

我国能源绿色开发利用路径研究

李全生^{1,2}, 张凯^{1,2}

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102209)

摘要: 能源绿色开发利用是贯彻落实能源安全新战略和加快新时代生态文明建设的重要任务。为推进能源生产和消费革命, 本文从我国能源发展现状与存在的问题出发, 在阐述能源绿色开发利用的内涵和发展原则的基础上, 构建了能源绿色开发评价模型和能源利用系统评价指标模型, 对能源绿色开发利用的经济效益和环境效益进行评价, 预测了我国面向 2030 年、2050 年的能源绿色开发利用发展目标。研究指出, 我国能源绿色开发利用的实施路径可着重从两方面展开: 在能源布局方面, 开展化石能源的清洁高效开发利用, 清洁能源的规模化开发利用和能源系统的智能化, 重点实施绿色煤炭工程、稳油增气工程和加强能源集约化、节约化利用; 在科技创新方面, 从加强对煤炭安全高效、清洁低碳利用的科技攻关, 加快攻克深层深水和非常规油气勘探开发关键技术, 推进清洁能源规模化开发利用的科技创新等 5 方面推进。为构建清洁低碳、安全高效的能源体系, 本文从能源管理体制创新、能源价格市场化机制形成、能源绿色开发利用考核、能源绿色开发利用科技创新体系等方面提出了对策建议。

关键词: 能源; 绿色开发利用; 能源绿色开发评价模型; 绿色煤炭工程; 能源智能化

中图分类号: F59 **文献标识码:** A

The Path for Green Development and Utilization of Energy in China

Li Quansheng^{1,2}, Zhang Kai^{1,2}

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China)

Abstract: The green development and utilization of energy is an important component for the new energy security strategy and the ecological civilization in China. To promote energy production and consumption revolution, this study first summarizes the development status and challenges of China's energy sector, and elaborates the concept and principles of energy green development and utilization. Subsequently, an energy green development evaluation model and an energy utilization system evaluation index model are established to evaluate the economic and environmental benefits of the energy green development and utilization approach; development goals are then predicted for 2030 and 2050 using these two models. The energy green development and utilization can be implemented from two aspects. In terms of energy distribution, China should focus on the clean and efficient development and utilization of fossil energy, the large-scale development and utilization of clean energy, and the intelligentization of energy systems, particularly emphasizing green coal engineering, oil stabilization and gas enhancement, and energy intensification and conservation.

收稿日期: 2020-12-26; **修回日期:** 2021-01-05

通讯作者: 李全生, 国家能源投资集团有限责任公司教授级高级工程师, 研究方向为煤炭开采与矿区生态修复;

E-mail: quansheng.li@chnenergy.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“推进能源生产和消费革命(2035)——能源革命推动经济社会发展和生态环境保护战略研究”(2018-ZD-11)

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

In terms of scientific and technological innovation, China should promote breakthroughs for the safe, efficient, and clean utilization of coal; develop key technologies for deep-seated and unconventional oil and gas exploration and development; and advance scientific and technological innovation for large-scale development and utilization of clean energy. To build a clean, low-carbon, safe, and efficient energy system, suggestions are proposed in terms of energy management system innovation, energy price marketization, performance evaluation, and technology innovation system.

Keywords: energy; green development and utilization; energy green development evaluation model; green coal engineering; energy intelligence

一、前言

“四个革命、一个合作”的能源安全新战略，深刻揭示了世界能源发展的大趋势，揭示了新时代我国能源发展的特点规律和方向趋势，从全局和战略的高度指明了保障我国能源安全、推动我国能源事业高质量发展的方向和路径。能源绿色开发利用是贯彻落实能源安全新战略的重要任务。

能源绿色开发利用就是以能源安全新战略为指导，坚持能源安全高效开发利用与生态环境保护相协调的原则，通过科技创新和体制机制创新，实现能源开发的安全化、环境友好化、高效化（效率、资源回收率和经济效益），能源利用的清洁化、低碳化、集约化和节约化，推动能源开发利用全过程的清洁低碳、安全高效，支撑经济社会的可持续发展。目前国内外学者对能源绿色开发利用现状和模式进行了大量研究，郭朝先等 [1] 阐述了国际绿色能源开发利用发展态势，并提出了我国能源开发利用存在的问题；赵素丽 [2] 分析了我国能源利用形式，给出了绿色能源合理开发利用的方向；也有学者对地热能、水电、生物能等绿色能源的开发利用进行了深入研究 [3~5]。本文分析了我国能源发展现状及存在的问题，提出了能源绿色开发利用的内涵和原则，利用能源绿色开发利用评价模型给出了面向 2030 年、2050 年的能源绿色开发利用发展目标，从能源布局和科技创新两方面给出了绿色开发利用实施路径，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供借鉴。

二、我国能源发展现状及存在的问题

（一）我国能源发展现状

目前，通过不断的新旧能源改革发展，我国逐步形成了全球最大的能源供应体系，建成了以煤炭

为主体，以电力为中心，以石油、天然气和可再生能源全面发展的能源供应格局，促进了国民经济和社会的快速发展 [6]。

1. 化石能源成为我国能源供应的主体

从 2019 年我国能源消费结构来看（见图 1），以煤炭、石油和天然气为主的化石能源占比达 84.7%，化石能源在我国能源供应中占主体地位。我国煤炭在一次能源生产和消费结构中的占比长期超过 60%，是国家能源供应的安全保障，起到了能源供应“压舱石和稳定器”的重要作用。70 多年来，全国累计生产煤炭约为 8.47×10^{10} t，其中改革开放以来累计生产煤炭约 7.74×10^{10} t，约占全国一次能源生产总量的 75%。我国的煤炭安全高效开采技术、燃煤发电大容量、高参数机组、大气污染物超低排放技术都已达到世界领先水平，百万吨级煤直接液化、60 万吨级煤制烯烃等新型煤炭转化技术世界首创。随着油气资源的大规模勘探和开发，我国油气产量逐年提高，油气储备制度不断健全，油气进口压力减缓，为国家能源安全供应提供了重要支撑 [7,8]。

