

引用格式: 刘成林, 王馨佩, 车长波, 等. 中国非常规油气与可再生能源发展前景[J]. 世界石油工业, 2025, 32(3): 12-21.

LIU Chenglin, WANG Xinpei, CHE Changbo, et al. Development prospects of unconventional oil and gas and renewable energy in China[J]. World Petroleum Industry, 2025, 32(3): 12-21.

中国非常规油气与可再生能源发展前景

刘成林^{1, 2}, 王馨佩^{1, 2}, 车长波³, 刘成文⁴, 朱玉新⁵, 李君军⁶,
陈践发^{1, 2}, 胡浩然^{1, 2}, 洪思捷^{1, 2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国矿业联合会, 北京 100029; 4. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司川东钻探公司, 重庆 400021; 5. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007; 6. 中国石油浙江油田分公司勘探开发事业部, 重庆 402160)

摘要: 中国油气供需矛盾严峻, 常规油气勘探与开发难度日益增大, 开展中国非常规油气和可再生能源现状分析与前景预测具有重要意义。为了给中国能源开发利用提供参考, 通过厘定能源概念与分类、非常规油气地质与开发特征、可再生能源特征, 基于历史产量数据, 结合中国能源需求分析结果, 采用资源量—储量约束下的产量预测模型, 开展了中国非常规油气与可再生能源中长期产量预测。研究结果表明: ①一次能源划分为不可再生能源、可再生能源。非常规油气属于来自地壳外部的不可再生能源, 包括致密油、致密气、页岩油、页岩气、煤层气、油页岩、油砂、天然气水合物等。可再生能源包括来自地壳内部的地热能, 来自地壳外部的太阳能、风能、水能、生物质能、海水温差能、海洋波浪能、海水盐差能等。②非常规油气多数为源储共生, 包括源储一体型和源储接触型。储层的孔隙度低、渗透率低, 地质资源量大, 采收率低。预测显示页岩油、页岩气、煤层气勘探开发潜力大, 2060年中国产量将分别达到 $0.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $1\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。③可再生能源资源丰富, 分布广泛, 清洁干净, 可以循环利用, 不同类型的可再生能源特点不同, 开发利用条件、技术相差较大。预测风能、太阳能、生物质能在未来较长时期是开发的重点, 2060年中国发电量将分别达到 $33\,000 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $18\,000 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $16\,500 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 在中国能源生产与消费结构中占比持续增加。结论认为, 非常规油气将在未来较长时间内支撑中国油气可持续发展, 可再生能源在能源消费结构中能否占到较大比例取决于其开发技术的突破; 坚定中国非常规油气与可再生能源发展的信心, 提出并完善适合中国地质条件的非常规油气富集理论与勘探开发技术, 需要进一步加大研发可再生能源开发技术。

关键词: 非常规油气; 可再生能源; 地质条件; 资源潜力; 资源量-储量约束; 产量预测模型; 非常规油气富集理论; 可再生能源开发技术

中图分类号: TE155

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2025)03-0012-01 DOI: 10.20114/j.issn.1006-0030.20240810001

Development prospects of unconventional oil and gas and renewable energy in China

LIU Chenglin^{1,2}, WANG Xinpei^{1,2}, CHE Changbo³, LIU Chengwen⁴, ZHU Yuxin⁵, LI Junjun⁶,
CHEN Jianfa^{1,2}, HU Haoran^{1,2}, HONG Sijie^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. China Mining Association, Beijing 100029, China; 4. Chuandong Drilling Company, Chuanqing Drilling Co., Ltd., Chongqing 400021 China; 5. Gas & New Energies Company, PetroChina Oil, Beijing 100007, China; 6. Exploration and Development Division, Zhejiang Oilfield Company, PetroChina Oil, Chongqing 402160, China)

Abstract: Given the severity of the supply-demand imbalance in China's oil and gas industry, the difficulty of conventional oil and gas exploration and development is increasing. Therefore, it is of great significance to conduct an analysis of the current situation and forecast the prospects of unconventional oil and gas and renewable energy in China. By defining the concept and classification of energy, unconventional oil and gas geology and development characteristics, and renewable energy

收稿日期: 2024-08-10

修回日期: 2025-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目“富氢天然气成藏机制及氢资源分布预测技术”(2021YFA071900); 国家自然科学基金项目“咸化湖盆条件下盐类对地层超压的作用机制研究”(41872127); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目“黑色页岩有机质富集机制探讨——以重庆地区五峰-龙马溪组为例”(CSTB2024NSCQ-LZX0108)

第一作者: 刘成林(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 从事天然气成藏和资源评价研究工作。

E-mail: liuel@cup.edu.cn

characteristics, based on historical production data and combined with China's energy demand analysis, the Habbert model, Gaussian model, and production prediction model under resource reserve constraints were used to carry out medium and long term production forecasting of unconventional oil and gas and renewable energy in China, providing reference for China's energy development and utilization. ① Primary energy is divided into non renewable energy and renewable energy. Unconventional oil and gas belong to non renewable energy sources from outside the crust, including tight reservoir oil, tight reservoir gas, shale oil, shale gas, coalbed methane, oil shale, oil sands, natural gas hydrates, etc. Renewable energy includes geothermal energy from inside the crust, solar energy, wind energy, hydro energy, biomass energy, seawater temperature difference energy, ocean wave energy, seawater salt difference energy, etc. from outside the crust. ② Unconventional oil and gas are mostly source-reservoir paragenesis, including source-reservoir integrated type and source-reservoir contact type. The porosity and permeability of unconventional reservoirs are low, in-place resources are large, and recovery rate is low. Predictions show that shale gas, shale oil, and deep coalbed methane have great potential for exploration and development, and future production will increase rapidly. ③ Renewable energy resources are abundant, widely distributed, clean, and recyclable. Different types of renewable energy have different characteristics and development and utilization conditions, with significant differences in technology. It is predicted that geothermal energy, solar energy, and wind energy will be the focus of development in the long term, and their proportion in China's energy production and consumption structure will continue to increase. ④ Understanding and suggestions on unconventional oil and gas and renewable energy in China: Unconventional oil and gas will support the sustainable development of China's oil and gas in the long term, and the significant proportion of renewable energy in the energy consumption structure lies in breakthroughs in development technology. Strengthen confidence in the development of unconventional oil and gas and renewable energy in China, propose and improve unconventional oil and gas enrichment theory and exploration and development technology suitable for China's geological conditions, and increase research and development of renewable energy development technology.

