排放有燃料燃烧的温室气体排放（包括 CO₂、CH₄、CO、VOC 和 N₂O）、天然气火炬燃烧的 CO₂ 和 CH₄ 排放、工艺放空和逃逸的 CO₂ 和 CH₄ 排放以及在 CO₂ 驱油提高采收率过程中考虑埋存抵消的碳排放；隐含碳排放包括油田开发过程中外购电力生产的隐含排放、油田开发基础设施及开发过程所消耗材料（钢材、水泥、砂子及其他添加剂）在生产 and 运输过程中的隐含排放。本报告中油气生产碳排放核算结果同时包含 CO₂、CH₄、CO、VOC 和 N₂O 五类温室气体，不同温室气体的全球变暖潜能值（GWP）参考 IPCC 第五次评估报告公布的数据。

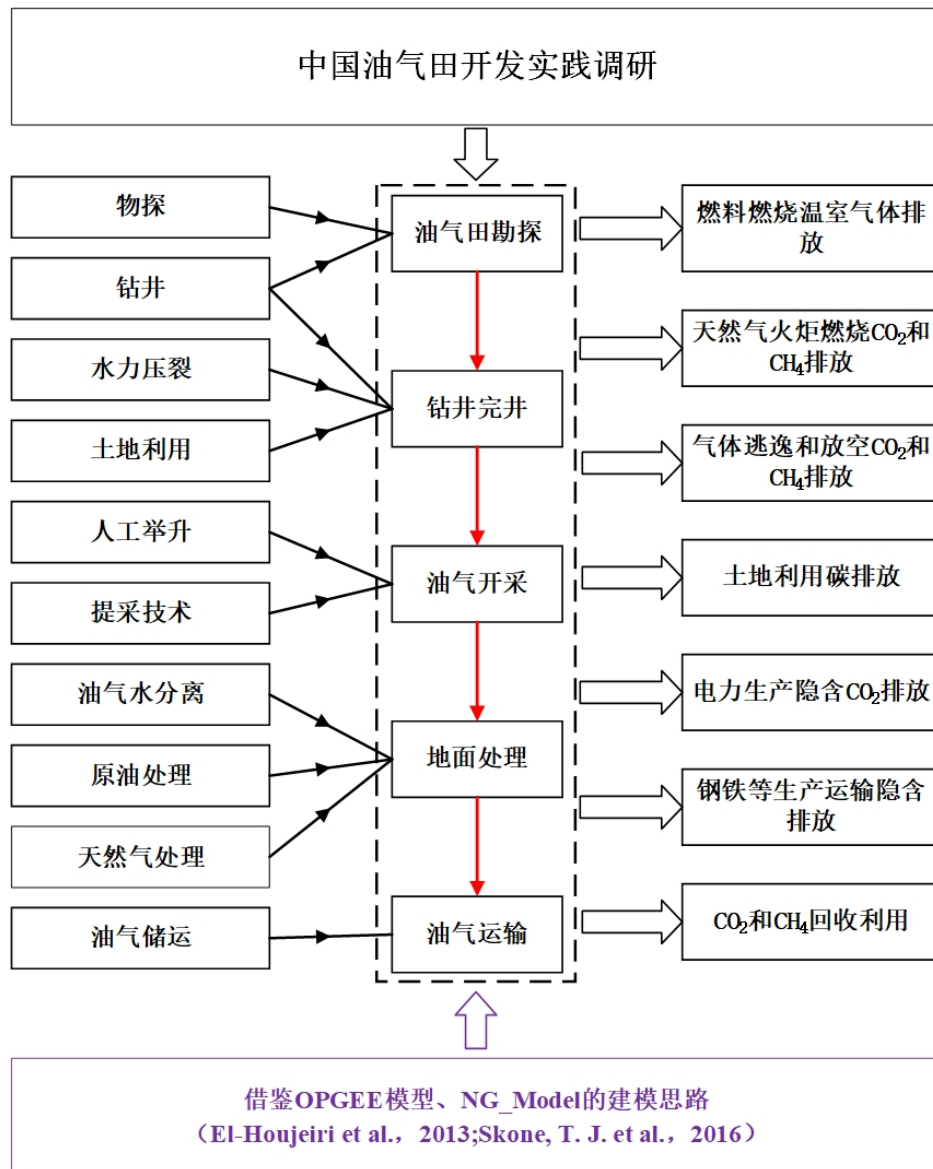


图 1. 油气生产碳排放核算框架

2.3 油气生产碳排放核算方法

本报告基于工程生产的自下而上视角，对油气勘探开发、生产处理及运输等主要环节的碳排放进行建模核算。在模型构建方面，油气生产中勘探、钻井、开采、处理和运输阶段的碳排放核算借鉴斯坦福大学的石油生产温室气体排放核算模型 OPGEE (Oil Production Greenhouse Gas Emissions Estimator) 和钻井压裂温室气体排放核算模型 GHGfrack。基于已有模型原理，结合国内油田尺度的开发活动，突出油气资源异质性及开发过程的动态差异，构建符合中国油气生产实践的碳排放强度评估模型。主要的核算方法包括：

(1) 油气生产活动的直接碳排放核算。在勘探、钻井和运输阶段，分别考

考虑油气盆地面积、油藏埋深、地层物性、集输管线长度及油田到炼厂的距离等静态参数对油田区块生产碳排放的影响；在开采和处理阶段，考虑油田区块产油量、产水量和产气量对开发方式及处理工艺的动态影响。

(3) 油气生产活动的间接碳排放核算。油田生产的间接排放包括电力生产排放、钢材、水泥、砂子等物资生产及运输过程中的排放。由于电力结构、发电效率、电网传输效率等电力排放的影响因素和钢材等生产物资的生产碳强度都会随着技术进步不断变化，因此对相关参数进行了动态化设置。