2. 新能源和可再生能源快速发展

新能源和可再生能源在我国能源消费结构中的占比情况如图 1 所示。目前，核电领域已开发出具有自主知识产权的先进压水堆核电技术，第三代核电技术和装备实现了“走出去”；风能、光伏、太阳能等非水可再生能源装备产品和技术在全球也处于先进水平。

3. 能源消费结构显著优化

自能源安全新战略提出以来，我国可再生能源和清洁能源消费在总能源消费中的占比逐年提高，能源消费总量年均增长约为 2.2%，单位国内生产总值（GDP）能源消费量下降约为 20.3%，如图 2 所示。天然气消费量在能源消费总量中的占比为 8.2%，非化石能源消费量的占比为 15.2%，而电力

占终端能源消费的比重提高到 25.5% [9]。

4. 能源科技创新成果显著

我国作为世界第一能源生产大国和世界第一能源消费大国,近年来能源技术创新能力大幅提升,装备国产化和成果产业化水平不断提升,能源技术创新发展取得瞩目成就。具体来看,百万千瓦级煤发电机组数量、装机容量居世界首位,年产百万吨级煤炭直接液化技术全球领先,光伏发电装机规模连续位居世界首位,海底可燃冰试采技术全球领先。自主研发建设的世界首个多端柔性直流输电工程在广东南澳示范成功,白鹤滩水电站百万千瓦水轮机模型再次打破世界水电装备制造新纪录,先进晶体硅电池多次打破世界纪录,自主研发的百万千瓦级三代核电“华龙一号”和 CAP1400 的主要技术和安全性能指标均达世界领先水平。总之,我国能源技术创新不断实现新的突破,相关关键技术的突破引领我国能源行业不断发展 [9]。

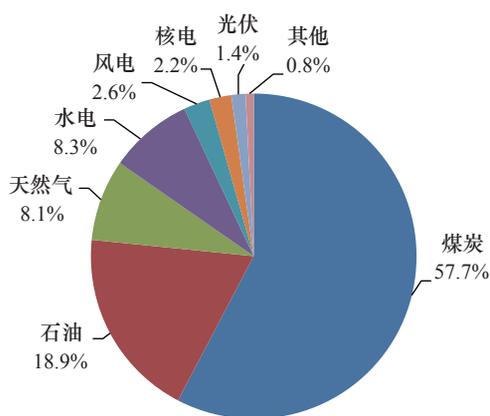


图 1 2019 年我国的能源消费结构

(二) 我国能源发展面临的问题

1. 化石能源开发引起生态环境破坏

传统的能源粗放式发展和非清洁利用导致生态环境破坏问题,主要表现在水资源污染、大气污染、水土流失、有害气体排放及温室气体排放等方面。具体来看,煤炭开采会造成地表沉陷、含水层破坏、植被退化等问题,每年因煤炭开采造成的土地损伤面积约为 $7.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,地表生态修复率不足 30%;每年破坏的地下水资源约为 $7.0 \times 10^9 \text{ t}$;石油开采导致的地下水位下降,对周围水质产生了一定程度的影响。化石能源的非清洁利用造成了大气环境的严重污染,目前我国通过燃煤发电产生的污染物大幅下降,污染物排放量已降至燃气排放限值内;但用于发电的煤炭消耗量仅占煤炭消费总量的 53%,远低于美国、英国等发达国家,不及世界平均水平的 65%。民用烧煤污染物排放量大、集中处理难,我国每年民用煤炭量约为 $2.0 \times 10^8 \text{ t}$,吨煤污染物达到电厂的 10 倍以上。另外,终端用能的电能仍需持续推进 [10]。

2. 温室气体减排面临挑战

目前,我国在碳达峰和碳中和方面存在较大压力。2019 年,全球能源相关的碳排放量约为 $3.33 \times 10^{10} \text{ t}$,其中来自中国、美国、欧盟的碳排放量合计占全球的 50% 以上。其中,中国为 $9.74 \times 10^9 \text{ t}$,美国为 $4.77 \times 10^9 \text{ t}$,欧盟为 $3.98 \times 10^9 \text{ t}$ 。我国的碳排放量约占全球的 29.2%,是全球最大的碳排放国。2019 年,中国的碳排放强度为 8.4 t/美元,分别是法国、英国、日本、美国的 8.3 倍、7.4 倍、5.1 倍、3.2 倍 [11]。对应碳中和目标,也就是单位



图 2 2014—2019 年我国的能源消费结构

供电碳排放必须从 600 g/kW·h 下降到 100 g/kW·h, 甚至是 50 g/kW·h。因此, 我国要实现 2030 年碳排放达峰、2060 年碳中和目标, 需要煤电装机必须在“十四五”达峰, 并在 2030 年后快速下降。为此, 我国不仅需要提高整体产业的减碳水平, 还需进行产业结构调整, 在高耗能产业中做好减排和提高能效工作。

