

计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价

王永真^{1,2}, 朱轶林³, 康利改^{4*}, 高峰¹, 张靖¹

1. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京市 海淀区 100084;
2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京市 海淀区 100084;
3. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190;
4. 河北科技大学建筑工程学院, 河北省 石家庄市 050018)

Comprehensive Sustainability Evaluation of China's Power System Based on Emergy Analysis

WANG Yongzhen^{1,2}, ZHU Yilin³, KANG Ligai^{4*}, GAO Feng¹, ZHANG Jing¹

1. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Haidian District, Beijing 100084, China;
3. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Haidian District, Beijing 100190, China;
4. School of Civil Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei Province, China)

Abstract: The green development of the power energy systems is related to the sustainable development of economic activities. Therefore, a quantitative sustainability evaluation of a power energy system is the key task of the energy mix transition evaluation under the “carbon neutral”. In order to quantitatively analyze the energy, economic and environmental benefits of different power technologies, this study first adopted the emergy analysis theory to analyze the emergy sustainability index of the five power generation modes of photovoltaic power, wind power, hydropower, gas and coal power, and it was found that under the technical and economic level, wind power has the best emergy sustainability index. Second, comprehensively considering the three dimensional indicators of emergy sustainability index, power generation efficiency, and full life cycle cost, the comprehensive evaluation system of the sustainable development of China's power energy system was constructed based on the gray correlation analysis method, and China's power energy structure from 2020–2050 for coal-based to clean energy production were quantitatively analyzed. The emergy sustainability method proposed in this study

could provide a scientific reference for the quantitative research and determination of regional energy transition.

Keywords: emergy analysis; environmental load; sustainability; energy transition; generation mix

摘要: 电力能源系统的绿色发展关系经济活动的可持续发展, 因此, 电力能源系统的定量可持续性评价是“碳中和”目标下能源结构转型评价的关键工作。为定量统一分析不同发电技术的能量、经济及环境效益, 首先采用能值分析理论对光伏、风电、水电、燃气及燃煤5种发电模式的能值可持续指数进行分析, 发现现有技术经济水平下风电的能值可持续指数最优。其次, 综合考虑能值可持续指数、发电效率、全生命周期成本3个维度指标, 基于灰色关联分析法构建了计及能值的中国电力能源系统可持续性综合评价体系, 量化分析了2020—2050年中国电力结构由以煤炭为主转向以清洁能源风光为主的可持续性。所提的能值可持续性评价方法, 能够为区域能源转型的量化研判提供参考。

关键词: 能值分析; 环境负载; 可持续性; 能源转型; 电源结构

0 引言

当前, 以可再生能源的大规模开发利用和全社会综合能效优化提升为抓手的能源互联网、综合智慧能源等能源战略新技术与新业态齐兴错出, 为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系做出积极实践^[1-2]。但

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52006114); 中国博士后科学基金课题(2019M660634); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA081)。

National Natural Science Foundation of China(52006114); China Postdoctoral Science Foundation Project(2019M660634); Major Projects of National Social Science Foundation (19ZDA081).

上述目标的实现绕不开能源、经济、环境的多目标均衡发展,且随着中国“碳中和”目标的提出,新技术新业态下能源系统转型的定量可持续性评价将成为能源转型研究的一个关键问题。

一般而言,风、光等可再生能源发电过程对环境的影响较小,即环境可持续性好。但是,可再生能源的大规模发展也至少面临两方面问题:一方面,可再生能源发电系统中各主要生产设备的生产制造涉及传统能源的消耗及人力的投入,会间接对生态环境产生影响;另一方面,可再生能源的发展也离不开传统能源的托底,以平衡、抵消或中和可再生能源的间歇性和波动性。进而,难以简单地从单一的能量、成本或者环境维度指标去规划或研判融合高比例可再生能源的能源系统的结构及流程。

