

• 碳中和与绿色能源 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202300331



本刊网刊

## 中国现代能源体系建设进程评估

朱广岩<sup>1,2,3,4</sup>, 张小妹<sup>1,2,3</sup>, 严晓辉<sup>5</sup>, 高丹<sup>6</sup>, 呼和涛力<sup>7</sup>, 程婉静<sup>8</sup>, 田亚峻<sup>1,2,3\*</sup>, 谢克昌<sup>1,2,3,9</sup>

(1.中国科学院青岛生物能源与过程研究所 泛能源大数据与战略研究中心, 山东 青岛 266101; 2.山东能源研究院, 山东 青岛 266101; 3.青岛新能源山东省实验室, 山东 青岛 266101; 4.中国科学院大学 化学工程学院, 北京 100049; 5.国家能源投资集团有限责任公司 科技部, 北京 100013; 6.华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 7.常州大学 城乡矿山研究院, 江苏 常州 213164; 8.中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732; 9.中国工程院, 北京 100088)

**摘要:** 能源是国家经济社会发展的基石, 构建现代能源体系对保障国家能源安全, 如期实现“双碳”目标, 推动经济社会高质量发展具有重要意义。本文基于清洁、低碳、安全、高效4个维度构建了现代能源指标体系, 运用序关系分析法定量评价中国现代能源体系的历史进程, 并进行国内外横向对比。结果表明: 过去11年(2010—2020年), 中国推动能源革命进程成效显著, 2020年达到了世界平均水平, 在全球76个主要经济体中排名第38位, 落后于欧盟、美国、日本等发达经济体, 领先于俄罗斯、印度等发展中经济体。中国高效指数排名明显落后于发达经济体, 表明中国能效提升方面空间巨大, 也说明更要重视科技投入; 中国的安全指数排名比较靠前, 证明了中国煤炭在能源安全中的“压舱石”地位, 但是同样的原因导致中国的低碳指数相对落后; 过去10年, 中国能源清洁利用成效显著, 但是排名整体靠后, 说明中国能源的清洁开发利用依然任重道远。其中, 中国能源结构指标、碳排放系列指标、能源强度指标是影响中国综合指数水平的关键性指标, 尤其是能源强度指标。因此, 首先, 未来要加快构建以可再生能源为主、以化石能源为辅的现代能源体系; 其次, 新能源与低碳技术达到体量尚需时日, 长期以来, 煤炭支撑中国经济和社会较快发展, 是中国能源安全保障的压舱石和稳定器, 煤炭清洁高效利用仍需加强, 而实现了清洁高效利用的煤炭就是能源清洁; 最后, 能源转型的关键是优化能源结构, 要多能互补, 集成热、电、气、冷, 提升火电机组灵活性, 而在终端消费方面提高能源效率, 降低能源强度, 实施电能替代, 形成以电为中心的能源消费格局。

**关键词:** 现代能源体系指数; 清洁; 低碳; 安全; 高效

**中图分类号:** F113

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2024)01-0206-12

能源是国民经济社会发展的基础和动力, 关系国家发展的经济命脉, 对人民美好生活和社会的长治久安至关重要。同时, 能源的发展也面临着诸多挑战<sup>[1]</sup>。近年来, 氮氧化物、硫氧化物、颗粒物等污染物的排放对生态环境、人类健康产生了较大影响, 而这些污染物主要源于化石能源的生产和消费。其次, 化石能源是全球二氧化碳排放的主要来源, 2021年中国能源燃料相关的二氧化碳排放量约为 $98.9 \times 10^8$  t, 约占全球的30.9%<sup>[1-2]</sup>。除此之外, 中国石油和天然气

的对外依赖严重, 2021年的对外依存度分别为72%、44.9%<sup>[3-4]</sup>, 且能源进口国家主要集中在地缘政治不稳定地区<sup>[5]</sup>, 中国的能源安全问题受到严重威胁。近年来, 中国能源消费总量连续多年位居世界第一, 并且能源消费总量呈现逐年上升的趋势<sup>[6-7]</sup>。过去40年, 中国节能降耗成效显著, 但是利用方式还比较粗放<sup>[8]</sup>, 化石能源在全生命周期过程中利用效率极低<sup>[9]</sup>。当下正处于新的历史时期, 为解决中国能源面临的诸多挑战, 必须加快构建“清洁、低碳、安全、高效”的现

收稿日期:2023-05-03

基金项目:中国工程院咨询项目(2022-XZ-33)

作者简介:朱广岩(1999—), 男, 博士生。研究方向:生命周期评价。E-mail: zhugy@qibebt.ac.cn

\*通信作者:田亚峻, 研究员, E-mail: tianyajun@qibebt.ac.cn

网络出版时间:2023-11-21 13:36:53

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20231120.1130.002

代能源体系。

目前,国内针对现代能源体系指数的相关研究较少,大多分析构建现代能源体系的必要性。中国发展现代能源由来已久,从“十一五”规划提出的“构筑稳定、经济、清洁、安全的能源供应体系”<sup>[10]</sup>,到“十二五”规划进一步提出“推动能源生产和利用方式变革,构建安全、稳定、经济、清洁的现代能源产业体系”<sup>[11]</sup>,再到“十三五”规划中进一步表述为“建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系”<sup>[12]</sup>,而在目前实施的“十四五”规划中,单独设置“构建现代能源体系”一节,提出“推进能源革命,建设清洁低碳、安全高效的能源体系,提高能源供给保障能力”<sup>[13]</sup>。2022年1月29日,国家发展改革委、国家能源局在《“十四五”现代能源体系规划》中提出“着力推动能源生产消费方式绿色低碳变革,着力提升能源产业链现代化水平,加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系”<sup>[14]</sup>。

开展现代能源体系建设进程评估研究,采用系统分析法构建包含“清洁、低碳、安全、高效”4个维度的现代能源评价指标体系,并据此开展国内外横向对比及能源发展历史纵向对比,定量评价建设“清洁、低碳、安全、高效”的能源体系进程,可以全面展现中国推进能源革命的成效,反映能源发展中存在的各种亟须改进的问题,对中国推进能源革命,建设“清洁、低碳、安全、高效”现代能源体系具有重要的指导意义。

## 1 现代能源体系的定义

习近平总书记在中央财经委员会第九次会议和中央政治局第三十六次集体学习时,就“双碳”工作作出重要指示,强调的第一项重点任务就是“构建清洁、低碳、安全、高效的能源体系”<sup>[15]</sup>。“清洁、低碳、安全、高效”就是现代能源体系的核心内涵,同时也是对能源系统如何实现现代化的总体要求<sup>[16]</sup>。

### 1.1 清洁维度

清洁主要是指能源的开发利用全过程最大程度地减少对生态破坏和环境的污染。能源的清洁生产和消费从本质上来说,就是采取整体预防的环境策略,减少或者消除其对人类及环境的可能危害,同时充分满足用户需要,使社会经济效益最大化。优化生产组织和实施科学的生产管理,减少或者避免能源生产过程中污染物的产生和排放;通过采用先进的工艺技术与设备,从源头削减污染,提高能源资源利用效率;最后,政府和企业出台相关措施进行必要的污染治理,通过这些措施能够降低能源在全生命周期链条上污染物的排放,保障能源清洁生产及消费。清洁能源有两方面的含义,一方面是大力发展清洁

能源,如可再生的风能、太阳能等和核能。另一方面是积极推进传统能源的清洁高效利用,在全产业链条上实现绿色开发、清洁高效利用,如实现了清洁高效利用的煤炭。

### 1.2 低碳维度

低碳主要是指在能源的生产和消费过程中最大程度的减少碳排放。为应对全球气候变暖,2015年,195个缔约方达成了《巴黎协定》,减少碳排放已成为国际社会的共识<sup>[17]</sup>。全球应对气候变化开启新征程,超过130个国家和地区提出了碳中和目标<sup>[14]</sup>。2020年,中国在第七十五届联合国大会上提出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”<sup>[18]</sup>。实现“碳达峰、碳中和”是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,而能源领域是实现“碳达峰、碳中和”的主战场<sup>[19]</sup>。从能源的全生命周期链条上研发低碳技术、提碳技术、碳化技术、固碳技术和封碳技术是解决碳排放问题的重中之重。