(3) 油气生产活动的环境影响碳排放核算。国内不同油气资源所在盆地的土地生态环境类型多样，比如农田、草地、山地、沙漠、海洋等。鉴于油气生产活动（井场建设、修路、钻井、开采等）长期破坏的土地生态环境对碳排放的影响不同，本报告中细化了在油田开发活动中，农田、草地、山地、沙漠、海洋等生态环境的土地利用排放系数。

3. 主要研究结果

3.1 中国油气生产碳排放强度

3.1.1 油田生产区块碳排放强度分布及特征

如图 2 所示，国内 242 个正在开发的油田区块生产碳排放强度分布在 18.2 kgCO₂e/桶（南海西部油田涠洲 11-4N 区块）和 109.8kgCO₂e/桶（玉门油田老君庙区块）之间。从整体看，中国石油、中国石化和延长石油三家公司所属油田生产区块的碳排放强度从高到底分布比较均匀，而中国海油所属油田生产区块碳排放强度整体较低。

碳排放强度较高的油田生产区块主要特征为：

(1) 开采时间较长、油田整体处于高含水期，开采、处理过程能耗大，比如玉门油田老君庙区块、大庆油田萨尔图区块、胜利油田胜坨区块等；

(2) 单井产量低，油田整体开发强度大，比如陕西延长石油王家川区块、下寺湾区块、南泥湾区块等；

(3) 资源品质差，采用能量密集型的提高采收率技术，比如辽河油田欢喜岭区块、新疆油田百口泉区块和渤海油田南堡 35-2 区块等采用蒸汽驱提高采收率。



碳强度较低的油田区块普遍刚处于生产初期，一般为人工举升或者水驱开发早期，具有稳定的石油产量并且含水率无明显上升，开采过程中的能耗低。比如胜利油田埕岛区块、大港油田赵东区块、吐哈油田鲁克沁区块。此外，相比在草地、农田等土地生态环境的陆上油田，海洋、沙漠中开发的油田生产活动对土地生态环境破坏的影响程度更低，油田生产区块的整体碳排放也更少，这也解释了中国海上油田与陆上沙漠油田生产碳排放强度整体较低的原因。