3. 能源利用效率总体偏低

能源的利用效率可以通过单位 GDP 能耗及相关系数来体现。多年来, 我国的 GDP 增长多是依靠投资和出口拉动, 高能耗产业发展过快, 使我国单位 GDP 能耗是世界平均能耗的 1.4 倍。2019 年, 我国每万元 GDP 消费 0.49 tce, 较 2018 年下降 4.84%。我国能源利用效率仅为 33%, 比发达国家低约 10% [12]。可见我国能源的利用水平远低于国际先进水平, 节能降耗的空间和潜力大。2019 年, 我国能源消费弹性系数为 0.77, 较 2018 年有较大增长, 但低于 1.0 [12], 说明我国能源消费的增速低于我国国民经济的增幅。目前, 我国仍处于工业化、城镇化、现代化发展进程中, 能源消费总量还将继续增加, 进一步提升能源利用效率极为迫切。

4. 能源安全形势依然严峻

据中国工程院项目研究测算, 我国预测煤炭资源量约为 5.97×10^{12} t, 探明煤炭储量为 1.3×10^{12} t。而我国绿色煤炭资源量仅有 5.05×10^{11} t, 约占全国煤炭资源量的 10%; 煤炭资源回收率平均仅为 50% 左右, 按照国家能源战略需求, 绿色煤炭资源量可开采年限仅为 40~50 年 [13]。自 1993 年我国成为石油净进口国以来, 石油对外依存度已从 21 世纪初的 32% 升至 2019 年的 70.8%; 2019 年, 我国天然气对外依存度超过日本, 达到了 43%, 成为世界最大的天然气进口国 [13]。随着全球地缘政治局势变化、国际能源需求增加、资源市场争夺加剧, 我国能源安全形势依然严峻。

三、能源绿色开发利用战略的内涵和目标

(一) 能源绿色开发利用的内涵与发展原则

1. 能源绿色开发利用的内涵

能源绿色开发利用, 要坚持“生态至上, 效益

优先, 科学规划, 创新驱动”的原则, 通过科技创新和体制机制创新, 推动能源开发的安全化、环境友好化、高效化, 实现能源利用的清洁化、低碳化、集约化和节约化, 即化石能源的清洁化、低碳化, 清洁能源的规模化、经济化; 推动能源开发利用全过程的清洁低碳、安全高效, 为推进我国构建生态文明社会、实现中华民族两个百年目标提供能源保障 [10]。

2. 能源绿色开发利用的发展原则

①推进环境友好型能源供给结构优化。大幅提高新能源和可再生能源比重, 逐步降低化石能源比重, 加快建成绿色低碳与安全高效的现代能源供应体系。②推动能源开发的安全高效和生态环境友好。提升能源开发过程中的安全保障和职业健康水平, 不断降低能源开采成本, 最大限度减少能源开发对地表、地层结构、地下水系等的扰动和生态影响, 构建具有竞争力的能源产业体系。③推进能源开发利用全过程的节能减排和全物质循环利用。重点是提高能源资源的采收率、处理好能源共伴生资源的协调开发利用, 降低开发能源消耗, 提高能源利用率, 减少污染物产生和温室气体排放, 加强废弃物的综合循环利用。④推进能源利用的清洁化、低碳化、集约化、节约化。最大限度减少能源利用过程中的污染物排放和碳排放, 提高以超低排放煤电为主要方式的煤炭集约化利用水平, 提高终端电气化水平, 推动能源绿色消费方式转变。⑤依托先进智能手段推进能源转型。重点是推进能源技术和信息技术全面融合, 加快化石能源与新能源、可再生能源的优势互补和科学发展, 提升能源资源配置率, 建成智能能源系统。

(二) 能源绿色开发利用的必要性和紧迫性

1. 能源绿色开发利用是贯彻落实能源安全新战略的重要举措

党的“十九大”报告强调, 要积极推进能源生产和消费革命, 加快清洁低碳、安全高效的能源体系构建。生态文明思想阐述了新时代生态文明建设必须坚持人与自然和谐共处, 坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针, 秉承“绿水青山就是金山银山”的发展理念, 加大制度创新等。这一战略思想对新时代实现生态文明、美

丽中国建设和能源行业科学发展具有重要指导意义, 贯彻落实这一思想的核心要义就在于能源的绿色开发利用 [14]。

2. 能源绿色开发利用是贯彻落实能源安全新战略的重要任务

贯彻落实能源安全新战略, 要求坚持绿色发展理念, 坚持节约资源和保护环境的基本国策, 在实现生态环境保护的前提下, 科学开发利用能源, 实现能源开发利用与生态环境保护相协调, 为经济社会发展和人民幸福生活提供清洁的能源。

3. 能源绿色开发利用是系统解决我国能源领域面临问题的重要途径

我国能源领域的特征为“贫油、少气、相对富煤”, 面临人均资源相对不足、能源开发利用带来的生态环境破坏严重等问题, 亟需通过能源的绿色开发和利用, 系统解决我国面临的资源、环境与生态等问题, 有效促进能源生产和消费革命、推动生态文明建设和经济社会可持续发展 [15]。

(三) 能源绿色开发评价模型

1. 能源绿色开发评价指标体系框架

在建立能源绿色开发评价指标与模型时, 需体现绿色开发的综合效益, 从资源、环境、经济效益等方面开展全方位评价。能源绿色开发的评价思路、指标体系框架, 如图 3、表 1 所示。

(1) 战略地位主要指某种能源在我国能源矿产序列中的重要程度。该指标的取值主要通过 3 个因素来综合确定: 某种能源在国防安全中的地位; 资

源稀缺程度, 通过对外依存度体现; 该类能源占全国能源消费总量的比例, 反映该类能源在我国能源消费结构中的重要程度。

(2) 资源采出效益可通过资源回收率和开采效率指标体现。

(3) 环境保护: 各类能源矿产在开发过程中对环境影响较大的是地下水和污染物排放。其中, 对地下水的影响包括对地下水量和地下水质的影响两方面, 该指标为负向指标。