### 1.3 安全维度

能源安全是落实总体国家安全观在能源领域的重要体现。中国能源安全新旧风险交织,油气资源匮乏的短板无法改变,高度对外依存长期存在,区域性、时段性能源供需紧张问题时有发生。中国“富煤、贫油、少气、可再生能源分布不均”的能源资源禀赋特征决定了短期内煤炭仍将发挥主体能源作用<sup>[20]</sup>。面对“碳达峰、碳中和”目标,中国将规模化、集约化发展新能源,其间歇性、波动性将对能源安全供应带来巨大影响。面对外部动荡的局势和新能源的不确定性,叠加碳中和战略的实施,需要加强能源的多元化供应,保障国内能源供需稳定和供应安全,将能源的饭碗牢牢端在自己手里,以保障国家经济高质量发展。

### 1.4 高效维度

高效是指全面提高能源生产、转换、输配和消费的全生命周期效率,减少对能源与资源的消耗。能源利用效率是衡量一个国家和地区发展质量的重要标志,能源的数字化和智能化是提升能源效率的有效手段。提高能源利用效率不仅是满足中国现代化能源增长需求的重要保障,而且是实现美丽中国和应对气候变化的重要前提,还是壮大绿色发展新动能的重要源泉。

本文综合以上“清洁、低碳、安全、高效”4个维度,共包含27项指标,构建了现代能源综合评价指标体系,如图1所示。该指标体系全面涵盖了影响现代能源发展的主要因素。

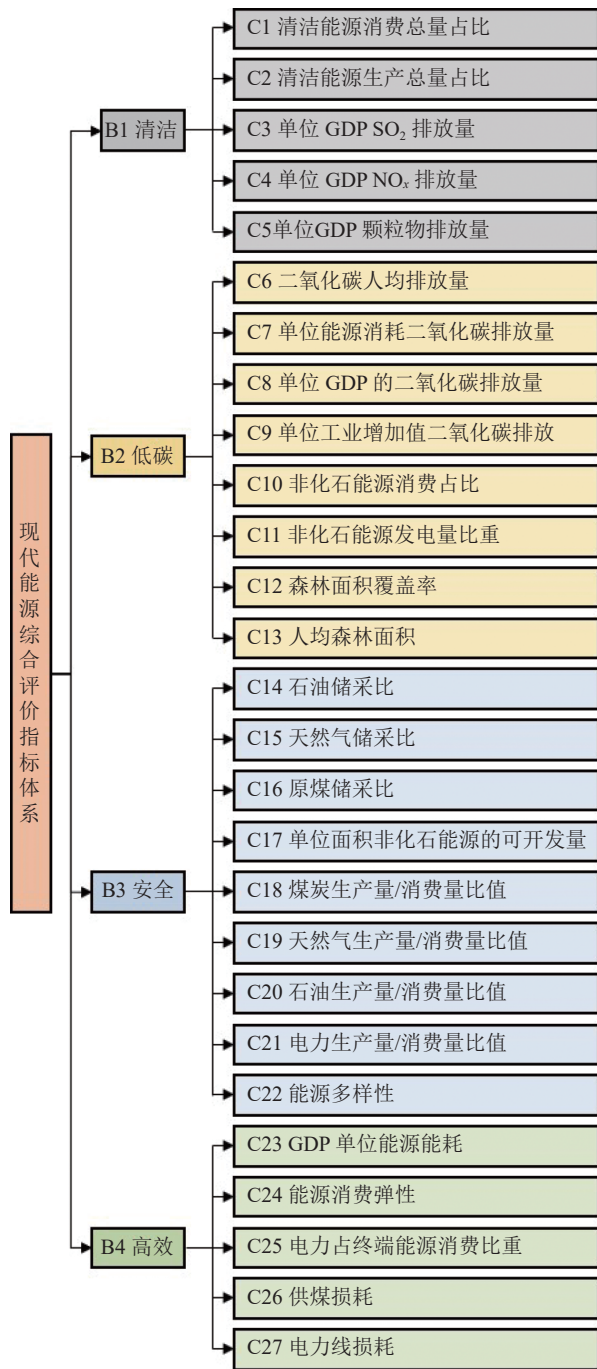


图 1 现代能源综合评价指标体系

Fig. 1 Modern energy comprehensive evaluation index systems

## 2 评价模型与数据来源

### 2.1 指标计算

#### 2.1.1 指标数据来源与量化

本文通过多种渠道进行数据收集,且都来自于权威机构发布的统计和研究数据。能源生产消费、二氧化碳排放数据主要来自于英国石油公司、国际能源署; GDP、工业增加值等数据来自世界银行; 颗粒物排放量、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )等污染

物排放数据主要来自全球大气研究排放数据库。具体相关指标数据见表1。

表 1 指标量化方法与数据来源

Tab. 1 Quantitative methods and data sources of indicators

指标	量化描述方法	数据来源
C1	天然气和非化石消费量占一次能源消费总量的比重	BP <sup>[21]</sup>
C2	天然气和非化石生产量占一次能源生产总量的比重	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C3	年 $\text{SO}_2$ 排放量与该年GDP的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、EDGAR <sup>[24]</sup>
C4	年 $\text{NO}_x$ 排放量与该年GDP的比值	World Bank <sup>[23]</sup>
C5	年颗粒物排放量与该年GDP的比值	World Bank <sup>[23]</sup>
C6	年 $\text{CO}_2$ 排放量与年末人口总量的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、BP <sup>[21]</sup>
C7	年 $\text{CO}_2$ 排放量与该年一次能源消费总量的比值	BP <sup>[21]</sup>
C8	年 $\text{CO}_2$ 排放量与该年GDP的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、BP <sup>[21]</sup>
C9	年 $\text{CO}_2$ 排放量与该年工业增加值的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、BP <sup>[21]</sup>
C10	非化石消费量占一次能源消费总量的比重	BP <sup>[21]</sup>
C11	非化石能源发电占发电总量的比重	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C12	年末森林面积占国土总面积的比重	World Bank <sup>[23]</sup>
C13	年末森林面积与年末人口总量的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、FAO <sup>[25]</sup>
C14	年末剩余可采储量与年采出量之比	BP <sup>[21]</sup>
C15	年末剩余可采储量与年采出量之比	BP <sup>[21]</sup>
C16	年末剩余可采储量与年采出量之比	BP <sup>[21]</sup>
C17	年非化石能源可开发量(折算发电量)与国土总面积的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、Global Solar Atlas <sup>[26]</sup> 、Global Wind Atlas <sup>[27]</sup>
C18	年煤炭生产量与消费量的比值	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C19	年天然气生产量与消费量的比值	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C20	年石油生产量与消费量的比值	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C21	年电力生产量与消费量的比值	BP <sup>[21]</sup> 、IEA <sup>[22]</sup>
C22	能源多样性	BP <sup>[21]</sup>
C23	年能源消费总量与年GDP的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、BP <sup>[21]</sup>
C24	年能源消费增长率与年GDP增长率的比值	World Bank <sup>[23]</sup> 、BP <sup>[21]</sup>
C25	终端能源中电力所占的比重	IEA <sup>[22]</sup>
C26	发电厂每向外提供1 kW·h电能平均耗用的标准煤量	IEA <sup>[22]</sup>
C27	线损电量占供电总量的比重	IEA <sup>[22]</sup>