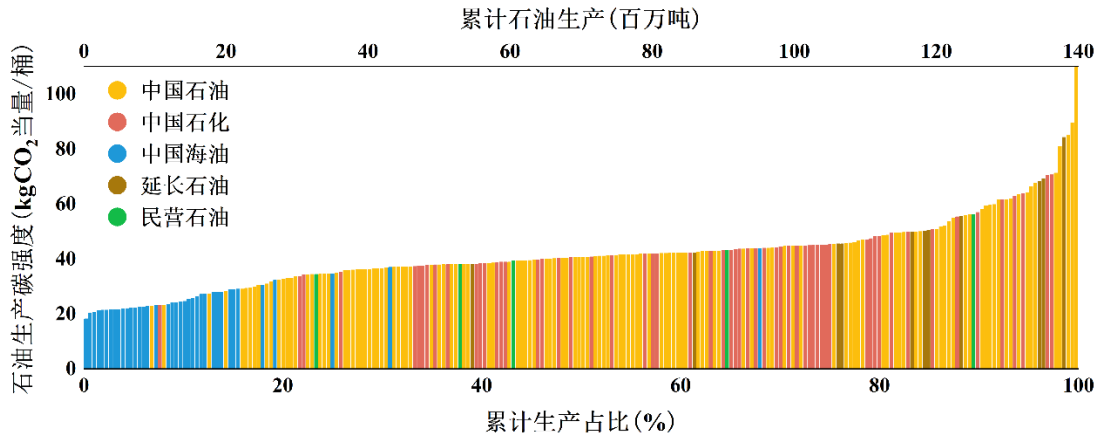


图 2. 中国油田生产区块生产碳排放强度

3.1.2 油田生产碳排放强度

(1) 油田产量与排放量的结构差异

就 2018 年石油产量而言，大庆油田、长庆油田等中国石油旗下的油田产量占比 55.9%，胜利油田等中国石化旗下的油田产量占比 18.5%，渤海油田等中国海油旗下的油田产量占比 19.8%。就 2018 年油气生产碳排放而言，中国石油、中国石化和中国海油的碳排放份额分别为 65.9%、17.7%和 10.6%。中国石油和中国海油的石油产量和碳排放量之间存在较大的差异。具体以大庆油田和渤海油田为例，2018 年大庆油田的石油产量占比为 21.6%，而石油生产伴随的碳排放量占比达到 33.7%；渤海油田正好相反，2018 年渤海油田的石油产量占比为 14.5%，而石油生产伴随的碳排放量占比仅有 7.7%，如图 3 所示。

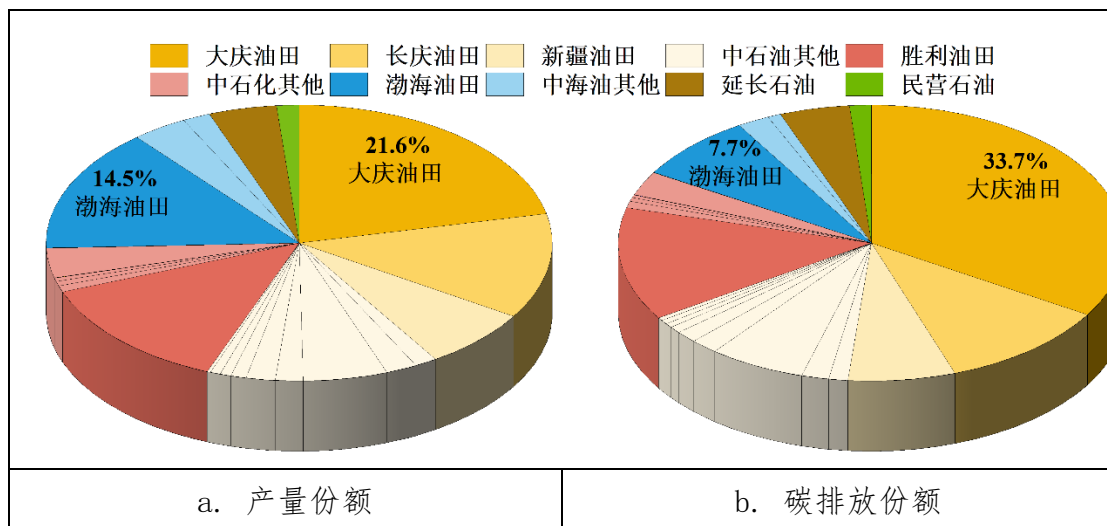


图 3. 2018 年中国油田的产量和碳排放结构

(2) 油田生产碳排放强度分布及其特征

将 2018 年油田生产区块的碳排放强度按照所属油田进行产量加权平均，得到各油田上游生产的碳排放强度分布，如图 4 所示；红色虚线表示 24 个油田整体的产量加权平均碳排放强度，达到了 46.7kgCO₂e/桶。具体油田的生产碳排放强度分布在 22.8kgCO₂e/桶（南海西部油田）和 71.8kgCO₂e/桶（玉门油田）之间。