(4) 经济价值主要体现项目的经济性, 由产值和利润两个指标反映。

(5) 社会效益通过税收和科技贡献体现 [16], 税收主要指能源矿产开发过程中向国家和地方所缴纳的税费; 科技贡献主要反映能源矿产开采方案对科技的推动作用。

2. 指标权重

指标权重指某一指标在整体评价中的相对重要程度, 指标体系权重的科学确定直接影响到评价结果的准确性。指标权重确定的方法有专家评分法、层次分析法、熵权法、主成分分析法、综合赋权法等。结合能源开发的具体情况, 本文采用层次分析法对能源绿色开发评价指标进行权重赋值。具体来说, 利用层次分析法, 建立两两比较判断矩阵, 求解一级指标和二级指标的判断矩阵, 对评价指标体系中各项指标进行了权重分析, 如表 2 所示。

3. 单项指标评价指数计算

指标取值通过计算二级指标的单项评价指数, 根据单项评价指数计算结果赋以相应的得分。指标

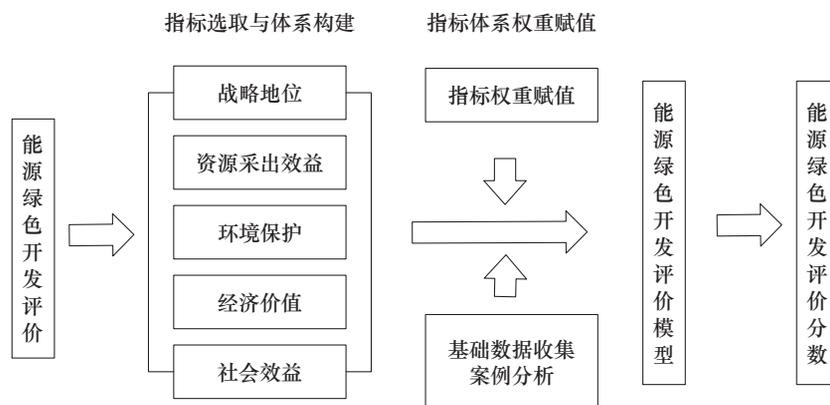


图 3 能源绿色开发评价思路

体系中单项评价指标包括正向指标和逆向指标，正向指标对综合评价指数有促进作用，如战略地位、资源采出效率、经济价值、社会效益；逆向指标能降低综合评价指数，如环境保护。

对于正向指标，其单项评价指数计算如公式(1)所示；对于逆向指标，其单项评价指数计算如公式(2)所示。

$$S_i = \frac{S_{xi}}{S_{oi}} \times 100 \quad (1)$$

$$S_i = \frac{S_{oi}}{S_{xi}} \times 100 \quad (2)$$

式(1)中， S_i 为第*i*项评价指标的单项评价指数； S_{xi} 为第*i*项评价指标的实际值。式(2)中， S_{oi} 为

表1 能源绿色开发评价的指标体系框架

一级指标	二级指标
战略地位	国防与能源安全 对外依存度 该类能源占全国能源消费总量的比例
资源采出效益	资源回收率 开采效率
环境保护	对地下水量的影响 对地下水质的影响 主要污染物排放
经济价值	产值 利润
社会效益	税收 科技贡献

表2 能源绿色开发评价指标权重计算结果

一级指标	权重 / %	二级指标	权重 / %
战略地位 (a1)	38.35	国防与能源安全 (a11)	19.58
		对外依存度 (a12)	8.51
		该类能源占全国能源消费总量的比例 (a13)	10.26
资源采出效益 (a2)	13.63	资源回收率 (a21)	7.12
		开采效率 (a22)	6.51
		对地下水量的影响 (a31)	6.99
环境保护 (a3)	21.70	对地下水质的影响 (a32)	8.62
		主要污染物排放 (a33)	6.09
		产值 (a41)	5.87
经济价值 (a4)	17.43	利润 (a42)	11.56
		税收 (a51)	3.30
社会效益 (a5)	8.89	科技贡献 (a52)	5.59

第*i*项评价指标的基准值（序列的最大值）。

4. 综合评价得分计算

能源绿色开发评价分数是基于评价指标体系，计算综合评价得分得出的，综合评价分数*P*的计算公式为：

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m S_{ik} \times Q_{ki} \quad (3)$$