Keywords: unconventional oil and gas; renewable energy; geological conditions; resource potential; resource-reserve constraint; production forecasting model; theory of unconventional oil and gas enrichment; renewable energy development technology

0 引言

非常规油气资源与可再生能源是当今能源的两大着眼点。非常规油气以其巨大的资源潜力逐渐引起人们的关注。人类很早就开始利用部分可再生能源,可再生能源更是取之不尽、用之不竭。近年来,页岩气、页岩油、致密油等非常规油气勘探开发不断取得突破,理论与技术方法不断进步,地热、风能、太阳能等可再生能源开发技术不断提高^[1-5]。2023年可再生能源发电量在全球发电量中的占比首次超过30%,这是一个重要的里程碑。风能、太阳能、水能和生物质能等可再生能源正在成为电力行业增长最快的领域。

化石能源尤其是煤炭逐步退出全球能源结构,这在2023年召开的第28届联合国气候变化大会上取得共识。过去依赖煤炭、石油、天然气等化石燃料的能源消费结构正在发生变化,清洁能源的快速发展为减缓气候变化提供了可能性。有学者预测,到21世纪50年代煤炭和石油在世界能源消费结构中大幅降低,天然气将先后超越煤炭和石油,非化石能源将超越化石能源^[6-8]。而近期国际局势变化,尤其是中亚、中东等地区冲突不断,不少国际石油公司减缓向非化石能源、“双碳”转换的步伐,对世界能源消费结构也有较大影响。

中国是制造业大国,同时也是能源资源消费大国、进口大国,要发展实体经济,就必须确保能源安全。与欧美等西方国家相比,能源资源类型限制、工业化起步较晚以及目前煤炭为主的能源消费结构使中国实现碳达峰、碳中和目标的承诺将面临更大困难与挑战^[9]。中国能源短板主要集中在油气领域,提出并不断完善适合中国地质条件的非常规油气勘探开发理论与技术方法是有效解决路径。需要不断创新可再生能源开发利用技术与装备,提高可再生能源利用效率与利用量,促进中国能源结构优化和减排目标的实现。

资源量-储量约束下的产量预测模型实现过程:①深入分析非常规油气静态地质要素(源岩、储层、盖层、输导体系等)与动态富集过程、可再生能源属性与可利用特征;②厘定非常规油气资源量与储量及空间分布、可再生能源可开发量与可利量及地理分布;③回溯能源勘探开发历程,确定不同类型非常规油气现今勘探开发阶段、可再生能源现今开发利用阶段;④探讨地质因素、技术方法、资源条件、需求量等对非常规油气与可再生能源产量的影响,总结不同类型能源产量增长规律;⑤在资源量-储量约束下,根据历史产量数据,利用哈伯特模型、高斯模型预测非常规油气与可再生能源产量^[10-11]。

本文在对比分析国内外相关领域文献的基础上,厘定了能源概念与分类、非常规油气地质与开发特征、可再生能源特征。收集并对比分析公开发表的能源产量数据,结合中国能源需求分析,采用资源量-储量约束下的产量预测模型,预测2030年、2060年非常规油气与可再生能源产量,为中国能源发展提供参考。

1 能源分类

能源是自然界中可以为人类提供能量的物质资源,或者是可产生热量、电能、光能和机械能等能量或者可以做功物质的总称。按照蕴藏部位、来源或利用方式的不同,能源具有多种分类方式^[1]。

1.1 来自地球外部与内部的能源

来自地球外部的能源主要指太阳能。人类可以直接利用太阳能辐射产生的热能,更多的是间接利用由太阳能转换而来的能源。风能、水能、生物能和矿物能源等形成的基础就是太阳能。植物通过光合作用把太阳能转变成化学能,并在植物体内贮存下来形成生物质能。地史时期的微生物、动物、植物经过埋藏过程中复杂的物理化学作用,贮存的生物质能就转化为煤炭、石油、天然气等化石能源。水能、风能、海洋能(温差能、波浪能、盐差能)等也是太阳能转换而来。

地球本身蕴藏的能量通常指地球内部的热能与与原子核反应有关的放射性热能,包括原子核能、地热能,还包括地震、火山爆发和温泉等自然呈现出的能量。

地球与太阳、月球等天体间引力作用产生潮汐能。地球是太阳的八大行星之一,月球则是地球的

卫星。太阳和月球对地球产生的引力作用导致地球表面的水体出现规律涨落活动——潮汐。地球表面海潮的落差常达十几米。潮汐蕴藏着极大的机械能,是雄厚的发电原动力。

1.2 一次能源与二次能源

一次能源指没有经过转换、直接来自自然界的天然能源。一次能源又进一步分为可再生能源与不可再生能源。凡是可以不断得到补充或能在较短周期内再产生的能源称为可再生能源。可再生能源在自然界内可以循环再生,不会因长期使用而减少,包括地热能、太阳能、潮汐能、水能、风能、生物质能、海洋能等。不可再生能源的形成需经历亿万年的漫长过程,是短期内难以恢复的能源。不可再生能源包括煤炭、石油、天然气、核能等,其中煤炭、石油和天然气等化石能源是当今人类利用量最大的不可再生能源。