因此,有学者针对不同边界尺度的能源系统,提出采用层次分析、SWOT以及熵权法的多层次、多维度方法进行综合评价,并覆盖了能源效率、经济成本、环境排放等维度指标^[3-6]。但是,目前电力能源系统的量化可持续性评价鲜有研究,主要原因是很难找到缕清耦合不同发电方式能源系统的环境生态耦合效益模型及指标^[7]。而源于生态学分析的能值分析法(emergy analysis),可以追溯到产品或服务的开始和起源,并关注其对生态系统的最终影响。如文献[8]基于能值分析法分析了工业园区的环境绩效和可持续性;文献[9]运用能值分析法,从能值的5个方面对中国沿海11个省市的生态经济运行状况进行对比研究,对沿海地区可持续发展提出了建设性建议。

受能值分析法在生态系统可持续性评价及应用上的启发,有学者开始将能值分析法用于能源系统的评价,如文献[10-11]采用能值分析法对木薯燃料乙醇生产系统的可持续性进行了分析;文献[12]针对火电厂提出改进的能值评价指标,并对比分析新旧两种优化方案的能值合理性;文献[13]基于能值分析法,建立了园区综合能源系统的能值评估方法,克服了市场经济价值方法的局限性;文献[14-15]采用能值分析法和全生命周期法对余热驱动的有机朗肯发电系统进行了可持续性评价。但是,有关能值方法对耦合不同发电技术的宏观能源系统的定量可持续性研究鲜有报道。

电力能源系统可持续性的量化评价,对国家及城市社会系统的能源转型具有关键指导作用,但能源系统的可持续性评价与能源资源禀赋、能源转化效率、能源设备投资及劳动力投入高度耦合。因此,本文基于能值分析理论建立了风力发电、光伏发电、燃煤发

电、燃气发电和水力发电的可持续性综合评价体系,并对中国未来能源结构进行计及能值的能量、经济及环境可持续性综合评价。

1 计及能值的电力能源系统综合评估方法

1.1 能值分析基本原理及能值可持续指数概述

能值理论提出,地球上除了深层地热外,几乎所有能量均可归于太阳能。因此,能值理论认为,能量或物质具有的太阳能能值就是其在形成过程中通过各种形式使用到的太阳能总量,其单位是“太阳能焦耳”(solar emjoules, sej)。进而可以能值为单位,衡量其他所有等级、种类的能量,即可以统一发电系统全生命周期过程中本址内外能源燃料的输入、能源设备资产投入、建设及运维劳力的投入等。具体操作上,能值分析通过能值转换率(transformivity, 每单位物质或能量所具有的能值)实现对各种物质及能量的种类和数量的转换^[16]。如图1所示,根据不同发电方式的特点,运用能值分析理论,绘制出能值流程图。能源系统的输入能值包括本地可再生能源的能值 R 、社会经济投入的能值 F (包含运维、人力、资产三部分)、投入的不可再生能源的能值 N ,如式(1)所示,能源系统产出的能源产品的能值 Y 满足

$$Y = R + N + F \quad (1)$$

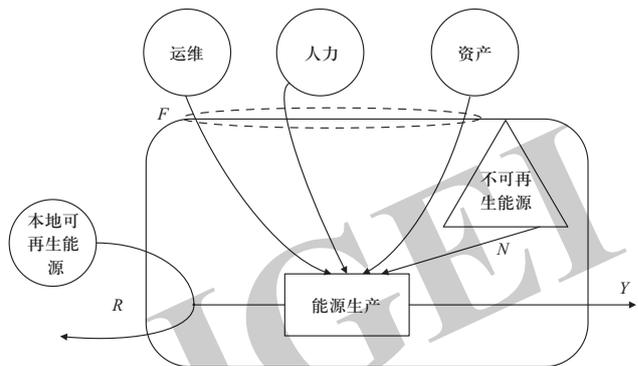


图1 系统能值分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system emergy analysis