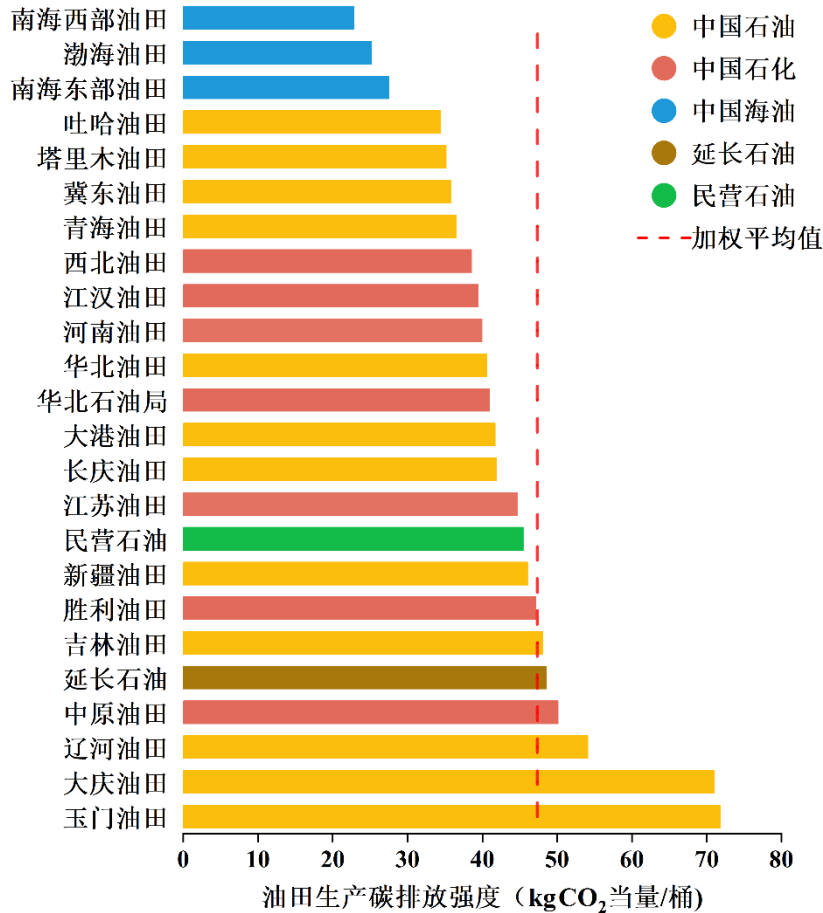


图 4. 中国油田生产碳排放强度排序

中国石油旗下玉门油田、大庆油田的生产碳排放强度均在 $70\text{kgCO}_2\text{e}/\text{桶}$ 以上，属于油田生产高碳排放的一档。主要原因在于目前大庆油田和玉门油田旗下的主力区块萨尔图 and 老君庙开发时间均在 60 年以上，为了维持石油产量，高强度水驱开发导致生产石油综合含水率达到 97% 以上，大幅增加了开采和处理过程中的能源消耗。

中国石油旗下的其他油田、中国石化旗下的油田、延长石油以及民营石油的生产碳排放强度在 $30\text{kgCO}_2\text{e}-60\text{kgCO}_2\text{e}/\text{桶}$ 之间，属于油田生产中碳排放的一档。中国石油辽河油田和吉林油田是国内主要的稠油和高凝油生产基地，在提高采收率阶段需要采用能量密集型的蒸汽驱等热采提高采收率技术，主力区块生产过程中碳排放强度也随之增加；作为典型的“三低”油藏（低渗、低压、低丰度），长庆油田主力区块开采时间大部分都不到 30 年，但是存在单井产量低、油藏递减快、采油速度慢等问题，整体生产碳排放强度处于中等偏上。延长石油与长庆

油田同在鄂尔多斯盆地开展油气生产，也面临“三低”油藏低效开采的问题，并且整体产量比长庆油田更低，所以生产过程中的碳排放强度比长庆油田更高。虽然胜利油田中开采最早的胜坨区块等生产碳排放强度已经达到 $70\text{kgCO}_2\text{e}/\text{桶}$ 以上，但是随着埕岛等生产碳排放强度较低、规模大的海上接替区块投产，胜利油田整体的生产排放强度在全国平均水平附近，2018年海上接替埕岛区块产量已经达到胜利油田的五分之一左右。