#### 2.1.2 指标数据来源与量化

由于各指标数据的单位有所不同,因此必须进行标准化处理,见表2。

表2 指标标准化处理方法  
Tab.2 Standardized treatment of indicators

指标	归一化赋值方法
C1、C2	以2020年世界平均水平为50, ≥90%为100, 0为0, 插值
C3、C4、C5、C6、C7、C8、C9	以2020年世界平均水平为50, 0为100, 插值, 出现负值为0
C10	以2020年世界平均水平为50, ≥80%为100, 0为0, 插值
C11	以2020年世界平均水平为50, ≥85%为100, 0为0, 插值
C12、C13、C17	以2020年世界平均水平为50, 0为0, 插值, 超过100为100
C14、C15、C16	以世界石油、天然气平均储采比50 a为100, 超过50 a为100, 0 a为0, 插值
C18、C19、C20、C21	以2020年世界平均水平为50, 大于1为100, 小于1为具体数值乘以100
C22	以2020年世界平均水平为50, 取1.386为100(即煤炭、石油、天然气、非化石4种能源占比各25%), 取0为0(即某一种能源占100%), 插值
C23	以2020年世界平均水平为50, 0.9万美元/tce为100, 插值, 出现负数为0
C24	以2020年世界平均水平为50, ≤0为100, 插值, 出现负值为0
C25	以2020年世界平均水平为50, 60%为100, 插值, 出现负值为0
C26	以2020年世界平均水平为50, 246 gce/kW·h(净效率50%)为100, 插值, 出现负值为0
C27	以2020年世界平均水平为50, 先进国家水平为100, 插值, 出现负值为0

注: 指标、各维度指数和现代能源体系综合指数均进行数据归一化处理, 其中, 指数值100代表2020年世界最优, 50代表2020年世界平均水平。

## 2.2 权重计算

所选取的主观赋权方法是序关系分析法, 又被称为G1法。这是一种基于层次分析法的主观赋权法<sup>[28]</sup>。然而, 在应用AHP解决实际问题的过程中, 判断矩阵的构造一般不满足一致性条件<sup>[29]</sup>。G1法解决了层次分析法在矩阵构造不满足一致性检验时不能使用的问题<sup>[30]</sup>。G1法的优势在于无需构建判断矩阵, 也就无需进行一致性检验; 与构造层次分析法判断矩阵相比计算量成倍减少; G1法在应用中对方案的个数也没有限制; 由于序关系的给出完全表达了专家的意愿, 其结果也完全值得信赖<sup>[30]</sup>。本研究所涉及的评价维度多, 指标规模大, 非常适合采用序关系分析法。

序关系分析法是根据某一标准将评估体系中同维度所有评估指标的重要性进行排序, 然后根据重要性顺序依次确定相邻指标之间的重要性程度值, 最终求得指标权重的方法<sup>[31]</sup>。采用能源领域专家打分法的形式, 根据构建的指标体系制作调查问卷。按照序关系分析法, 指标权重分析方法分3个步骤:

步骤1), 确定指标之间的序关系。针对各评价指标, 按照专家对各指标的重要程度评分, 确定排序关系。若指标 $X_i$ 相对于 $X_j$ 重要, 则记为 $X_i > X_j$ 。根据这一规则, 可确定各指标的重要度排序关系。各指标之间有重要性相同的情况, 本步骤中同等重要的指标先后排序不影响后续分析及结果。

步骤2), 确定相邻评价指标的重要性程度值。专

家根据比例标度法判断相邻评价指标的重要性程度值, 设相邻两指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 的重要性之比用 $r_k$ 表示, 如式(1)所示<sup>[32]</sup>:

$$r_k = \frac{w_{k-1}}{w_k}, k = n, n-1, \dots, 2 \quad (1)$$

式中,  $w_k$ 为 $k$ 指标的权重。

步骤3), 计算各评价指标的指标权重。通过式(2)~(4)可以依次算出各指标的权重, 即先计算第 $n$ 个指标权重, 之后依次求出其他指标的权重。

$$w_n = \left( 1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i \right)^{-1} \quad (2)$$

其他指标权重为:

$$w_{k-1} = r_k w_k, k = n, n-1, \dots, 2 \quad (3)$$

至此, 可以求出整组指标的权重集合 $w$ :

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T \quad (4)$$

式(2)~(4)中,  $w_n$ 为第 $n$ 个指标的权重。

根据院士、专家问卷调研结果, 能源安全维度的权重最高, 为29.6%<sup>[33]</sup>。这是考虑到当前国际国内形势异常复杂, 必须始终把能源安全可靠供应摆在首要位置, 不能丢了“饭碗”谈转型, 必须确保能源的“饭碗”端在自己手里<sup>[34]</sup>。能源清洁、低碳维度的权重相等, 为23.6%<sup>[33]</sup>。“双碳”目标是党中央统筹国内国际形势做出的重大战略决策, 实现“双碳”目标必须在严格控制化石能源消费的同时, 积极大力发展

非化石能源,为国家能源清洁低碳转型提供重要保障。能源高效维度的权重相对最低,为23.2%。加大力度提高能源利用效率、节能降耗,有助于缓解能源供应保障压力,支撑经济社会发展,避免透支未来的能源资源、环境空间等<sup>[35]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 中国现代能源体系建设评估与分析

##### 3.1.1 清洁指数

全球约66%的NO<sub>x</sub>排放和大部分颗粒物排放来自能源部门,火电、热力和非金属矿物制品业是中国SO<sub>2</sub>排放的主要贡献者<sup>[36]</sup>。中国环境统计数据显示,2010—2020年,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物排放量呈逐年下降趋势,分别由2 185×10<sup>4</sup>、1 852×10<sup>4</sup>、1 277×10<sup>4</sup> t减少至318×10<sup>4</sup>、1 020×10<sup>4</sup>、611×10<sup>4</sup> t,年均下降率分别约17.52%、5.79%、7.11%,如图2所示<sup>[37]</sup>。

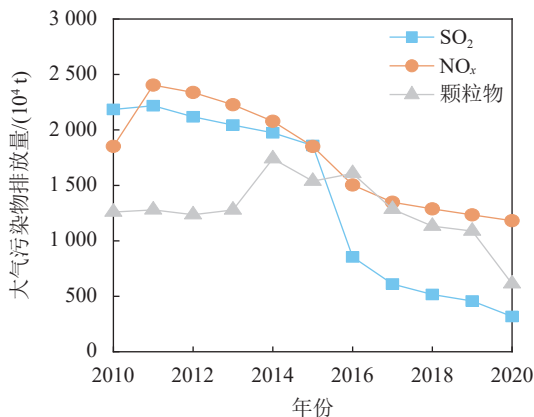


图2 中国大气污染物排放趋势<sup>[37]</sup>

Fig. 2 Emission trend of air pollutants in China<sup>[37]</sup>

图2中,SO<sub>2</sub>削减幅度相对较大,尤其在2015年左右呈现断崖式下降趋势。分析原因主要是中国大力推进能源革命,持续调整能源结构,适度控制煤炭产能,同时加强大气污染末端治理力度。显而易见,单位GDP SO<sub>2</sub>、单位GDP NO<sub>x</sub>、单位GDP颗粒物排放量也呈逐年下降趋势,年均下降率分别约20.95%、11.59%、11.79%,如图3所示。2013年以后,颗粒物排放量及单位GDP颗粒物排放量明显增加,这可能与环境保护“十二五”规划取消了对烟粉尘的总量控制有关<sup>[37-38]</sup>。

##### 3.1.2 低碳指数

2010—2020年,中国CO<sub>2</sub>排放总量由81.46×10<sup>8</sup> t增长至98.99×10<sup>8</sup> t<sup>[21]</sup>,年均增长率约1.97%,低于同期能源消费年均增长率,这进一步说明中国能源低碳转型发展成效显著。中国4项碳排放强度指标变化趋势如图4所示。由图4可见:单位能耗CO<sub>2</sub>排放量和单位GDP CO<sub>2</sub>排放量均呈下降趋势,年均下降率分