能值分析中的能值转换率是指形成每单位某种能量或物质过程中直接或间接消耗的太阳能总量,其测算方法为单位物质所具有的太阳能除以其包含的能量,以太阳能焦耳/焦耳为单位,记作sej/J。实际上,生态经济系统的能值流总是从总量多向总量少的能量流动、从能质低向能质高的能量等级转化,相对应的转换率同步提高^[17]。

而能值可持续指数 (emergy sustainability index, ESI) 常被用来反映国家、地区或研究对象的生产效率和环境压力, 是研究对象完整运行周期内能值产出率与环境负荷率的比值, 如式 (2) 所示。

$$E_{SI} = E_{YR} / E_{LR} \quad (2)$$

式中: E_{LR} 为环境负载率 (environmental loading ratio), 是系统不可再生能源投入能值与可再生能源投入能值之比 (如式 (3) 所示), 其为衡量生产活动对环境的压力指标, 该指标值越大, 则环境压力越大; E_{YR} 为能值产出率 (emergy yield ratio), 是产出能值与经济输入能值之比 (如式 (4) 所示), 经济输入能值来源包括燃料、各种生产资料及劳务, 能值产出率值越高表明相同的系统经济能值投入所生产出来的产品能值越高, 即生产效率越高。

$$E_{LR} = (F + N) / R \quad (3)$$

$$E_{YR} = Y / F \quad (4)$$

1.2 计及能值的不同发电技术综合评价体系

能值可持续指数可评价研究对象的环境可持续发展程度, 为更全面、系统地考虑不同发电技术的综合性能, 在考虑不同发电技术的发电效率、全生命周期成本的基础上, 本文采用灰色关联分析法, 构建了计及能值可持续指数的能源系统能源环境、技术效率以及经济成本的综合评价体系, 用于融合不同类型发电系统的中国电力能源系统可持续发展程度综合评价, 如图2所示。

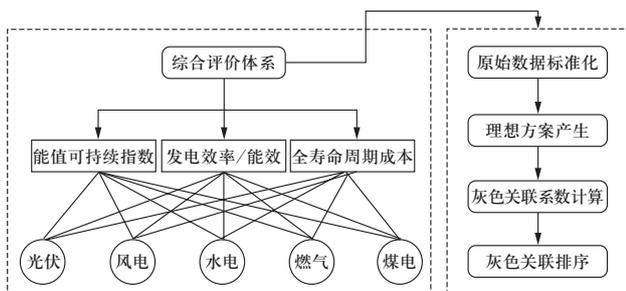


图2 计及能值的不同电力系统综合评价体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation system of different power systems based on emergy

综合评价的具体步骤如下。

1) 数据标准化。为进行能值可持续指数、发电效率以及全生命周期成本的不同量纲指标的比较, 需要对原始数据进行无量纲标准化处理, 即求解不同指标数值对应的隶属度。对于数值越大越优的递增型指标, 其隶属度按照式 (5) 计算; 反之, 按照式 (6) 计算。

$$x_i(k) = \frac{X_i(K) - \min X_i(K)}{\max X_i(K) - \min X_i(K)} \quad (5)$$

$$x_i(k) = \frac{\max X_i(K) - X_i(K)}{\max X_i(K) - \min X_i(K)} \quad (6)$$

式中: $X_i(K)$ 表示原始评价指标值; $\max X_i(K)$ 表示各方案同一指标中数值的最大值; $\min X_i(K)$ 表示各方案同一指标中数值的最小值; $x_i(k)$ 表示经标准化处理的无量纲值; i 表示运行方案号; k 、 K 表示性能指标号。

2) 产生理想方案。在各个备选系统中选择各指标的最佳数值, 对于递增型指标, 应选择最大的值, 即越大越好; 相反, 对于递减型指标, 应选择最小的值, 即越小越好。本文计算时记为 $x_0(k)$ 。