二次能源由一次能源转换而来。由于能源终端(如汽车、电器等)通常无法直接利用一次能源(如煤炭、石油、核能等),因此二次能源就成为联系一次能源和能源终端的纽带。按能源的产生形式,二次能源又可进一步分为由物质运动的同时所产生的能量——过程型能源(如电能)和由储能物质释放的能量——含能体型能源(如氢能、柴油、汽油等)2类。目前,过程型能源和含能体型能源各有自己的应用范围。过程型能源广泛利用于固定的能源终端(如大型电器或家用电器)。由于过程型能源尚不能大量地直接贮存,故机动性强的能源终端(如汽车、轮船、飞机等)运输工具只能使用像柴油、汽油等这一类含能体型能源。随着传统能源的短缺,人们就将目光投向寻求新的含能体能源^[8-9]。

根据上述原则,将能源总结为以下类型(见表1)。

表1 能源分类
Tab.1 The table of energy classification

类型	来自地壳内部的能源	来自地壳外部的能源	地球和其他天体相互作用而产生的能量
一次能源	可再生能源	太阳能、风能、水能、生物质能、海洋能(温差能、波浪能、盐差能)	潮汐能
	不可再生能源	核能 煤炭、常规石油、常规天然气、致密油、致密气、页岩油、页岩气、煤层气、油页岩、油砂、天然气水合物	/
二次能源	过程性能源	电能	
	含能体能源	氢能、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤、激光、沼气	

2 非常规油气发展前景

从能源结构看，石油与天然气在整个人类能源消费中处于举足轻重的地位。非常规油气资源指地质条件、成藏机理及分布规律有别于常规油气资源，现今常规技术无法经济开采，需要水平井、大型水力压裂等特殊开采方法的烃类。非常规油气资源可以分为非常规石油与非常规天然气。非常规石油包括致密油、页岩油、油页岩、油砂等；非常规天然气包括致密气、页岩气、煤层气、天然气水合物等。

2.1 非常规油气特征

非常规油气多数为源储共生，包括源储一体型和源储接触型。源储一体型油气，如烃源岩内泥页岩油气、煤层气，主要分布于盆地中心或斜坡富有机质发育层段；源储接触型油气包括致密砂岩油、致密灰岩油和致密砂岩气，主要分布于与烃源岩直接接触的湖盆中心或斜坡部位的砂岩或碳酸盐岩致密储层

中。非常规油气储层的孔隙度、渗透率低，以纳米、微米孔喉为主，并且微观孔喉结构复杂；没有明确的圈闭界限和盖层，无统一的油气水界面；非浮力成藏，油气运移距离一般较短，只有初次运移或者短距离二次运移；油气藏往往呈现异常高压或异常低压。

非常规油气资源量大，采收率低，干井少，无统一油气水界面，产量有高有低，渗透率大小取决于裂缝发育程度。其储层孔隙度与渗透率低，通常没有自然产能，需要水平井、储层人工改造等技术来达到工业产量。开发方案编制主要基于油气外边界确定和资源预测，以水平井体积压裂与平台式工厂化生产为主，良好生产特征的油气藏中普遍具有甜点，且没有地质风险，但效益有高低^[12-13]。

2.2 非常规油气资源量

中国非常规油气资源丰富，具有多时代、多层系、分布广、潜力大等特点。收集整理公开发表数据，对比分析确定中国非常规油气资源量(见表2)。

表2 中国非常规油气资源、储量和产量^[13-16]
Tab.2 The table of conventional petroleum resources, reserves and production in China^[13-16]

类型	资源量	探明储量	年产量
致密油	地质资源量 $243.04\times10^8\text{t}$ ，技术可采资源量 $18.06\times10^8\text{t}$	地质储量 $15.76\times10^8\text{t}$ ，可采储量 $1.92\times10^8\text{t}$	$450\times10^4\text{t}$
页岩油	地质资源量 $318.99\times10^8\text{t}$ ，技术可采资源量 $22.78\times10^8\text{t}$	地质储量 $15.08\times10^8\text{t}$	$300\times10^4\text{t}$
致密气	地质资源量 $(66\sim70)\times10^{12}\text{m}^3$ ，技术可采资源量 $(20\sim25)\times10^{12}\text{m}^3$	地质储量 $3.3\times10^{12}\text{m}^3$	$336.7\times10^8\text{m}^3$
页岩气	地质资源量 $105.7\times10^{12}\text{m}^3$ ，技术可采资源量 $21.8\times10^{12}\text{m}^3$	剩余可采储量 $5\,605.59\times10^8\text{m}^3$	$250\times10^8\text{m}^3$
煤层气(埋深<2 000 m)	地质资源量 $37\times10^{12}\text{m}^3$ ，技术可采资源量 $11\times10^{12}\text{m}^3$	剩余可采储量 $3\,659.69\times10^8\text{m}^3$	$117.7\times10^8\text{m}^3$