中国海油旗下的渤海油田、南海东部油田和南海西部油田生产碳强度在 $30\text{kgCO}_2\text{e}/\text{桶}$ 以下，属于油田生产低排放的一档。从土地利用的碳排放影响来看，海上钻井平台或者钻井船开发油田相比陆上油田开发活动对土地生态环境的影响可忽略，无额外的环境影响碳排放，所以海上油田生产的初始碳排放强度远小于陆地油田。从生产角度看，海上油气资源基本上在1990年以后才大规模投入开发，目前生产稳定并且接替资源潜力大。综上海上油田生产碳强度明显低于其他油田且发展潜力巨大。

3.2 中国油气生产碳排放强度指数

本报告以242个油田区块生产期内的碳排放强度数据为基础，刻画了1960-2018年的中国油气生产碳排放强度指数演进趋势，如图5所示。其中1960年的基准碳排放强度指数为100。

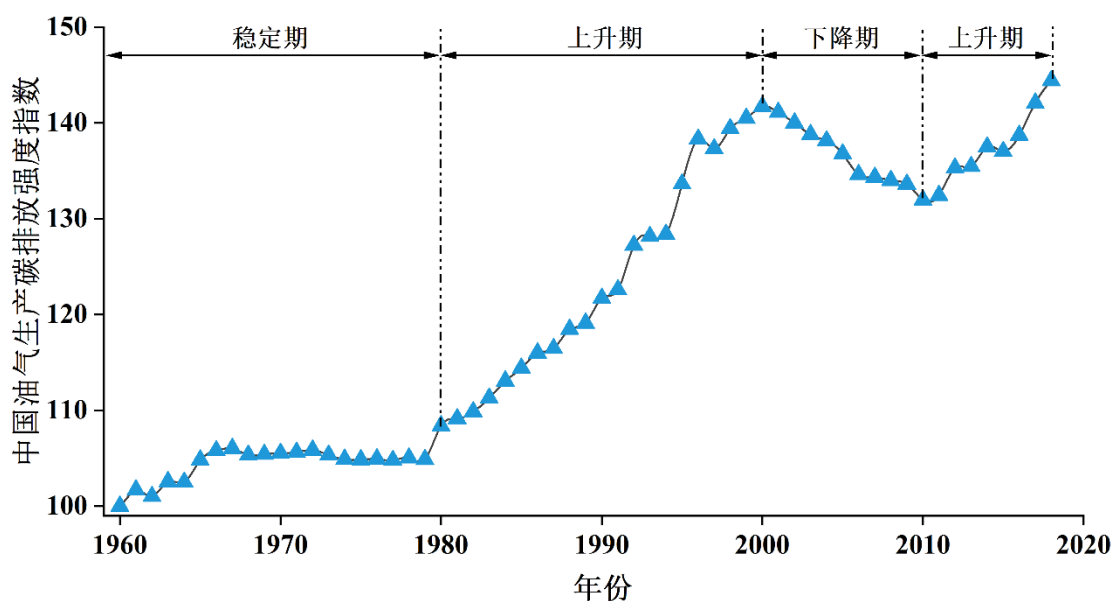


图 5. 中国油气生产碳排放强度指数



总体来看，1960-2018 年我国油气生产碳排放指数呈现阶段式增长趋势，可分为四个阶段：稳定阶段（1960-1980 年）、上升阶段（1980-2000 年）、短暂下降阶段（2000-2010 年）和继续增长阶段（2010-2018 年）：

（1）稳定阶段（1960-1980 年）：大庆油田、胜利油田等最早投入开发的主力区块产量稳定，并且生产初期开采难度低，碳排放强度呈现稳定趋势；

（2）上升阶段（1980-2000 年）：辽河油田等稠油区块开始采用大规模蒸汽驱提高采收率技术；同时河南油田、大庆油田、胜利油田等大部分区块产量下降明显进入水驱开发阶段，生产碳排放强度随着开采难度的增加逐步上升；

（3）短暂下降阶段（2000-2010 年）：随着渤海油田、西北油田、大港油田等处于生产早期且碳排放强度较低的油田大规模投产，国内整体的油气生产碳排放强度小幅下降；