3) 计算灰色关联系数。按照式 (7) 和 (8) 计算每个指标下各方案的灰色关联系数, 灰色关联系数能反映出相应指标下各方案与理想方案的“距离”, 灰色关联系数越大, 则与最优指标距离越小, 即越接近“最优”。

$$n(k) = \frac{\Delta x_i(k)_{\min} + p \times \Delta x_i(k)_{\max}}{\Delta x_i(k) + p \times \Delta x_i(k)_{\max}} \quad (7)$$

$$\Delta x_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (8)$$

式中: p 为分辨系数, 本文取 $p=0.5$ 。

4) 灰色关联排序。据式 (9) 和 (10), 对各方案进行综合评价分析, 可得到各方案综合性能的灰色关联系数 R 排序。

$$R(X_0, X_i) = \sum_{j=1}^k w_j r(x_{0j}, x_{ij}) \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (10)$$

式中: w_j 为不同属性指标的权重, 即各指标对方案综合性能的影响重要程度, 由决策者根据意愿和经验给定。在传统的灰色关联分析方法中, 通常把各指标的权重均衡对待, 即各个指标权重相等。

2 不同发电方式案例分析

2.1 案例参数选择

基于中国电力系统的主要电源结构及发展趋势, 本文选取具有代表性的光伏、风电、水电、燃气以及燃煤等5种发电技术作为研究对象。其中, 风力发电选取由1.5 MW风机组成的48 MW风电场为研究对象, 并设风电场轮毂高度处年平均风速为5.59 m/s, 风电场

容量系数为19.69%^[18]；光伏发电以某5 MW光伏发电机组为对象^[19]，晶片面积为77.36 cm²；燃煤发电以超临界600 MW燃煤发电机组为研究对象，煤耗量为200.15 t/h；燃气发电以600 MW燃气发电机组为研究对象，厂用电率为5.05%^[20]；水力发电以装机容量为85 MW的水电站为研究对象^[21-22]。

在不同发电模式下，依据中国的电力系统能源结构绘制能值分析图，如图3所示。依据能值计算规则，计算得到表A1所示的能值表。其中，为方便5种发电模式横向比较，系统产出的能源产品的能值 Y 设为电能 10^8 kWh。同时，考虑当前主流的燃煤及燃气发电模式下均有一定的副产物，即燃煤采用基于脱硫石膏利用技术的发电模式，燃气采用冷热电联产的发电模式。光伏发电能值=用地面积×太阳年平均辐射能；风力发电能值=用地面积×空气层高度×空气密度×涡旋扩散系数×风速梯度变化率×太阳能值转化率。最后，由于本文中的5个系统建立在同一时空下，可认为同一种能量流的能值转化率相同。

2.2 不同发电技术的能值可持续性评价

图4给出了5种发电系统能值评价的大小对比。可以看出，一方面，就环境负载率而言，燃煤、燃气等化石能源发电模式的环境负载率远高于风电、光伏、水电等可再生能源。可再生能源系统的环境负载率均小于1，而化石能源的环境负载率很高，燃气发电的

环境负载率高达11.79，煤电次之，为10.36。化石能源环境负载率的均值约为可再生能源的40倍，是由于化石能源发电模式运行阶段消耗了大量的不可再生能源，增加了不可再生能源的能值。

另一方面，就能值产出率而言，水电的能值产出率最高，达到7.68，反映在其较高的生产效率，主要原因是在相同的电能产出下，其社会经济投入的能值 F 相对最小。风电次之，为7.44，而燃煤的能值产出率最低，为5.48。化石能源的能值产出率与新能源相差不多，主要原因是化石能源发电通过联供或者增加副产物的方式提高了生产效率。光伏由于其发电效率较低，需要的社会经济投入的能值较高，能值产出率低于风电。