别约1.06%、4.05%,这主要与政府出台相关环保政策、工业技术进步、产业升级以及环保意识逐渐提升有关;而CO<sub>2</sub>人均排放量和单位工业增加值CO<sub>2</sub>排放量均呈上升趋势,年均增长率分别约1.41%、1.54%,主要因为中国经济目前处于高速增长阶段,经济增长与能源消费尚未脱钩,CO<sub>2</sub>排放尚未达峰。

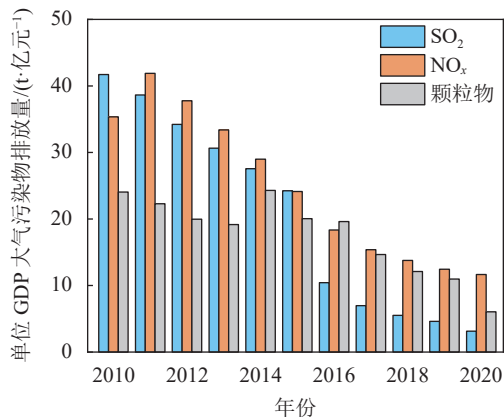


图3 中国单位GDP大气污染物排放趋势

Fig. 3 Emission trend of air pollutants per unit of GDP in China

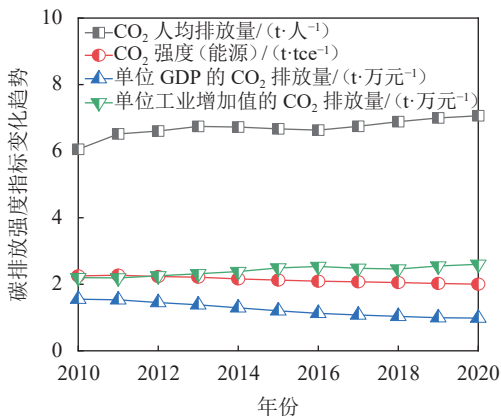


图4 中国碳排放强度指标变化趋势

Fig. 4 Change trend of indicators of China's carbon emission intensity

##### 3.1.3 安全指数

2021年,中国原煤、石油和天然气储量分别为2 079×10<sup>8</sup> t、37×10<sup>10</sup> t、63 393×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup><sup>[39]</sup>。能源资源储采比受能源产量波动影响,两者呈负相关关系,如图5所示。由图5可知:原煤产量2016年以后有所回升,相对应的原煤储采比在2016年以前呈上升趋势,而2016年以后有所下降,整体在40 a左右;天然气产量持续增长,尤其在2016年以后增速加快,天然气储采比在2016年以后稳定在40 a左右,到2020年为43.3 a;原油产量相对较少且稳定在2×10<sup>8</sup> t左右,石油储采比相应波动不大,在15~20 a范围内变化。非化石能源资源主要考虑的是风能、太阳能和水能,经调研发现,中国风电、光伏、水电年可开发量分别约507 330×10<sup>4</sup>、

$355\ 243\times 10^4$ 、 $54\ 164\times 10^4$  kW, 据此测算中国单位面积非化石能源年可开发量约 $180\times 10^4$  (kW·h)/km<sup>2</sup>。

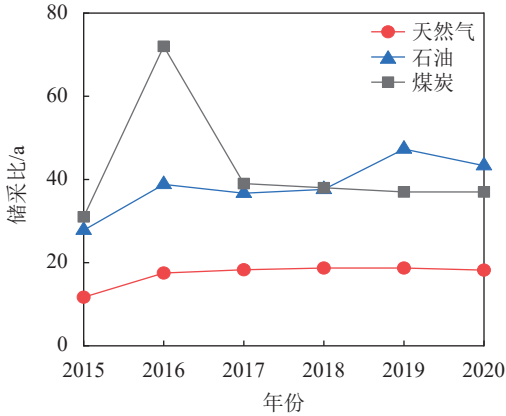


图5 中国能源资源储采比发展趋势

Fig. 5 Development trend of the ratio of energy resources storage and production in our country

中国能源资源供需关系发展趋势如图6所示。由图6可见:近年来,中国在压减煤炭产能的同时,严格控制煤炭消费量,促使煤炭对外依存度有所降低,即煤炭生产量与消费量比值回升,接近1;石油消费量呈持续增长趋势,但其生产量保持稳定,由于石油对外依存度不断上升,导致石油生产量与消费量比值下降,由2010年的0.47降至2020年0.28,年均下降率4.65%;天然气消费量和生产量均持续增长,但消费量年均增长率为10.81%,高于生产量6.55%,天然气对外依存度持续上升,导致天然气生产量与消费量比值下降,由2010年的0.89降至2020年的0.58,年均下降率3.84%;电力作为二次能源,全国范围内基本保持供需平衡,即电力生产量与消费量比值在1左右。

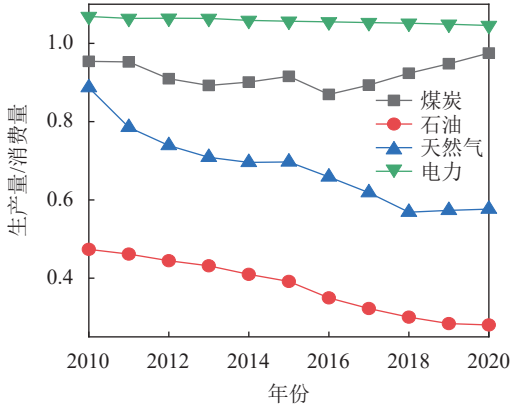


图6 中国能源资源供需关系发展趋势

Fig. 6 Development trend of energy resource supply and demand

采用Shannon-Weiner指数来衡量一次能源供应多样性,如式(5)。供应品种分为煤炭、石油、天然气、非化石能源4种,分析中国2010—2020年一次能源供应结构及品种比例变化情况。

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (5)$$

式中: $S$ 为一次能源供应品种数; $P_i$ 为第 $i$ 种品种的供应量占全部一次能源供应量的比重; $H$ 为表征国内一次能源供应的多样性指数, $H$ 越大,能源供应越丰富。经测算,中国能源供应多样性指数持续上升,由2010年的0.91升至2020年的1.14,年均增长率约2.04%。由此说明了中国近十年来在能源安全战略的指引下,能源供应能力有了较大提升,供应方式更加多样,逐渐形成了化石能源和可再生能源多轮驱动的能源生产体系。

### 3.1.4 高效指数

近年来,中国能源利用效率逐步提升,2011—2020年,单位GDP能耗由0.86 tce/万元下降至0.55 tce/万元<sup>[40]</sup>,年下降率为4.8%,但从国际比较来看,仍是世界平均水平的1.5倍<sup>[8]</sup>,并且能源消费弹性系数波动性较大。

中国电气化水平持续提升,电力占终端能源消费比重由2010年的22.68%上升至2020年的26.5%,年均增长率约1.57%<sup>[41]</sup>。电力供输效率也同步提升,例如,供电煤耗由2010年的333.3 gce/(kW·h)降至2020年的304.9 gce/(kW·h),年均下降率约0.88%,这主要与多年来中国持续进行煤电机组改造升级,不断提升能源利用效率有关;电力线损率由2010年的6.53%降至2021年的5.26%,年均下降率约1.95%<sup>[42]</sup>。

### 3.1.5 综合指数

根据前述确定的指标标准化方法与指标权重,综合27项指标计算获得能源“清洁、低碳、安全、高效”指数,如图7所示。2010—2020年,中国能源清洁指数发展跨度较大,从8.26跃升至55.75,年均增长率约18.96%,表明过去十年间中国能源清洁生产和利用成效突出。中国能源低碳指数相对较低但呈上升趋势,由2010年的24.51上升至2020年的30.95,年均增长率约2.63%,同期能源低碳指数增长速率要明显低于能源清洁指数。中国能源安全指数相对较高但呈下降趋势,这主要受石油和天然气对外依存度增强的影响,由2010年的70.27降至2020年的64.67,年均下降率约0.75%。中国能源高效指数呈波动上升趋势,这主要受能源消费弹性系数的波动影响,总体上由2010年的41.76上升至2020年的45.25,年均增长率约0.73%,同期能源高效指数增长速率要低于能源清洁和能源低碳指数。总体而言,过去十年中国能源在清洁、低碳、高效利用方面均取得不同程度的进步,尤其在清洁利用方面成绩斐然。能源安全指数受油气资源对外较高依赖的影响略有下降,但依然处于较