（4）继续增长阶段（2010-2018 年）：这一时期国内主要油田产量递减明显，开采难度同步增加。以玉门油田、大庆油田、胜利油田为代表的老油田均进入高或超高含水期；长庆油田、延长石油继续加大钻井开发强度维持产量；以及蒸汽驱、气驱等提高采收率技术在辽河油田、新疆油田等的使用规模不断扩大，以上综合作用导致国内油田的整体生产碳排放强度不断攀升。

4. 研究结论与政策建议

本报告以国内 242 个正在开发的油田区块生产数据为支撑，从油气生产的微观视角出发，对中国油气公司、油田、生产区块三个层级的生产碳排放强度进行了核算，进而分析了国内 1960-2018 年油气生产碳排放强度的演进趋势。在此基础上，从油气资源开发协同管理、优化油气资源开发结构等维度给出政策建议，主要内容有：

（1）协同管理油气资源开发中的产量与生产碳排放。为了保障国家油气安全，目前处于中高排放一档的大庆油田、胜利油田等高含水生产区块和辽河油田、新疆油田等稠油区块仍在持续开发，同时还有长庆油田等“三低”油田在未来都将面临生产碳强度不断增加的问题。因此在追求油田区块产量最大化的同时要协同考虑生产过程中的碳排放问题。通过优化水驱、蒸汽驱等技术工艺中的含水率、注入比等指标，以及不断提升设备能效和能源利用率来实现稳产减排的双重目标。

(2) 持续关注不同油气生产排放的异质性，优化油气资源开发结构。目前常规油气产量开始递减，非常规油气产量逐步扩大，因此通过加强碳排放核算研究，增加对页岩油气等非常规资源的不同开发阶段生产碳排放的认识；同时在油气生产碳排放核算中评估以 CO₂ 驱油为代表的 CCUS 技术中埋存的 CO₂ 量对于生产碳排放强度的影响，不同的油气盆地物性差异导致 CO₂ 封存潜力不同，将会对未来油气资源的开发结构带来显著影响。

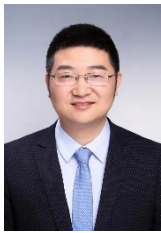
(3) 从油气生产减碳的角度重视对海洋、沙漠等区域油气资源的勘探开发。我国含油气盆地的土地生态环境主要包括草地、农田、山地、沙漠和海洋等，鉴于不同油气盆地的土地生态环境固碳能力的差异，沙漠和海上油田所处土地生态环境植被很少，覆盖度低，油田开发破坏植被的碳排放影响可以忽略不计，因此这一区域的整体生产碳强度较低；此外，以渤海、南海为代表的海洋油气和以新疆为代表的沙漠油气的接替资源潜力充足，加大这两个区域油气的勘探开发力度可实现增产与生产减碳协同效益。



关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



唐旭（1985.1-），男，中国石油大学（北京）经济管理学院院长，教授，博导，校青年拔尖人才。耶鲁大学、瑞典乌普萨拉大学访问学者。从事能源系统工程、能源经济管理等研究。主持国家自科、国际合作、教育部基金等项目，在国内外知名期刊发表文章 40 余篇。



杨哲琦（1996.10-），男，中国石油大学（北京）经济管理学院管理科学与工程专业博士研究生，曾在中石大石油工程学院学习。目前研究方向为能源系统与碳管理，参与研究国家自然科学基金面上项目、中石油、中海油等企业课题，并参与发表 SCI 论文 2 篇。



王建良（1987.11-），男，中国石油大学（北京）教授，博导，校青年拔尖人才，瑞典乌普萨拉大学访问学者。从事油气行业低碳转型、油气系统工程等方面研究。主持国家自科、国际合作、教育部基金、国家能源局等项目，在国内外知名期刊发表文章 40 余篇。

本报告校对：王建良、朱金宏

报告引用：唐旭，杨哲琦，王建良. 中国石油生产碳排放强度指数[R]. 中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2021H01, 2021 年 11 月 20 日.



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院

碳中和与能源创新发展研究院

Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University
of Petroleum, Beijing (ICED-CUPB)

联系电话: 18910556924 邮箱: iced-cupb@cup.edu.cn

微信公众号: ICED-CUPB

地址: 北京市昌平区府学路18号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