能值可持续指数与能值产出率成正比，与环境负载率成反比，即一个系统的能值产出率高而环境负载率低，则该系统的可持续发展水平较高。如图4所示，5种发电模式中，光伏、风电、水电等可再生能源的能值可持续指数远高于燃气、燃煤等化石能源发电的能值可持续指数，其均值约为化石能源发电模式均值的56倍。风电的能值可持续指数最高，达到47.93；煤电的能值可持续指数最低，仅为0.53。相比于燃气、燃煤等传统化石能源发电，风电基本不需要消耗不可再生能源；相较于水电，风电前期投资成本低；相较于光伏发电，风电的转化效率高，因而风电的可持续指数最高。

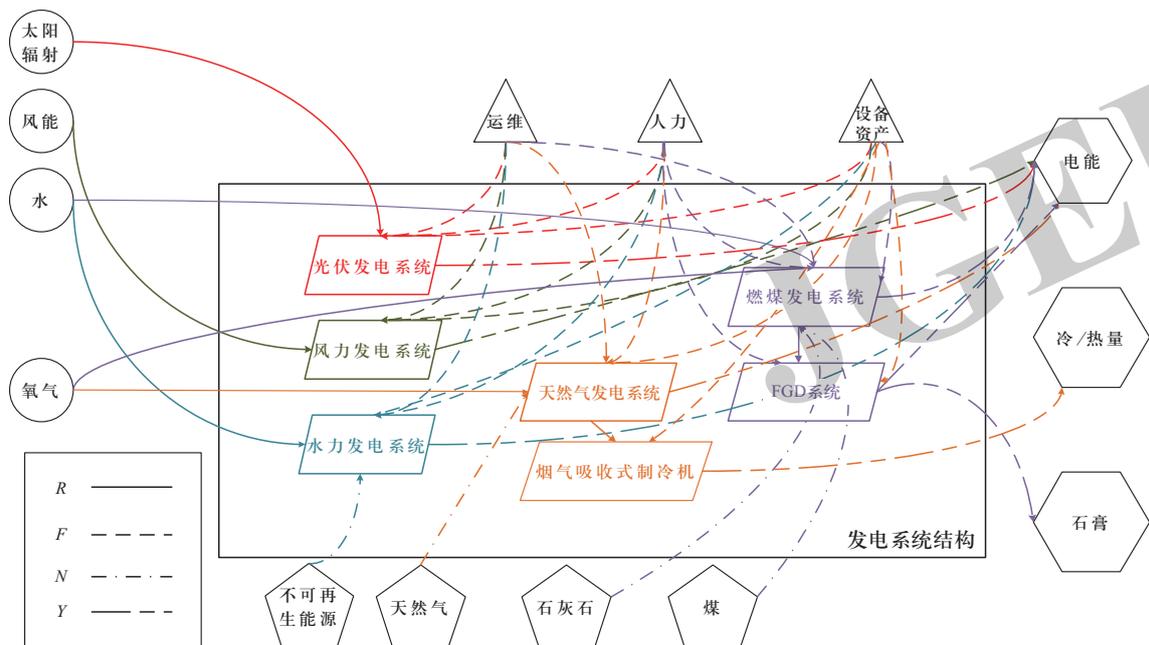


图3 不同发电系统能值图

Fig. 3 Emery diagram of different power generation systems

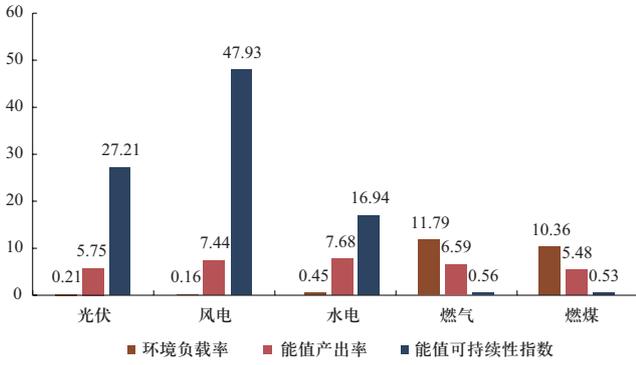


图 4 系统能值评价指标计算结果

Fig. 4 Calculation results of system energy evaluation index

本文的参数是基于个案以及现有技术发展水平的，为更好辨识未来风电和光伏在能值可持续性方面的优劣，图5给出了风电与光伏在环境负载率方面的敏感性分析， f/F 为改变后光伏发电的经济投入 f 与当前光伏发电的经济投入 F 的比值。在其他条件不变时，