高的水平,主要得益于中国煤炭资源的自给自足程度较高,凸显煤炭在能源安全中的重要地位。

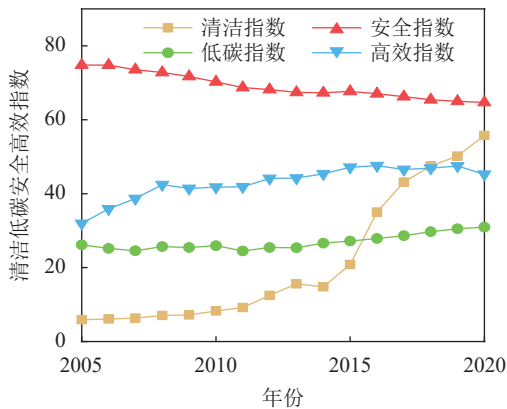


图 7 中国现代能源体系指数发展趋势

Fig. 7 Index development trend of China's modern energy systems

将4类指数按相应权重计算得到中国现代能源体系综合指数,如图8所示。由图8可见,中国现代能源体系综合指数呈持续上升趋势,由2010年的38.56升至2020年的50.09,年均增长率约2.65%。由此可见,10年来,中国推动能源革命成效显著,现代能源体系建设水平稳步提升,在“清洁、低碳、安全、高效”等方面均取得不同程度的进步。但中国能源安全问题和碳排放问题较为突出,未来中国能源发展必须确保能源安全为前提,加快建立以可再生能源为主、以化石能源为辅的现代能源体系,不断提升能源利用效率,稳步推进能源绿色低碳转型。

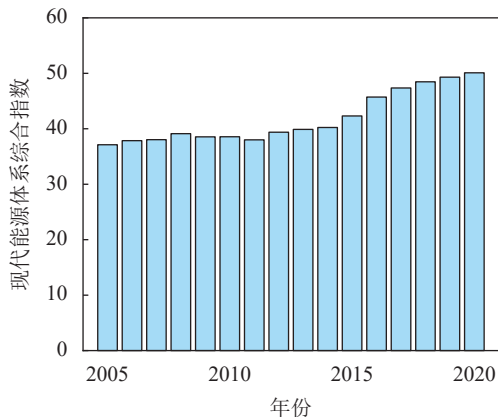


图 8 中国现代能源体系综合指数发展趋势

Fig. 8 Development trend of China's modern energy systems comprehensive index

### 3.2 国际典型国家、地区现代能源体系评估与分析

对中国现代能源体系建设进程开展纵向分析的同时,还应以科学、客观、统一的评价指标体系,开展国际典型区域之间的现代能源体系的横向对比,考察中国能源发展在全球所处位置,进一步分析中国与发达国家和地区存在的差距。本文选取了76个

国家或地区开展对比分析,见表3,并重点分析美国、欧盟与日本。

表 3 参与现代能源体系横向对比的国家或地区

Tab. 3 Countries or regions participating in horizontal comparison of modern energy systems

地区	代表性国家	数量
北美地区	加拿大、墨西哥、美国	3
南美地区	阿根廷、巴西、智利等	7
欧洲地区	英国、瑞士、欧盟国家等	33
独联体国家	俄罗斯、白俄罗斯等	6
中东地区	伊朗、沙特、阿联酋等	8
非洲地区	阿尔及利亚、埃及等	4
亚洲地区	中国、日本、印度等	15
合计		76

#### 3.2.1 国际典型区域现代能源体系之清洁指数

根据2020年能源清洁指数对比结果<sup>[33]</sup>,中国能源清洁指数为55.75,世界排名第48位。欧美地区能源清洁指数相对较高。欧盟、日本、美国的能源清洁指数分别为84.07、83.82、70.36,依次位列世界第13、第15、第34位,均高于中国。中国能源清洁指数落后于G7等发达经济体,在G20成员国中排名第11,排名落后于中国的有土耳其、加拿大、墨西哥、巴西、俄罗斯、沙特阿拉伯、印度尼西亚、印度和南非共和国。排名靠前的国家清洁能源资源和利用率均比较高。如图9(a)所示,中国的弱项指标主要是清洁能源消费与生产比重,由于天然气计入清洁能源,美国与欧盟的天然气优势较为显著,而日本核电发展相对成熟。

#### 3.2.2 国际典型区域现代能源体系之低碳指数

根据2020年能源低碳指数对比结果<sup>[33]</sup>,中国能源低碳指数为30.95,世界排名第56位。欧美地区能源低碳指数相对较高,这主要与两个地区的光伏、风电、生物质能等非化石能源发展相对成熟有关。欧盟、美国、日本的能源低碳指数分别为63.06、55.18、50.79,依次位列第19、第28、第35位,均高于中国。中国能源低碳指数明显落后于G7等发达经济体,在G20成员国中排名第17位,排名落后于中国的有印度、南非共和国和沙特阿拉伯。如图9(b)所示,中国的各项指标均未超过50,其中,未超过20的指标是人均CO<sub>2</sub>排放量、单位GDP CO<sub>2</sub>排放量和人均森林蓄积量。

#### 3.2.3 国际典型区域现代能源体系之安全指数评估与分析

根据2020年能源安全指数对比结果<sup>[33]</sup>,中国能源安全指数为64.67,世界排名第16位。俄罗斯和美国能源安全指数相对较高。俄罗斯、美国、欧盟、日本的安全指数分别为87.30、75.30、56.55、37.79,依次位列