2.3 非常规油气产量预测

自致密气引起人类重视以来，非常规油气勘探开发从无到有，产量逐渐增加，在油气工业中的占比将越来越大。根据2023中国自然资源公报及2023年全国油气储量统计快报数据，全国油气勘查新增探明储量保持高位水平，石油勘查新增探明地质储量连续4年稳定在 $12\times10^8\text{t}$ 以上。截至2022年年底，中国剩余石油技术可采储量 $38.06\times10^8\text{t}$ ^[16]。根据中国石油勘探开发体制特点和布局，自2010年实现石油年产量 $2\times10^8\text{t}$ 目标以来，该年产量已经处于生产高位。目前中国石油年产量一直可以维持 $2\times10^8\text{t}$ ，并预计该产量可以保持20~30年。但是国内石油产量远不足以满足国内石油消费量，75%以上石油消费量依赖进口，并且这将是一个常态化现象。

基于国家能源中长期规划，结合能源需求分析，采用资源量—储量约束下的产量预测模型，综合考虑常规油、致密油和页岩油对未来全国石油产量的贡献，

开展中国非常规油气与可再生能源中长期产量预测^[10-11]。预测显示：2025年中国石油产量将达 $2.01\times10^8\text{t}$ ，其中常规油 $1.92\times10^8\text{t}$ 、致密油 $0.06\times10^8\text{t}$ 、页岩油 $0.03\times10^8\text{t}$ ；2030年中国石油产量将达 $2.03\times10^8\text{t}$ ，其中常规油 $1.91\times10^8\text{t}$ 、致密油 $0.07\times10^8\text{t}$ 、页岩油 $0.05\times10^8\text{t}$ ；2060年中国石油产量将达 $1.8\times10^8\text{t}$ ，其中常规油 $1.35\times10^8\text{t}$ 、致密油 $0.15\times10^8\text{t}$ 、页岩油 $0.3\times10^8\text{t}$ (见图1)。

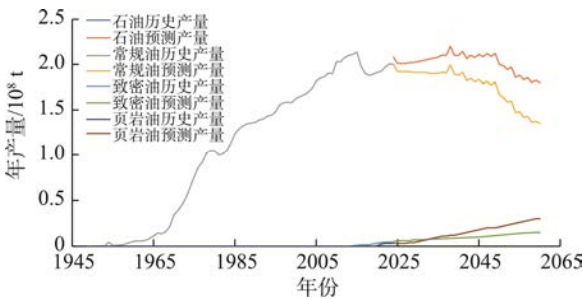


图1 中国石油历史产量和未来产量预测
Fig.1 Oil historical and future production forecast curves in China

2024—2050年,中国石油产量在整个时间段内呈现出波动但总体稳定的趋势,这表明尽管面临着资源开采难度增加、技术挑战以及能源需求变化等多重因素,石油作为传统能源的主体地位仍然稳固。2050年之后,随着常规油气储量逐渐减小与品位降低,常规油产量下降幅度超过致密油和页岩油增长,中国石油产量将缓慢下降。东部常规油资源品位逐渐下降,开采难度加大,随着勘探开发深入和勘探开发技术进步,中西部和海域一些常规油田被发现和探明,可在一定程度弥补老油田产量下降,总体上2040年前将维持在 1.9×10^8 t左右,2040—2050年将维持在 1.6×10^8 t以上,2050—2060年下降幅度将增大。资源量大、探明程度和开发程度低、勘探开发技术快速发展,特别是水平井钻探、多级压裂等技术的应用,使得致密油和页岩油等低渗透、难开采的油气资源得以有效开发。预测显示,致密油和页岩油的产量预测在未来30多年内将持续增长,并有望在未来成为石油产量的重要组成部分。

天然气是替代煤炭发电、实现碳减排的重要资源。随着“碳中和”目标的提出,中国石油公司开始加大对天然气勘探开发的投入。中国天然气年新增探明地质储量连续5年保持在 $12\ 000 \times 10^8$ m³以上。截至2022年年底,中国天然气剩余技术可采储量为 $6.569\ 012 \times 10^{12}$ m³,页岩气剩余技术可采储量 $5\ 605.59 \times 10^8$ m³,煤层气剩余技术可采储量 $3\ 659.69 \times 10^8$ m³^[16]。

预测显示:2025年中国天然气产量将达 $2\ 650 \times 10^8$ m³,其中常规气 $1\ 400 \times 10^8$ m³、致密气 650×10^8 m³、煤层气 200×10^8 m³、页岩气 400×10^8 m³;2030年中国天然气产量将达 $2\ 975 \times 10^8$ m³,其中常规气 $1\ 450 \times 10^8$ m³、致密气 725×10^8 m³、煤层气 300×10^8 m³、页岩气 500×10^8 m³;2060年中国天然气产量将达 $5\ 600 \times 10^8$ m³,其中常规气 $2\ 000 \times 10^8$ m³、致密气 900×10^8 m³、煤层气 $1\ 200 \times 10^8$ m³、页岩气 $1\ 500 \times 10^8$ m³(见图2)。

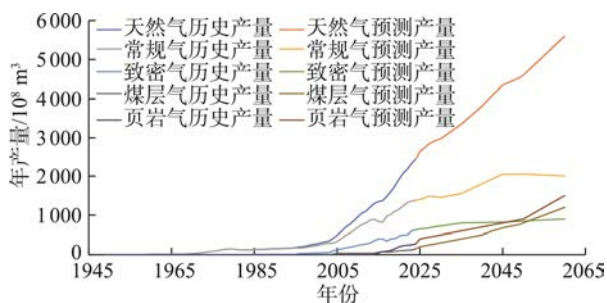


图2 中国天然气历史产量和未来产量预测

Fig.2 Natural gas historical and future production forecast curves in China

随着全球对清洁能源需求的不断增加,天然气作为过渡能源在能源结构中占据重要地位。2024—2060年,中国天然气总产量稳步上升。常规气作为天然气的重要组成部分,2023年常规气产量占全国天然气产量的58.37%。随着中西部、海域及深层天然气资源发现和探明、开发技术进步以及市场需求变化等多重因素影响,2050年之前常规气产量保持增长势头;受大中型气田进入开采中后期、资源品质下降影响,2050年以后常规气产量开始缓慢下降。随着勘探开发技术水平不断提升,致密气勘探程度加大、开发效率加大,产量持续增长。页岩气资源量大、探明程度和开采程度低,深层煤层气勘探开发技术突破,随着国家政策环境日益完善,预计未来30多年内页岩气、煤层气产量将快速上升,2060年页岩气、煤层气产量分别占全国天然气产量的26.79%、21.43%。