式(3)中，*P*为综合评价分数，*S*为单项指标得分，*Q*为指标权重，*n*为一级指标个数，*m*为二级指标个数。

(四) 能源利用系统评价指标模型

能源利用系统主要分为能源作为原料的转化过程和作为燃料的利用过程两个方面。在能源利用模型的构建中，多采用机理分析和统计回归分析相结合的方法，即以半经验模型为主。

1. 原料转化指标体系构建

原料转化指标体系包括产品规模、技术、环境、宏观经济、企业财务五类，指标体系构成如图4所示。

2. 燃料利用指标体系构建

燃料利用指标体系包括产品规模、技术、环境宏观经济和企业财务等五类指标，指标体系构成如图5所示。

3. 原料转化系统的模型构建方法

运用能效、环境和经济相结合的方法，通过对

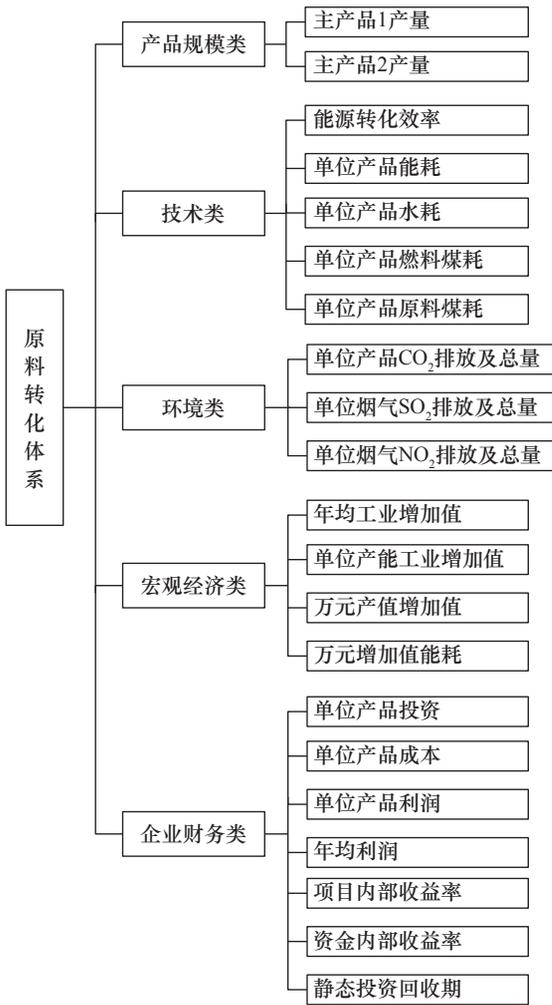


图4 原料转化指标体系构成图

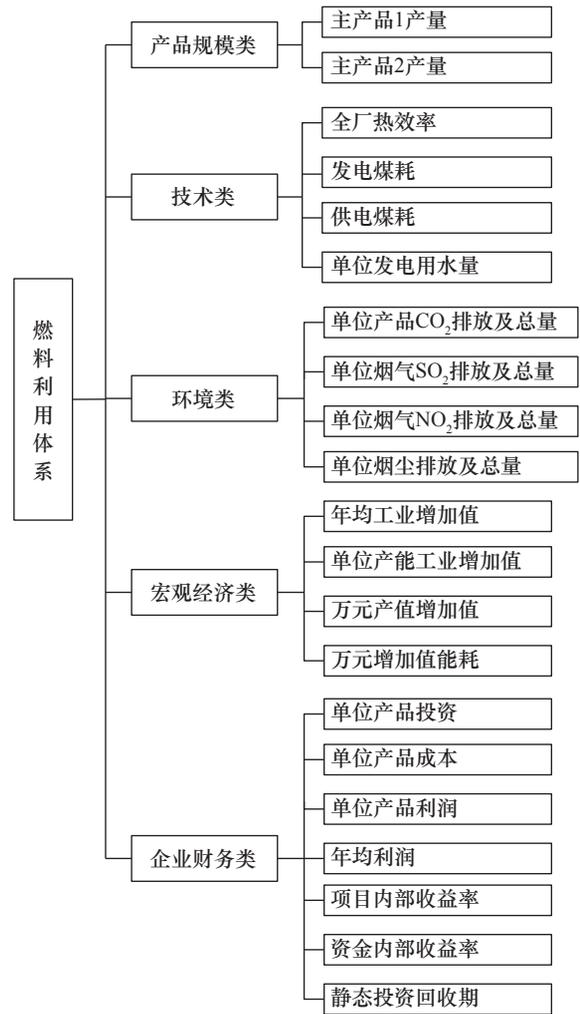


图5 燃料利用指标体系构成图

大量的工程设计和实际运行数据进行加工整理，依据质量和能量守恒定律、单元过程的基本物理特征（如规模）等，可以建立包括技术特征、排放水平、经济投入等多因素的各单元技术评价经验数据数学模型。按照系统物流图和能流图，建立能源利用系统基于热力学第一定律的能量效率评价指标；建立基于系统物料平衡的主要污染物排放指标；建立基于单元过程和系统的规模、特性下的经济指标。

4. 燃料利用系统的模型构建方法

构建燃料利用系统模型，使用的是热力学第一定律分析方法（定量计算），从能量转换的数量来评价热功转换的效果，主要有“输入-输出”热量法（正平衡法）、热损失法（反平衡法）；以

生产运行数据的统计回归模型为主，数学模型为辅。对主要气态污染物排放量主要采用理论计算方法。

5. 能源利用系统评价指标模型

(1) 能效评价指标模型

$$\text{能源转化效率}(\%) = \frac{\text{能源产出总量}(\text{主产品} + \text{副产品} + \text{电})}{\text{能源投入总量}(\text{原料煤} + \text{燃料煤} + \text{外购电} + \dots)} \quad (4)$$

(2) 单位产品能耗评价指标模型

$$\text{单位产品能耗} = \frac{\text{能源投入总量} - \text{副产能源总量}}{\text{主产品产量}} \quad (5)$$

(3) 煤耗评价指标模型

$$\text{单位产品煤耗} = \frac{\text{煤炭总量}(\text{原料煤} + \text{燃料煤})}{\text{主产品产量}} \quad (6)$$

(4) 万元增加值能耗评价指标模型

万元增加值能耗 = 单位产品能耗 / 单位产品增加值 (7)

(5) 全厂热效率评价指标模型

$$\eta_{cp} = \frac{\text{计算期内发电量} \times 3600}{\text{计算期内发电用标煤量} \times 29271} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中, η_{cp} 为全厂热效率, 单位为%; 29271 为标煤低位发热量, 单位为 kJ/kg; 3600 为小时、秒的时间换算。