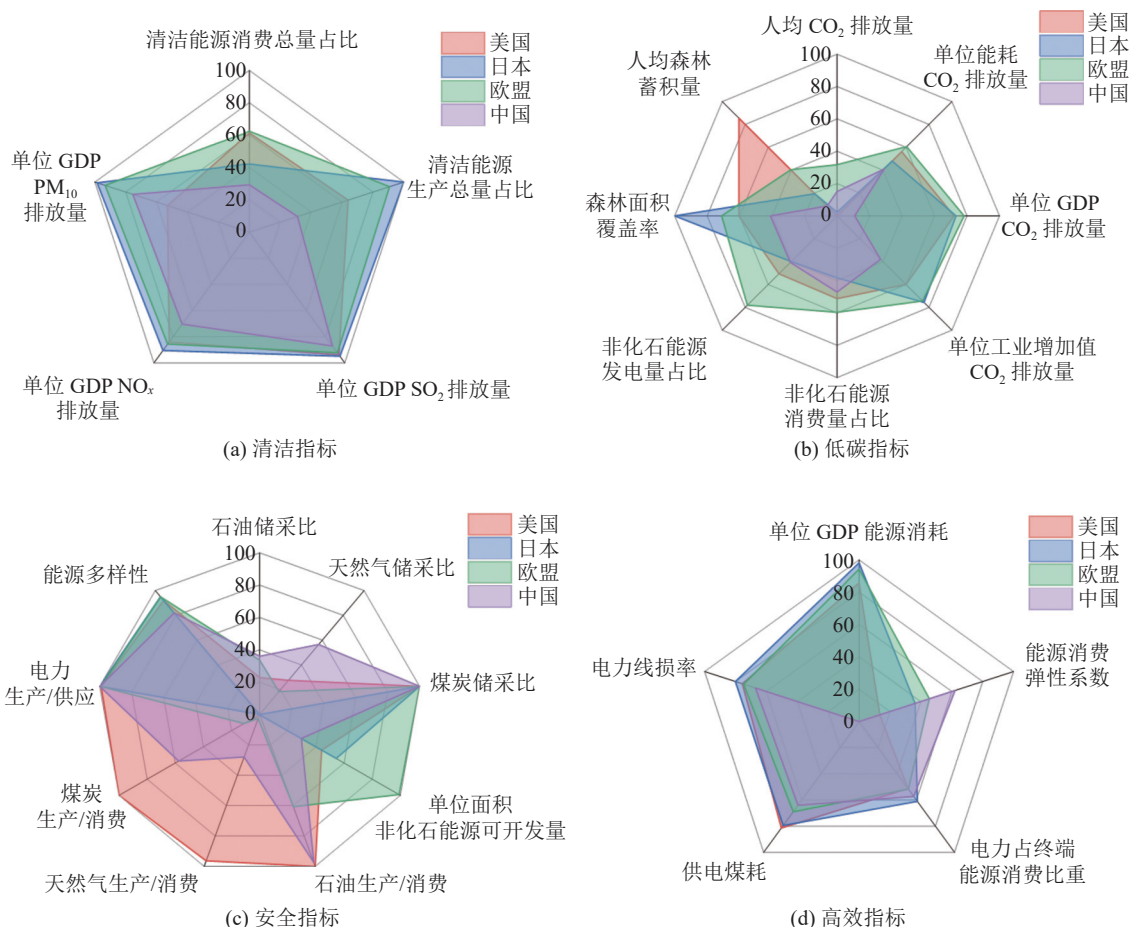


图9 部分国家清洁低碳安全高效指标对比分析

Fig. 9 Comparative analysis of clean, low-carbon, safe, and efficient indicators in some countries

第2、第5、第27、第48位。中国能源安全指数明显领先于G7等发达经济体,在G20成员国中排名第7位,排名领先于中国的有俄罗斯、加拿大、美国、澳大利亚、印度尼西亚和沙特阿拉伯。如图9(c)所示,中国的大部分安全指标超过了50。其中,煤炭对于中国能源安全的贡献最大,相对较低的指标是单位面积非化石能源可开发量、石油储采比,以及天然气生产与消费的比值,这主要由中国“富煤、贫油、少气”的自身资源特征所决定。

### 3.2.4 国际典型区域现代能源体系之高效指数

根据2020年能源高效指数对比结果<sup>[33]</sup>,中国能源高效指数为45.25,世界排名第42位。日本和欧洲地区能源高效指数相对较高。日本、欧盟、美国的能源高效指数分别为73.51、69.47、63.80,依次位列第6、第11、第18位。中国能源高效指数明显落后于G7等发达经济体,在G20成员国中排名第14位,排名落后于中国的有巴西、沙特阿拉伯、南非共和国、印度尼西亚、印度和俄罗斯。中国的能源高效指数与西方主要经济体差距显著,具有很大的改善空间。如图9(d)所示,中国的能源消费弹性系数超过3个发达国家或地

区,能源消费弹性系数是反映能源消费增长速度与国民经济增长速度之间比例关系的指标,能够反映经济增长对能源的依赖程度。近年来,中国经济增长与能源消费实现了弱脱钩。与发达国家相同发展阶段相比,中国脱钩时间比较超前,在工业化中期阶段能源消费增速就低于经济增速了。电力线损率、供电煤耗和社会电气化水平等指标与3个发达国家或地区的水平相差不大,但是中国能源强度与发达国家水平相差较大,中国的能源强度在2010年是世界平均水平的2倍,近10年逐步下降,但在2018年仍是世界平均水平的1.5倍。能源强度仍然偏高的原因主要是高耗能产业占比仍然过高,产业结构调整尚不到位;技术水平不够节能高效;再加上诸多的浪费。中国节能提效潜力巨大,例如燃煤电厂,每供1 kW·h的电力,1978年平均消耗煤炭471 g,2018年已进步到只消耗308 g,而对于中国先进的上海外高桥三厂,只需270 g煤炭。

### 3.2.5 国际典型区域现代能源体系之综合指数

根据2020年能源综合指数对比结果<sup>[33]</sup>,中国能源综合指数为50.09,世界排名第38位,处于中游位

置。欧盟、美国、日本的能源综合指数分别为67.58、66.72、60.02, 依次位列第2、第3、第16位。中国能源综合指数与G7等发达经济体有明显差距, 在G20成员国中排名第 14位, 排名落后于中国的有俄罗斯、土耳其、印度尼西亚、沙特阿拉伯、印度和南非共和国。整

体处于世界主要经济体的中游水平, 除安全指数外, 其他3个维度的指数与发达经济体的差距均比较明显。

针对76个国家或地区的4类能源指数的特征进行了综合分析, 如图10所示。

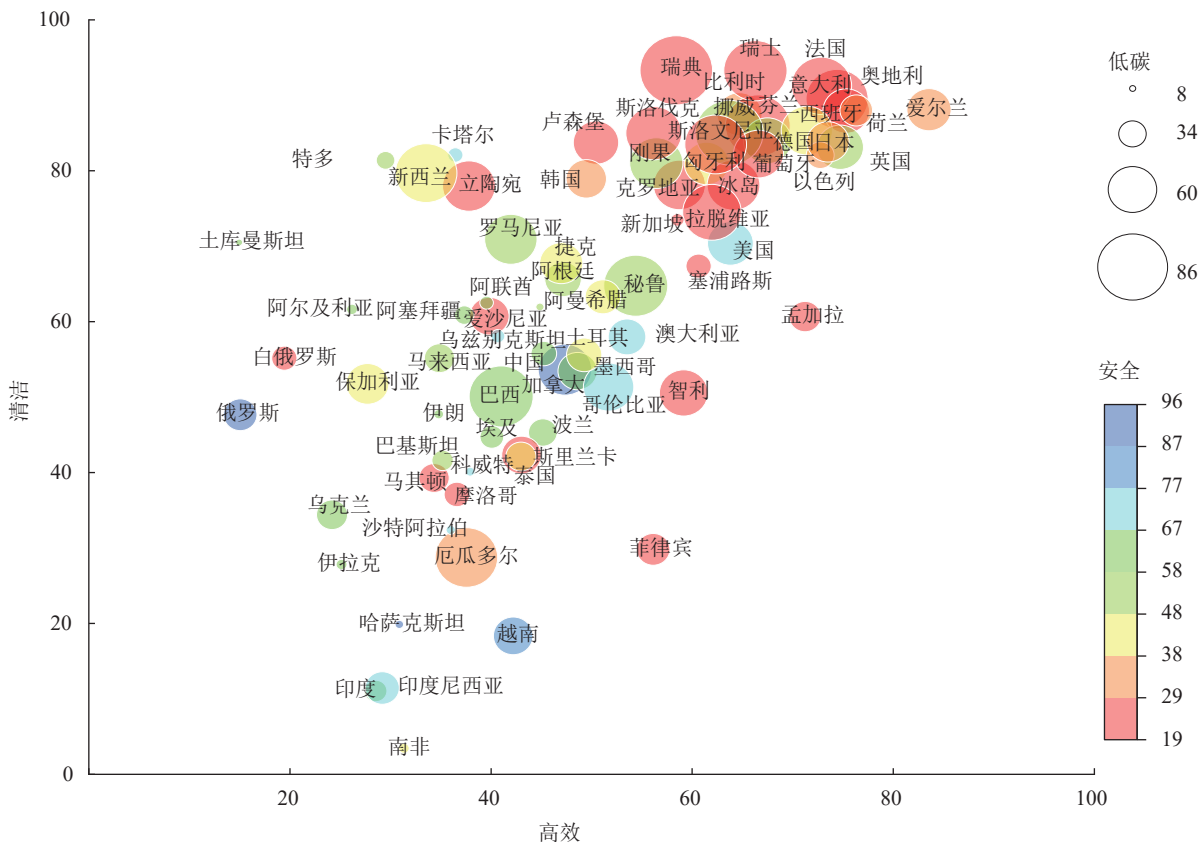


图 10 不同国家或地区4类能源指数特征(2020年)

Fig. 10 Characteristics of four types of energy indices in different countries or regions (2020)