3 可再生能源发展前景

3.1 可再生能源特征

可再生能源资源丰富,分布广泛,可就地开发利用,便于建立分布式能源系统,在能源的输送和利用上分片布置,减少长距离输送能源的损失,有效地提高了能源利用的安全性和灵活性,是替代化石能源的首选。

可再生能源清洁无污染,可以循环利用,在使用过程中几乎不会排放破坏生态环境的污染物,并且风力和太阳能光伏不像火力发电需要大量的水,对于干旱地区具有突出优点。

可再生能源开发利用的技术逐渐趋于成熟,作用日益突出,经济可行性不断改善。虽然现阶段可再生能源的经济性还不算高,但随着世界各国政府的大力推广,有些可再生能源已经形成规模效应,成本不断降低,经济性不断提高。如风能、太阳能光伏、太阳能热水器、地热采暖等。

在现代人类生存、生活和科研活动中,电能发挥着不可替代的作用,可再生能源发电成为可再生能源开发利用的主要方式。可再生能源发电种类多样,具有环境友好、可循环利用、分布广泛等优点,同时又具有能量密度低、随机性和间歇性等缺点。因此,可再生能源发电设施往往需要大容量的储能装置或备用电源,初期投资较大^[1]。

中国地域辽阔，地形多变，蕴藏着极其丰富的可再生能源，主要有水能、地热能、海洋能、太阳能、风能和生物质能^[1]。

3.2 资源潜力

中国浅层地热能资源年可开采量折合标准煤 7×10^8 t，水热型地热资源年可开采量折合标准煤 19×10^8 t，干热岩远景资源量折合标准煤 856×10^{12} t。中国目前主要以供暖利用的方式发挥作用，地热发电仅有约16 MW在运行，农业烘干、工业利用、融雪等地热直接利用方式还不多见。截至2021年年底，中国地热直接利用能力折合100.2 GW，年利用量超 82×10^4 TJ；浅层地热供暖（制冷）能力为 8.0×10^8 m²，年利用量超 39×10^4 TJ；水热型地热供暖能力达到 5.3×10^8 m²，占全国城市集中供热比重已升至5%，年利用量超 32×10^4 TJ；仅获评温泉之乡（城、都）的72个地区的温泉年利用能力达6 665 MW，年利用量超 10×10^4 TJ；地热农业方面总利用能力达到1 108 MW，成为地热直接利用的新的增长点^[17]。

中国海洋能能量密度位于世界前列，联合国环境规划署数据显示，中国占全球海洋能源发电储量的近20%。其中，温差能资源可开发量预计超过 13×10^8 kW；潮汐能资源可开发量约为 $2\,200\times10^4$ kW；潮流能和波浪能的可开发资源量分别为 $1\,400\times10^4$ kW

和 $1\,300\times10^4$ kW。截至2022年年底，中国海洋能电站总装机容量超过10 MW，位居世界第4位，近10年新增装机容量占全球的30%^[18]。

中国太阳能资源十分丰富，每年到达地表的太阳辐射能约为 5×10^{16} MJ，相当于 2.4×10^{12} t标准煤，各地太阳辐射总量为3 350~8 440 MJ/m²，中值为5 860 MJ/m²。截至2021年年底，中国太阳能发电累计装机容量达 3.1×10^8 kW。其中，集中式光伏发电 2.0×10^8 kW，分布式光伏发电 1.1×10^8 kW，光热发电 57×10^8 kW。2021年，全国太阳能发电量 $3\,270\times10^8$ kW·h^[19-22]。

中国风能资源丰富，陆地可开发利用风能资源量约 2.5×10^8 kW，加上海上风能资源，共计约 10×10^8 kW，主要集中在东北、西北、华北地区和东部沿海地区。截至2021年年底，全国风电累计装机容量达 3.28×10^8 kW。其中，陆上风电累计装机 3.02×10^8 kW；海上风电累计装机达 $2\,639\times10^4$ kW，跃居世界第1位。2021年，中国风电发电量达 $6\,556\times10^8$ kW·h^[22]。

中国生物质资源主要来自农林业废弃物和粪便，2019年生物质资源量和能源开发利用潜力为30.59 EJ和18.08 EJ^[28]。截至2021年年底，生物质发电累计装机容量达 $3\,798\times10^4$ kW，同比增长28.66%。2021年，生物质发电量达 $1\,637\times10^8$ kW·h（见表3）^[23]。

表3 中国可再生能源可开发资源与利用量
Tab.3 The table of renewable energy recoverable resources and utilization in China

类型	年可开发量	年利用量
地热能	浅层 7×10^8 t标准煤；水热型 19×10^8 t标准煤；干热岩 856×10^{12} t标准煤	地热发电16 MW；地热直接年利用量 82×10^4 TJ
海洋能	13.49×10^8 kW	海洋能电站总装机容量10.3 MW
太阳能	5×10^{16} MJ	$3\,270\times10^8$ kW·h
风能	10×10^8 kW	$6\,556\times10^8$ kW·h
生物质能	18.08 EJ	$1\,637\times10^8$ kW·h