(6) 发电煤耗与供电煤耗评价指标模型

$$\begin{aligned} \text{发电设计标准煤耗} &= \\ &= \frac{\text{汽轮机保证热耗}}{\text{锅炉保证效率} \times \text{管道效率} \times 29.271} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\text{供电设计标准煤耗} = \frac{\text{发电标准煤耗}}{1 - \text{厂用电率}} \quad (10)$$

(7) 电力系统大气污染物排放评价指标模型

① SO₂ 排放浓度

$$\begin{aligned} C_{SO_2} &= \\ &= \frac{\sum \left[2B_g \times \left(1 - \frac{\eta_{S1}}{100} \right) \left(1 - \frac{\eta_{S2}}{100} \right) \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \times \frac{S_{t,r}}{100} \times K \right] \times 10^9}{\sum V_g \times 3600} \quad (11) \end{aligned}$$

式(11)中, C_{SO_2} 为 SO₂ 排放浓度, 单位为 mg/m³; B_g 为锅炉实际耗煤量, 单位为 t/h; η_s 为脱硫效率; V_g 为实际干烟气量, 单位为 m³/kg; q_4 为固体未完全燃烧损失, 单位为 kg; $S_{t,r}$ 为煤中全硫含量, 单位为%; K 为煤中硫转化为 SO₂ 的转化率。

② NO_x 排放浓度

$$c_1 = \frac{10^6 G}{B_g V_g} = \frac{10^6 \times 1.63B(\beta x_4 + cV_g 10^{-6})}{B_g V_g} \quad (12)$$

式(12)中, c_1 为 NO_x 排放浓度, 单位为 mg/Nm³。

③ CO₂ 排放量计算模型

$$W_{gr} = W_{coal} \times C_{ar} (1 - q_4) \times \frac{44}{12} \quad (13)$$

式(13)中, W_{gr} 为 CO₂ 排放量, W_{coal} 为实际耗煤量,

C_{ar} 为收到基碳含量。

6. 能源绿色开发利用的发展目标

根据上述能源绿色开发利用内涵和发展原则, 以能源结构优化为目标函数, 以技术进步、资金投入、经济贡献为变量, 结合不同时期和情景, 以资源储量、生态环境、碳排放等为约束动态变量, 通过优化计算, 综合国内外相关研究成果, 预测我国 2030 年和 2050 年能源绿色开发利用的目标 [17]。

2021—2030 年, 进入能源绿色开发利用加强期。实现能源消费结构显著优化和能源绿色低碳发展, 实现能源供应绿色转型; 力争到 2030 年, 实现煤炭、油气、非化石能源消费比例达到 5 : 3 : 2。

2031—2050 年, 进入能源绿色开发利用定型期。全面完成传统能源和新型能源体系构建, 实现能源的安全化、绿色化和智能化开发利用, 形成煤炭、石油、天然气、非化石能源的多元化能源供应结构; 力争到 2050 年, 实现煤炭、油气、非化石能源消费比例达到 4 : 3 : 3。

四、能源绿色开发利用的实施路径

(一) 能源绿色开发利用的布局

坚持绿色发展理念, 立足国情, 稳妥协同推进化石能源的清洁高效开发利用和非化石能源的规模化发展, 加强推进碳捕集封存与利用技术朝规模化、一体化示范、产业化应用发展, 运用绿色低碳发展理念, 加强与“一带一路”沿线国家的能源合作。

1. 化石能源的清洁高效开发利用

以能源绿色开发利用评价模型为指导, 坚持“安全、生态、技术、经济”四原则, 做好能源开发利用布局, 划分出优先开发区、限制开发区、严禁开发区。

(1) 实施绿色煤炭工程。贯彻执行煤炭绿色安全开发战略、清洁低碳利用战略、多元协同发展战略、“一带一路”发展倡议和新型人才战略, 经过 30 余年的努力, 建成煤基多元协同的智慧能源系统 [18]。重构煤炭开发新布局, 将山西、陕西、内蒙古、宁夏、甘肃(晋陕蒙宁甘)这一区域划分为重点开发区, 华东和华南区划分为限制开采区, 新疆、青海(新青)这一区域划分为资源储

备区、东北区划分为收缩退出区。2025 年，重点开发晋陕蒙宁甘区绿色煤炭资源，限制其他区域煤炭资源开发，全国煤炭产能为 4.4×10^9 t，绿色煤炭资源开发占比达到 70%。2035 年，在重点开发晋陕蒙宁甘区绿色煤炭资源的同时，加大新青区煤炭资源储备区的绿色开发，全国煤炭产能降至 4.0×10^9 t，煤炭资源绿色开发占比达到 80%。2050 年，形成晋陕蒙宁甘—新青煤炭资源绿色开发区，全国煤炭产能稳定在 $2.5 \sim 3.0 \times 10^9$ t，基本实现煤炭资源绿色开发。

(2) 实施稳油增气工程。坚持“陆海并重、浅深并重、常规与非常规并重”的发展思路，发挥国际国内两种资源、两个市场的作用，实现石油稳产，发展天然气产量倍增工程。加大国家石油战略储备，鼓励民间资本参与储备建设，推动商业储备发展，健全能源储备法律法规和相关制度，构建并完善能源应急保障体系，大幅提升石油储备能力和扩大石油储备规模，提高对石油的预测、预警、风险应对水平，提高我国能源安全保障能力。