由图10可见: 1) 清洁、低碳、高效指数之间往往都存在正向关系。清洁指数较高的国家, 其低碳指数也相对较高, 如瑞典、瑞士、挪威、澳大利亚等国家。清洁指数较高的国家, 其高效指数也相对较高, 如爱尔兰、荷兰、澳大利亚、法国等国家。低碳指数较高的国家, 其高效指数也相对较高, 如芬兰、瑞士、澳大利亚、法国等国家。2) 清洁、低碳、高效指数相对较高的国家, 其能源安全指数往往相对较低, 如冰岛、瑞士、澳大利亚等国家; 而能源安全指数相对较高的国家, 其清洁、低碳、高效指数往往相对较低, 如哈萨克斯坦、俄罗斯、越南等。主要原因可能为可再生能源具有间歇性、波动性以及不确定性特征, 难以保证能源的持续稳定供应以及可再生能源与经济社会的发展之间存在一定矛盾。在能源领域, 既要保证能源稳定供应, 又要保证价格低廉, 还要减少排放, 这3个目标难以同时实现, 称为“能源不可能三角”现象<sup>[43]</sup>。因此, 可再生能源发电必须保证“源网荷储”同步规

划, 既要解决可再生能源的消纳问题, 又要保障能源的持续稳定供应。并且需要充分利用可再生能源的低碳价值来降低成本, 积极发挥可再生能源优势。3) 综合指数较高的国家或地区, 往往是大部分发达国家或地区, 例如, 欧盟、美国、澳大利亚、日本等, 由此说明现代能源是支撑现代社会运行的关键核心之一。

## 4 结 论

基于“清洁、低碳、安全、高效”4个维度构建了现代能源指标体系, 定量评价建设清洁低碳、安全高效的能源体系的历史进程, 并进行国内外横向对比。

通过能源发展历史分析, 中国能源综合指数呈持续上升趋势, 2010—2020年年均增长率2.41%, 且2020年达到了世界平均水平。由此看出, 中国推动能源革命成效显著, 现代能源体系建设水平稳步提升, 在“清洁、低碳、安全、高效”等方面均取得不同程度的进步, 但近年来中国能源安全指数呈下降趋势而

CO<sub>2</sub>排放量不断增加,因此,要科学认识能源转型,立足中国基本国情和发展阶段,加快建立绿色多元的能源供应体系,保障能源持续稳定供应。长期以来,煤炭支撑中国经济和社会较快发展,是中国能源安全保障的压舱石和稳定器,要把能源安全始终放在首要位置。

总体来说,过去10余年中,中国在现代能源体系建设方面与发达国家的差距在逐步缩小。与此同时,全球的政治形势和科技水平正在发生显著变化,面对全球能源格局变化,中国以保障能源安全和社会经济发展需求为基本前提,提出“加快规划建设新型能源体系”,这是中国能源事业的新提法和新论断<sup>[44]</sup>。新型能源体系的内涵根据新时代、新发展的要求在现代能源体系上有变化,将更加适应时代的发展。

#### 参考文献:

- [1] Yan Xiaohui, Yang Qian, Gao Dan, et al. Development of clean and efficient coal transformation in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(6): 19–25. [严晓辉, 杨芊, 高丹, 等. 我国煤炭清洁高效转化发展研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(6): 19–25.]
- [2] Dai Houliang, Su Yinao, Liu Jizhen, et al. Thinking of China's energy development strategy under carbon neutrality goal[J]. *Oil Forum*, 2022, 41(1): 12–19. [戴厚良, 苏义脑, 刘吉臻, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略思考[J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(1): 12–19.]
- [3] Wang Guofa, Liu He, Wang Dandan, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(1): 23–37. [王国法, 刘合, 王丹丹, 等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(1): 23–37.]
- [4] 刘朝全, 姜学峰, 吴谋远. 2021年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- [5] 郑新业. 中国能源革命的缘起、目标与实现路径[R]. 北京: 国发院能源与资源战略研究中心, 2015.
- [6] Huang Sheng, Wang Jingyu, Guo Pei, et al. Short-term strategy and long-term prospect of energy structure optimization under carbon neutrality target[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(11): 5695–5708. [黄晟, 王静宇, 郭沛, 等. 碳中和目标下能源结构优化的近期策略与远期展望[J]. *化工进展*, 2022, 41(11): 5695–5708.]
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [8] 中国政府网. “十四五”我国单位GDP能耗降低13.5%——加快形成能源节约型社会[EB/OL]. (2021-08-10)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content\\_5630408.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content_5630408.htm).
- [9] Niu Na. Overview of the seminar on “building modern energy system and promoting carbon peak and carbon neutrality”[J]. *China Development*, 2022, 22(2): 26–30. [牛娜. “构建现代能源体系, 统筹推进碳达峰碳中和”研讨会综述[J]. *中国发展*, 2022, 22(2): 26–30.]
- [10] 中国政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要[EB/OL]. (2006-03-14)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_268766.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_268766.htm).
- [11] 中国政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-16)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/zhuanti/2011-03/16/content\\_2623428.htm](http://www.gov.cn/zhuanti/2011-03/16/content_2623428.htm).
- [12] 中国政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-03-17)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content\\_5054992.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm).
- [13] 中国政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [14] 国家发展改革委, 国家能源局. 《“十四五”现代能源体系规划》[EB/OL]. (2022-01-29)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content\\_5680759.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm).
- [15] 中国政府网. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content\\_5593154.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm).
- [16] 中国政府网. 国家能源局有关负责同志就《“十四五”现代能源体系规划》答记者问[EB/OL]. (2022-03-23)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/zhengce/2022-03/23/content\\_5680770.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2022-03/23/content_5680770.htm).
- [17] United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement[EB/OL]. (2015-12-12)[2022-03-29]. [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf).
- [18] 中国政府网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22)[2023-03-10]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546168.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm).
- [19] He Jingdong, Cao Daquan, Duan Xiaonan, et al. Give full play to national strategic S & T force to provide vigorous support for carbon peak and carbon neutrality goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 415–422. [何京东, 曹大泉, 段晓男, 等. 发挥国家战略科技力量作用, 为“双碳”目标提供有力科技支撑[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 415–422.]
- [20] Yuan Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(1): 11–22. [袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(1): 11–22.]
- [21] Revel D. BP Statistical review of world energy 2021[M]. London: BP Amoco, 2021.
- [22] International Energy Agency. Data and statistics[EB/OL].