“十三五”时期，中国能源结构持续优化，低碳转型成效显著，非化石能源消费比重达到15.9%，煤炭消费占比下降至56.8%，常规水电、风电、太阳能发电、核电装机容量分别达到 3.4×10^8 、 2.8×10^8 、 2.5×10^8 、 0.5×10^8 kW，非化石能源发电装机容量稳居世界第一。

截至2023年年底，中国风电发电装机容量达 4.4×10^8 kW，光伏发电装机容量达 6×10^8 kW，生物质发电全国并网装机容量达 $4\,414\times10^4$ kW。中国水电、风电、太阳能和生物质能可再生能源装机容量占全

球的比重接近40%，消费比重从2013年的10.2%提高到2023年的17.9%，累计提高了7.7个百分点，这一增长趋势表明了中国在推动能源消费结构优化和绿色低碳发展方面的努力和成效^[24]。

3.3 可再生能源预测

随着中国在可再生能源领域的不断发展，逐渐呈现以下发展趋势：常规水电发展放缓、抽水蓄能电站推进有序，中国风电和光伏发电成本显著降低，生物质发电发展迅速、技术取得新突破^[1-3]。受环保要求以及规模效益需求等方面的影响，未来的可再

生能源根据其发展特性会逐渐向某些特定地区转移,且在开发过程中更注重其利用效率,减少局部地区电力产能过剩,电源与电网发展速度不匹配等问题。其中,风电发展主要分布在海上以及西北、华北、东北地区(以下简称“三北”地区),光电主要分布在青藏高原和“三北”地区;此外,电网的建立和协调将极大缓解部分地区弃风弃光率高的问题^[1]。

预测显示,2024—2060年全国总发电量持续增长,并且随着碳达峰、碳中和战略不断推进,电力生产结构不断变化。水电、化石能源发电、核电等其他能源发电量以较快速率增长,至2040年后发电量保持稳定。风力发电作为可再生能源的重要代表之一,随着风力发电技术的不断进步和成本的持续下降,其发电量未来呈现出显著的增长趋势并且有望得到大幅提升,成为电力生产中的重要支柱。太阳能发电(光伏)同样展现出强劲的增长势头。随着太阳能电池效率的提高和光伏发电成本的进一步降低,太阳能发电将在未来电力生产中占据越来越重要的地位,尤其在阳光充足、土地资源丰富的地区,太阳能发电的潜力巨大。此外,生物质能发电也呈现出一定的增长趋势。生物质能作为一种可再生的能源形式,具有资源丰富、分布广泛、环境影响小等优点。尽管目前生物质能发电量相对较小,但随着技术的进步和政策的支持,其未来发展空间广阔(见图3)。

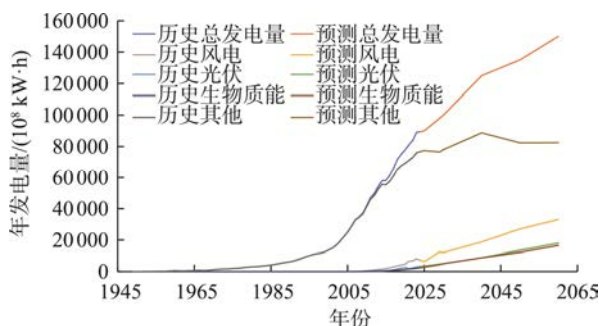


图3 中国可再生能源历史发电量和预测发电量

Fig.3 Renewable energy historical and future power generation forecast curves in China

注:其他指水电、化石能源发电、核电等

掌握能源结构历史演变和发展趋势对理解中国未来能源发展格局具有重要意义,根据能源资源潜力和分布特征、能源结构现状及未来调整,预测中国能源产量将从2023年的 48.3×10^8 t标准煤缓慢增长至2050年的 52×10^8 t标准煤,之后缓慢降低,

2060年为 50×10^8 t标准煤。能源产量结构不断优化,煤炭、石油、天然气、可再生能源(风能+太阳能+生物质能)、其他能源(水能+核能+海洋能+地热等)产量占比从2023年的68.92%、6.15%、5.84%、3.34%、15.75%,2030年的66.00%、5.80%、7.23%、5.41%、15.57%,至2060年的40.00%、5.14%、13.60%、16.59%、24.67%。煤炭作为传统化石能源在历史中占据了显著地位,但是随着国民环保意识提升、清洁能源技术发展以及中国能源转型的推动,其产量在2024年后将持续下降。石油在能源产量结构中稳中有降,天然气、风能+太阳能+生物质能可再生能源快速增长,水能+核能+海洋能+地热等其他能源稳定增长(见图4)。

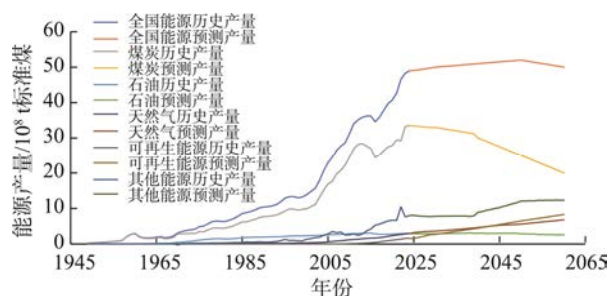


图4 中国能源历史产量及预测产量

Fig.4 Energy historical and future production forecast curves in China

4 中国能源发展中面临的挑战

4.1 能源

中国能源发展面临如下挑战:①中国优质资源如油气的资源量、储量和产量偏低,人均资源量更低,长期需要大量进口,而全球能源资源竞争日趋激烈,博弈日益复杂;②以煤为基础的能源结构使能源资源开发利用给环境保护和恢复带来极大压力;③国内工业、产业结构和发展模式调整亟需更为合理的能源结构;④实现“碳达峰、碳中和”目标需要符合国情的中长期能源发展战略。