(3) 加强能源的集约化、节约化利用。加强能源共伴生资源的协同开发利用，加强煤炭、石油、气（如天然气、煤层气）、铀、水、伴生铝镓等资源的一体化布局和集约化开发利用；推进能源终端消费的电气化，大幅提高电力在终端用能中的比重；加快推进热电联供，城乡居民家用供暖、热水和炊事电气化，提高家庭电气化水平，倡导家庭生活零排放；积极推动电动汽车和轨道交通发展，加快供电电源和供电服务设施建设，推动交通领域电气化；加强能源资源循环利用，推进工业企业余热、余压利用，加强废弃物的资源化利用，提高废水循环利用率；提高工业能效标准，实施电机、内燃机、锅炉等重点用能设备的能效提升计划，提升终端用能产品能效和重点用能行业能效水平。

2. 促进清洁能源的规模化开发利用

坚持安全为要，加快完成 CAP1000、CAP1400 和高温气冷堆机组的示范与运营，加快推进符合国家核安全标准、具有自主知识产权的机组建设，积极探索核能多元化利用技术；积极发展规模化、低成本的海上风电和光伏发电；积极发展分布式电源和分布式能源，采取“自发自用、余量上网、电网调节”的电力微网运营模式，全面提升能源

利用效率。

3. 发展能源系统的智能化技术

发展能源开发、输送、分配、利用一体化的智能技术，为能源系统尤其是电力的灵活、互补、安全、高效生产和消费提供技术保障。在能源生产方面，重点是研发智能化发电设备，促进电力生产和并网运行的智能化发展；在能源输送、分配和应用领域，重点开发智能电网和科学用能，为电力调度、输电、电网和用电安全运行提供保障 [19]。全面实现能源的安全化、绿色化、智能化，建成煤炭、石油、天然气、核电与可再生资源四足鼎立的多元化能源供应体系。

(二) 能源绿色开发利用的科技创新

1. 加强对煤炭安全高效和清洁低碳利用的科技攻关

通过快速开展煤炭清洁高效利用重大科技项目，攻克煤炭安全、绿色、高效、智能开发、清洁低碳转化利用等关键核心技术，推广应用先进适用的科技成果，提高煤炭清洁高效利用水平，有效发挥煤炭在国家能源安全保障中的基础作用。

2. 加快攻克深层深水和非常规油气勘探开发关键技术

重点推进提高采收率技术、深水开采技术、不同类型非常规油气勘探开发技术、常规与非常规油气协调开采技术及其示范工程，加强储运设施建设和技术攻关，促进油气产业健康发展。

3. 推进清洁能源规模化开发利用的科技创新

突破储能、智能电网、分布式能源等核心技术，保障新能源和可再生能源的低成本、规模化开发利用。重点突破先进核电技术和核能多元化利用技术，研制具有自主知识产权的大型先进压水堆机组，开展快堆乏燃料后处理研究和示范，研发浮动核电站技术、海水提铀技术、核燃料闭式循环技术，探索核能在发电、城市采暖供热、工业工艺供汽及海水淡化领域的多用途利用技术。

4. 加强能源智能化发展

融合先进储能技术和信息技术，开展智能电网科技攻关，快速构建基于主干网、广域网和局域网的能源互联网，提升可再生能源电力消纳能力和利用水平，实现能源资源优化配置和智慧能源的新发展。

5. 积极探索碳减排战略储备技术

加强研发化石能源低碳化排放技术，攻关规模化碳捕集技术，促进风能、潮汐能、太阳能等新能源的推广和利用，建立健全碳减排政策激励制度，培育和发展相关产业。

五、对策建议

(一) 推进能源管理体制创新

全面推进能源产业市场化改革，遵循供求规律、价值规律和竞争规律，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，全面深化能源价格机制改革，厘清从能源自然资源到终端用户全价值链的价格传导机制，充分体现资源属性特点 [20]。建议提高能源产业的市场化程度，让更多的非公资本进入能源行业，参与能源资源的勘探开发、油气管网和电力基础设施建设，形成由政策性、商业性、合作性金融构成的多元投融资体系；探索建立和推广可再生能源配额交易、生态补偿等制度；加强地上资源（风能、太阳能等）与地下资源（煤炭、油气等）的统筹布局，形成煤炭、石油、天然气、页岩气与铀等地下能源资源一体化开发的协调机制。依托“一带一路”发展倡议，加强国际能源合作与互联互通，统筹海内外能源的开发利用。

(二) 推进形成能源价格的市场化机制

回归能源的商品属性，建议建立能源价格监管机制，协调理顺中央和地方财政利益分配关系，提高资源矿产开采权的审批标准；加快电力市场化改革，完善化石能源发电及输配电价形成机制，建立反映资源稀缺性、环境外部性成本的能源价格形成机制；开展成品油定价机制的市场化改革，逐步实现由政府定价向企业自主定价转变；建立和完善基于市场定价的碳交易制度，促使多元化低碳发展投融资体制建设和企业自主减少碳排放。

(三) 加大对能源绿色开发利用的考核

建议推广绿色 GDP，建立科学的绿色政府绩效考核体系，改变仅仅追求经济指标的政绩观，建立绿色低碳经济的统计和考核指标，形成“绿色低碳评估体系”。提高污染物排放量、有毒有害气体排

放量、CO₂ 排放量、森林覆盖率、植被绿化率、土地复垦率等限制性指标，将大气保护、生态修复、环境治理的完成情况纳入地方政绩考核 [21]。加强企业新能源利用，共建绿色生态新机制，推进生态建设与绿色能源综合利用。