- (2021-12-15)[2023-03-10].<https://www.iea.org/data-and-statistics>.
- [23] The World Bank. World Bank Open Data [EB/OL].(2021-07-04)[2023-03-10].<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.
- [24] European Commission. Emissions Database for Global Atmospheric Research[EB/OL].(2022-10-12)[2023-03-10].<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>.
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations. [EB/OL].(2020-08-12)[2023-03-10].<https://www.fao.org/statistics/zh/>.
- [26] The World Bank. Global Solar Atlas[EB/OL].(2021-07-04)[2023-03-10].<https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>.
- [27] The World Bank. Global Wind Atlas[EB/OL].(2021-07-04)[2023-03-10].<https://globalwindatlas.info/en/about/dataset>.
- [28] Qin Guangyu, Zhang Meijuan, Yan Qingyou, et al. Comprehensive evaluation of regional energy Internet using a fuzzy analytic hierarchy process based on cloud model: A case in China[J]. *Energy*, 2021, 228: 120569.
- [29] Ci Tiejun, Zhao Zhazhan, Ren Xingjian, et al. Comprehensive benefit evaluation of photovoltaic tile power generation system based on G1 sequence relation analysis[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2023, 39(6): 48–54. [慈铁军, 赵占占, 任行健, 等. 基于G1序关系分析法的光伏瓦片发电系统综合效益评价[J]. *电力科学与工程*, 2023, 39(6): 48–54.]
- [30] Wang Xuejun, Guo Yajun, Lan Tian. Rank correlation analysis of formation of consistent judgment matrix[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006, 27(1): 115–118. [王学军, 郭亚军, 兰天. 构造一致性判断矩阵的序关系分析法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(1): 115–118.]
- [31] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [32] Cui Zhikun, Wang Qingliang, Liu Jingqing, et al. Evaluation of the electricity markets index system based on fuzzy set theory and order relationship analysis[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation*.(2022-05-06)[2023-03-15].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220505.1815.002.html>. [崔志坤, 王清亮, 刘景青等. 基于模糊集理论和序关系分析法的电力市场指标体系研究[J/OL]. *电测与仪表*.(2022-05-06)[2023-03-15].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220505.1815.002.html>.]
- [33] 中国科学院青岛生物能源与过程研究所泛能源大数据与战略研究中心. 现代能源体系指数蓝皮书[R/OL]. 2022. [2023-03-15]<http://energy.qibebt.ac.cn/App/energyIndex/#/index>.
- [34] 任平. 能源的饭碗必须端在自己手里[N]. 人民日报, 2022-01-07(005).
- [35] 中国政府网. "十四五"我国单位GDP能耗降低13.5%——加快形成能源节约型社会[EB/OL].(2021-08-10)[2023-03-10].[http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content\\_5630408.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/10/content_5630408.htm).
- [36] 生态环境部. 中国生态环境统计年报[R]. 北京: 生态环境部, 2020.
- [37] 中国政府网. 国务院关于印发国家环境保护"十一五"规划的通知[EB/OL].(2007-11-26)[2023-03-10].[http://www.gov.cn/zwjk/2007-11/26/content\\_815498.htm](http://www.gov.cn/zwjk/2007-11/26/content_815498.htm).
- [38] 中国政府网. 国务院关于印发国家环境保护"十二五"规划的通知[EB/OL].(2011-11-20)[2023-03-10].[http://www.gov.cn/zwjk/2011-12/20/content\\_2024895.htm](http://www.gov.cn/zwjk/2011-12/20/content_2024895.htm).
- [39] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告2022[M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [40] 国家统计局. 中国统计年鉴2019(汉英对照附光盘)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [41] 中电联行业发展与环境资源部. 《中国电气化年度发展报告2021》[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2021.
- [42] 能源安全新战略研究院. 中国能源大数据报告(2022)[R]. 北京: 中能传媒研究院, 2022.
- [43] 全晓波. 能源革命存在“不可能三角”[N]. 中国能源报, 2015-02-16(2).
- [44] Zhan Chengfu. Deeply understand the great significance of the 20th Party Congress[J]. *Red Flag Manuscript*, 2022(20): 4–8. [詹成付. 深刻认识党的二十大的重大意义[J]. *红旗文稿*, 2022(20): 4–8.]

## Evaluation on the Construction Process of Modern Energy Systems in China

ZHU Guangyan<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Xiaomei<sup>1,2,3</sup>, YAN Xiaohui<sup>5</sup>, GAO Dan<sup>6</sup>, HUHE Taoli<sup>7</sup>,  
CHENG Wanjiang<sup>8</sup>, TIAN Yajun<sup>1,2,3\*</sup>, XIE Kechang<sup>1,2,3,9</sup>

(1. Extended Energy Big Data and Strategy Research Center, Qingdao Inst. of Bioenergy and Bioprocess Technol., Chinese Academy of Sci., Qingdao 266101, China; 2. Shandong Energy Inst., Qingdao 266101, China; 3. Qingdao New Energy Shandong Lab., Qingdao 266101, China; 4. School of Chemical Eng., Univ. of Chinese Academy of Sci., Beijing 100049, China; 5. Sci. and Technol. Dept., China Energy Investment Corp., Beijing 100013, China; 6. School of Energy, Power and Mechanical Eng., North China Electric Power Univ., Beijing 102206, China; 7. Inst. of Urban & Rural Mining Research, Changzhou Univ., Changzhou 213164, China; 8. Inst. of Quantitative & Technological Economics, Chinese Academy of Social Sci., Beijing 100732, China; 9. Chinese Academy of Eng., Beijing 100088, China)

**Abstract:** Objective: Accelerating the construction of modern energy systems plays an important role in building energy power, guaranteeing national energy security, helping to realize the goal of carbon peaking and carbon neutrality, and supporting the high-quality development of the eco-

nomy and society. However, there is no quantifiable methodology for assessing the effectiveness of the construction of modern energy systems. Carrying out quantitative research on the construction process of modern energy systems is of great significance for understanding the construction process of China's modern energy systems, providing quantitative guidance for the construction of the country's modern energy systems, and helping China's energy revolution, "dual-carbon" strategy, and even the construction of new energy systems. Methods: The study adopts a systematic analysis method to construct a modern energy systems evaluation index system with four dimensions, namely, clean, low-carbon, safe, and efficient, quantitatively assesses the historical progress of China's modern energy systems construction and conducts comparative analyses with 76 countries around the world, to locate the level of China's modern energy systems construction from different perspectives. Results and Discussion: In the past ten years, China's modern energy comprehensive index has shown a continuous upward trend, with an average annual growth rate of 2.41%, and reached the world average level in 2020, ranking 38th among 76 major economies in the world, indicating that China's efforts to promote the energy revolution have been effective, and the level of construction of the modern energy systems has been steadily improved. Further analysis shows that China's energy structure indicators, carbon emission series indicators, and energy intensity indicators are key indicators affecting the level of China's comprehensive index. China's efficiency index ranking (42nd) is significantly behind developed economies, from the point of view of specific high efficiency indicators, energy intensity is still high, mainly because the proportion of high energy-consuming industries is still too high, industrial structure adjustment is not yet in place, the level of technology is not enough energy-saving and efficient, coupled with a lot of waste, etc., indicating that there is a huge space for China's energy efficiency to improve, and on the other hand, it also indicates that more attention should be paid to scientific and technological inputs; China's safety index ranking (16th) is relatively advanced, proving that China's coal in the energy security of the "ballast" position, but for the same reason led to China's low carbon index is relatively backward (56th); Over the past decade, China has achieved remarkable results in the clean utilization of energy, but the overall ranking is low (48th). The clean and efficient utilization of coal still needs to be strengthened, the realization of the clean and efficient utilization of coal is energy clean, especially ultra-low emissions and economically viable carbon capture, utilization, and storage, which is the endpoint of the clean and efficient utilization of coal, China's clean development and utilization of energy is still a long way to go. Conclusions: In general, in the construction of modern energy systems, the gap between China and developed countries is gradually narrowing, but there are still some problems in the construction of China's modern energy systems. Therefore, the future to accelerate the construction of a modern energy system based on renewable energy, supplemented by fossil energy; Secondly, new energy and low-carbon technology to reach the volume is still time-consuming, for a long time, coal to support China's economic and social development faster, is China's energy security and guarantee the ballast and stabilizers, to energy security is always in the first place. Clean and efficient use of coal still needs to be strengthened, and the realization of clean and efficient use of coal is energy clean; finally, the key to energy transformation is to optimize the energy structure, to multi-energy complementation, integration of heat, electricity, gas, cold, and enhance the flexibility of thermal power units; in the end-consumption aspects of energy efficiency, reduce energy intensity, the implementation of electric energy substitution, and the formation of an energy consumption pattern centered on electricity. In the face of changes in the global energy pattern, our country to ensure energy security and economic and social development needs as the basic premise, put forward "accelerate the planning and construction of a new energy system", which is a new concept and new judgment of our energy industry. The connotation of the new energy system has changed according to the requirements of the new era and new development.

**Key words:** modern energy system index; clean; low-carbon; safe; efficient

(编辑 张凌之)

引用格式: Zhu Guangyan,Zhang Xiaomei,Yan Xiaohui,et al.Evaluation on the construction process of modern energy systems in china[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(1):206-217.[朱广岩,张小妹,严晓辉,等.中国现代能源体系建设进程评估[J].工程科学与技术,2024,56(1):206-217.]