4.2 非常规油气

近年来,中国超过70%的石油供应量和超过40%的天然气供应量依靠进口,随着经济持续增长,油气对外依存度还将持续增加,油气保供面临巨大压力。中国油气勘探资源品位逐渐降低,油气开采成本持续增高,环保压力日益凸显。非常规油气规模效益绿色

开发对中国实现稳油增气具有重要意义,亟需对非常规油气高质量发展方向进行思考并做出选择。

与美国及其他国家相比,中国陆相沉积地层发育,特点是平面分布面积较小、纵向厚度较大,岩性、物性及含油气性非均质性较强,致密油气和页岩油气地质要素、成藏机制与分布有自身规律,需要不断研究和完善。尽管扬子地台五峰组—龙马溪组页岩是海相沉积,但随着勘探开发程度不断加大,目前面临复杂构造区、超深层高温高压等地质条件下页岩气甜点预测困难与针对性开发技术缺乏的挑战^[22-26]。中国深层煤层气赋存状态与气液两相流动机理不清、资源潜力不落实、目标评价与优选标准缺乏、深层煤储层改造技术尚未成熟^[27]。

4.3 可再生能源

中国可再生能源的开发利用正处于蓬勃发展的阶段,但是与传统能源以及传统电网相比,在利用技术、运输、基础设施等方面存在较大差距,也是未来必须攻克的难题。可再生能源发展面临以下挑战:

(1) 能源转型基础比较薄弱。现有的技术水平和产业基础相对较差,不仅缺乏系统的可再生能源技术开发体系,基础研究和技术创新能力不强,关键技术和共性技术研究滞后,开发利用的成本仍然较高,而且在人才储备、后备人才、基础从业人员培养等方面都相对薄弱。

(2) 可再生能源的发展对政策存在过度依赖。由于可再生能源开发利用前期的研发投入高、资金投入大,开发周期长等问题,需要依靠国家政策扶持才能保证其可持续、健康的发展。如果没有政策补贴,可再生能源发电高成本问题依然显著,相关企业的上网电价没有价格优势。

(3) 可再生能源没有得到合理利用,弃风弃光率高,亟需解决可再生能源并网受限问题。尽管非化石能源的发电量在逐年增加,但这些清洁能源发电的上网还是存在困难,甚至在部分地区很突出。出于对能源布局结构合理性的考虑,一些弃电较为严重地区的可再生能源发展会受到较大的限制^[28-30]。

5 结论和建议

5.1 结论

(1) 非常规油气属于来自地壳外部的不可再生能源,包括致密油、致密气、页岩油、页岩气、

煤层气、油页岩、油砂、天然气水合物等,可再生能源包括来自地壳内部的地热能,来自地壳外部的太阳能、风能、水能、生物质能、海水温差能、海洋波浪能、海水盐差能等。

(2) 非常规油气多数为源储共生,包括源储一体型和源储接触型,储层的孔隙度、渗透率低,地质资源量与储量大,采收率低。中国致密油技术可采资源量为 18.06×10^8 t,页岩油为 22.78×10^8 t,致密气为 $(20 \sim 25) \times 10^{12}$ m³,页岩气为 21.8×10^{12} m³,埋深小于2 000 m煤层气为 11×10^{12} m³。

(3) 可再生能源资源丰富,分布广泛,清洁干净,可以循环利用,中国浅层、水热型地热能资源年可开采量为 26×10^8 t标准煤、海洋能为 13.49×10^8 kW,太阳能为 5×10^{16} MJ,风能为 10×10^8 kW,生物质能为18.08 EJ。

(4) 中国煤炭产量将持续下降,石油在能源产量结构中稳中有降,天然气、风能、太阳能与生物质能可再生能源快速增长,水能、核能、海洋能、地热等其他能源稳定增长。

5.2 建议

(1) 开展非常规油气成藏机制与分布规律、钻井与压裂技术研究,提出并完善适合中国地质条件的非常规油气富集理论与勘探开发技术,持续加大非常规油气勘探开发,择优部署致密油气、加快发展页岩油气、积极拓展深部煤层气,提升致密油、页岩油产量以减缓石油产量下降速率,提升页岩气、煤层气产量促进天然气产量增长。

(2) 加大研发可再生能源开发技术,积极发展风力发电、加快发展光伏发电,大力发展可再生能源。

(3) 推动油气传统能源与地热能、海洋能、太阳能、风能、生物质能等可再生能源协同发展,实现油气与可再生能源融合互促。

(4) 坚定中国非常规油气与可再生能源发展的信心,基于中国能源资源以煤为主的国情,减少煤炭产量,稳定石油产量,增加天然气产量,非常规油气将在未来较长时间内支撑中国油气可持续发展,大力发展可再生能源,推进中国能源结构平稳转型。

参考文献:

- [1] 刘成林,唐友军,蒋裕强.非常规油气与可再生能源[M].北京:石油工业出版社,2020.