(四) 建立能源绿色开发利用的科技创新体系

加快建立健全适合中国特点的、“产学研”一体化的能源科技创新体系。建议确定能源技术战略重点，加大对能源战略性前沿技术、先导工程技术和颠覆性技术研发的支持力度；创新科研组织形式，统筹“产学研”科技攻关力量，建立共性技术研发平台，支持和引导建立基于市场机制的产业创新联盟，积极推动设立实施煤炭清洁高效利用的国家重大科技项目；建立煤炭绿色开发利用国家实验室，将煤炭绿色开发、煤炭智能开发、资源高效回收、资源协调开发等确定为重要单元，汇集创新资源和创新科研团队进行能源开发利用的原创性和协同创新研究，引领我国能源开发利用技术的快速发展；建立健全复合型专业人才的培养机制，满足能源绿色开发利用的人才需求。

参考文献

- [1] 郭朝先, 沈云昌. 我国绿色能源开发利用状况的思考 [J]. 中国国情国力, 2014, 4(8): 47-48.
Guo C X, Shen Y C. Thinking on the development and utilization of green energy in our country [J]. China's National Conditions and Strength, 2014, 4(8): 47-48.
- [2] 赵素丽. 绿色能源的合理利用与开发 [J]. 中华建设, 2012, 7(7): 186-187.
Zhao S L. Reasonable utilization and development of green energy [J]. China Construction, 2012, 7(7): 186-187.
- [3] 张国坤. 大力推广浅层地热能开发利用促进崇明生态建设与环境保护 [J]. 上海国土资源, 2012, 33(2): 3-4.
Zhang G K. Vigorously promote shallow geothermal energy development and utilization to promote ecological construction and environmental protection in Chongming [J]. Shanghai Land and Resources, 2012, 33(2): 3-4.
- [4] 黄定高, 高涛. 生物能源的合理开发与利用 [J]. 中国集体经济, 2011, 6(21): 184-185.
Huang D G, Gao T. Reasonable development and utilization of bioenergy [J]. China's Collective Economy, 2011, 6(21): 184-185.
- [5] 唐雪松. 我国水电能源开发利用浅谈 [J]. 技术与市场, 2008, 8(5): 43.
Tang X S. Brief discussion on development and utilization of hydropower energy in our country [J]. Technology and Market, 2008, 8(5): 43.

- [6] 谢克昌. 推动能源生产和消费革命战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Xie K C. Research on the strategy of promoting energy production and consumption revolution [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [7] 张玉卓, 凌文, 李全生, 等. 碳约束条件下我国能源结构优化研究 [R]. 北京: 中国工程院, 2018.
Zhan Y Z, Ling W, Li Q S, et al. Research on energy structure optimization under carbon constraints [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2018.
- [8] 袁亮, 凌文, 李全生, 等. 煤矿安全与废弃矿井资源开发战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Yuan L, Ling W, Li Q S, et al. Coal mine safety and abandoned mine resources development strategy [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [9] 章建华. 推动新时代能源事业高质量发展 稳步推进新一轮电力体制改革 [J]. 电力设备管理, 2019 (10): 24–27.
Zhang J H. Promote the high-quality development of the energy industry in the new era and steadily advance a new round of power system reform [J]. Electric Power Equipment Management, 2019 (10): 24–27.
- [10] 李全生. 加快推进我国能源绿色开发利用 [N]. 学习时报, 2019–10–30 (07).
Li Q S. Accelerate the development and utilization of green energy in China [N]. Study Times, 2019-10-30 (07).
- [11] BP. BP energy outlook 2020 [EB/OL]. (2019-09-04) [2020-11-30]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-energy-outlook-2020.html>.
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [13] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Yuan L. Strategic studies of high-efficient and energy-effective coal extractions in China [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [14] 赵腊平. 马克思主义生态观的最新成果 [J]. 青海国土经略, 2020, 3(3): 25–27.
Zhao L P. The latest achievements of Marxist ecological view [J]. Qinghai Land Management Strategy, 2020, 3(3): 25–27.
- [15] 谢和平. 煤炭发展的未来之路 [J]. 当代矿工, 2019, 31(11): 1–6.
Xie H P. The future road of coal development [J]. Modern Miner, 2019, 31(11): 1–6.
- [16] 郝秀强, 常振恒, 俞珠峰. 鄂尔多斯盆地煤与天然气的协调开发及综合评价 [J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(11): 63–67.
Hao X Q, Chang Z H, Yu Z F. Coordinated development and comprehensive evaluation on coal and natural gas in Ordos Basin [J]. Coal Economic Research, 2017, 37(11): 63–67.
- [17] 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考 [J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 11–16.
Wang S M. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China [J]. China Coal, 2020, 46(2): 11–16.
- [18] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.
Xie H P, Wang J H, Wang G F, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [19] 黄其励, 袁晴棠, 韩涛. 能源生产革命的若干问题研究 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 105–110.
Huang Q L, Yuan Q T, Han T. Study on several issues of energy production revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(9): 105–110.
- [20] 严晓辉, 李政, 谢克昌. 京津冀农村能源体制机制问题初探 [J]. 中国能源, 2016, 38(1): 32–36.
Yan X H, Li Z, Xie K C. Preliminary study on institutional problems of rural energy in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Energy of China, 2016, 38(1): 32–36.
- [21] 张志雄. 山西能源生产结构现状及其优化措施和建议 [J]. 能源与节能, 2019 (8): 32–33, 81.
Zhang Z X. Status quo of energy production structure of Shanxi and its optimization measures and suggestions [J]. Energy and Energy Conserve, 2019 (8): 32–33, 81.