- LIU Chenglin, TANG Youjun, JIANG Yuqiang. Unconventional oil and gas and renewable energy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [2] 刘建国. 可再生能源导论[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- LIU Jianguo. Introduction to renewable energy[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.
- [3] 左然, 施明恒, 王希麟, 等. 可再生能源概论[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- ZUO Ran, SHI Mingheng, WANG Xilin, et al. Introduction to renewable energy[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [4] 刘成林, 刘人和, 门相勇, 等. 非常规油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- LIU Chenglin, LIU Renhe, MENG Xiangyong, et al. Unconventional petroleum resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [5] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [6] 孙龙德, 张鹏程, 江航, 等. 油气安全与能源转型的新趋势[J]. 世界石油工业, 2024, 31(1): 6-15.
- SUN Longde, ZHANG Pengcheng, JIANG Hang, et al. New trends in oil and gas security and energy transition[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 6-15.
- [7] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 1-14.
- JIA Chengzao. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 1-14.
- [8] 马永生, 蔡勋育, 罗大清, 等. “双碳”目标下我国油气产业发展的思考[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3501-3510.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, LUO Daqing, et al. Thoughts on development of China's oil and gas industry under “dual carbon” goals[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3501-3510.
- [9] 樊大磊, 李富兵, 王宗礼, 等. 碳达峰、碳中和目标下中国能源矿产发展现状及前景展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 1-8.
- FAN Dalei, LI Fubing, WANG Zongli, et al. Development status and prospects of China's energy minerals under the target of carbon peak and carbon neutral[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 1-8.
- [10] 王馨佩, 刘成林, 冯德浩, 等. 油气储量增长趋势预测方法综述[J]. 世界石油工业, 2024, 31(6): 55-65.
- WANG Xinpei, LIU Chenglin, FENG Dehao, et al. Review of the reserve-growth trend forecast for oil and gas[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(6): 55-65.
- [11] 刘成林, 张亚雄, 王馨佩, 等. 中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比及启示[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 1-10.
- LIU Chenglin, ZHANG Yaxiong, WANG Xinpei, et al. Comparison and enlightenment of helium geological conditions and resource potential between China and the United States[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 1-10.
- [12] 邹才能, 陶士振, 白斌, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 1-16.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, BAI Bin, et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 1-16.
- [13] 陶士振, 胡素云, 王建, 等. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1222-1239.
- TAO Shizhen, HU Suyun, WANG Jian, et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1222-1239.
- [14] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
- ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340.
- [15] 邹才能, 董大忠, 熊伟, 等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 309-326.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 309-326.
- [16] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告-2023[M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. China mineral resources report-2023[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2023.
- [17] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [18] 麻常雷, 历鑫, 张彩琳. 中国海洋能产业发展分析[J]. 油气与新能源, 2024, 36(1): 16-21.

- MA Changlei, LI Xin, ZHANG Cailin. An examination of the growth of the ocean energy sector in China[J]. *Petroleum and New Energy*, 2024, 36(1): 16-21.
- [19] 李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1049-1054.
- LI Ke, HE Fanneng. Analysis on China's mainland's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1049-1054.
- [20] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- SHEN Yi. The spatial distribution of solar energy and the comprehensive potential evaluation of regional exploitation and utilization in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [21] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 524-535.
- YAO Yubi, ZHENG Shaozhong, YANG Yang, et al. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 524-535.
- [22] 中国传媒研究院. 中国能源大数据报告 (2022)[R/OL]. (2022-07-19) [2025-02-12]. <https://www.jsesa.com.cn/upload/202211/01/202211011449233198.pdf>.
- China Media Research Institute. China energy big data report (2022)[R/OL]. (2022-07-19) [2025-02-12]. <https://www.jsesa.com.cn/upload/202211/01/202211011449233198.pdf>.
- [23] 周彦名, 王娇月, 王诗云, 等. 我国生物质资源能源开发利用潜力评估[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(9): 2702-2713.
- ZHOU Yanming, WANG Jiaoyue, WANG Shiyun, et al. Assessment of biomass resources for energy use potential in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(9): 2702-2713.
- [24] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 《中国的能源转型》白皮书(全文)[R/OL]. (2024-08-29) [2025-02-12]. https://www.nea.gov.cn/2024-08/29/c_1310785406.htm.
- The State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper on China's Energy Transition (full text)[R/OL]. (2024-08-29) [2025-02-12]. https://www.nea.gov.cn/2024-08/29/c_1310785406.htm.
- [25] 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 1-11.
- LI Guoxin, LEI Zhengdong, DONG Weihong, et al. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 1-11.
- [26] 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 中国油气勘探开发成就与未来潜力: 深层、深水与非常规油气: 专访中国科学院院士、石油地质与构造地质学家贾承造[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(3): 1-8.
- JIA Chengzao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Achievements and future potential for oil & gas exploration and development in China: Deep-formation, deep-water and unconventional reservoirs: Interview with JIA Chengzao, Academician of the CAS, geologist in petroleum geology and structure[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(3): 1-8.
- [27] 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 43-51.
- ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 43-51.
- [28] 张所续, 马伯永. 世界能源发展趋势与中国能源未来发展方向[J]. *中国国土资源经济*, 2019, 32(10): 20-27, 33.
- ZHANG Suoxu, MA Boyong. Development trend of world energy and future development directions of China's energy[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2019, 32(10): 20-27, 33.
- [29] 中国循环经济协会可再生能源专业委员会. REN21《全球可再生能源现状报告2018》[J]. *能源*, 2018(7): 91.
- Renewable Energy Professional Committee of China Circular Economy Association. REN21 "Global Renewable Energy Status Report 2018"[J]. *Energy*, 2018(7): 91.
- [30] 水利水电规划设计总院. 中国可再生能源发展报告2018[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2018.
- Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute. China renewable energy development report 2018[M]. Beijing: China Hydropower Press, 2018.

(编辑: 曹梦迪 编审: 王祖纲)