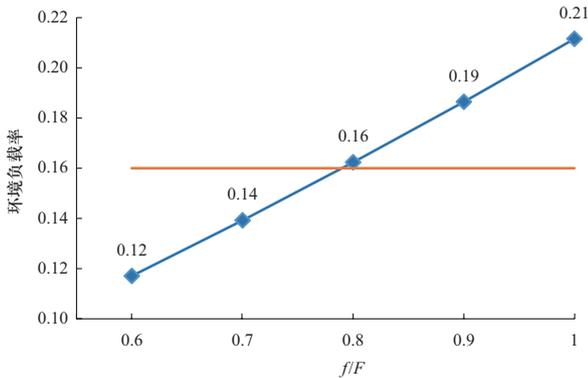


图 5 光伏的环境负载率敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of photovoltaic environmental loading ratio

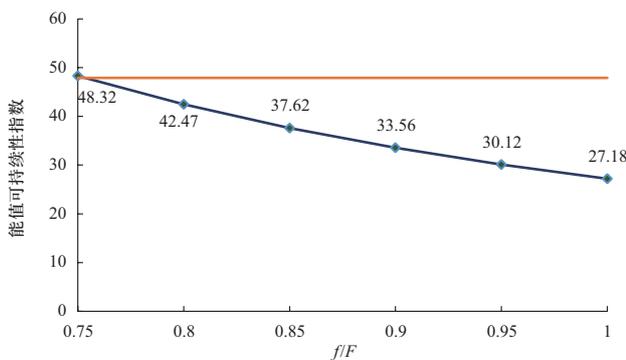


图 6 光伏的能值可持续性指数敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of photovoltaic energy sustainability index

当光伏发电的社会经济投入降低为当前的77.2%，即 9.09×10^{17} sej，光伏发电的环境负载率与风电相当，即0.16。同理，图6给出了风电与光伏在能值可持续指数方面的敏感性分析。其他条件不变时，当光伏发电的社会经济投入降低为当前的75.3%，即 8.67×10^{17} sej，光伏发电的能值可持续指数与风电的相当，即47.93。

2.3 计及能值的不同发电技术综合评价

图7给出了5种发电方式的发电效率、全生命周期发电成本以及能值可持续指数的对比，因3种指标的单位不同，以每种指标的最大值为基准进行标么化处理。其中，光伏以功率为275 W的60片单晶硅光伏组件为研究对象，效率值取16.9%^[23]；风电的效率由风力发电机叶片效率、发电机效率及控制逆变器转化效率3部分组成，取系统总效率为22%^[24]；水力发电效率由水轮机效率及发电机效率组成，系统总效率为88%；燃气发电选用燃气-蒸汽联合循环方式，平均效率设为45%^[25]；燃煤发电效率一般为40%左右，本文选取泰州电厂二期工程建设的2台百万kW超超临界二次再热燃煤发电机组，设计发电效率47.92%^[26]。另外，不同发电技术的全生命周期成本包括产品设计成本、制造成本、采购成本、使用成本、维修保养成本、废弃处置成本等^[27-28]，本文选取的是每年评估各类能源发电的全生命周期平准化成本^[29]。

由图7可以看出，风电的能值可持续指数最优，且新能源发电方式的能值可持续指数明显优于化石能源发电方式。而在2种传统评价指标中，水力发电效率最高，燃气发电的全生命周期成本最低。不同发电方式在3种指标下各有优劣，难以从单一维度选取最优的发电方式，需要进行综合评价。

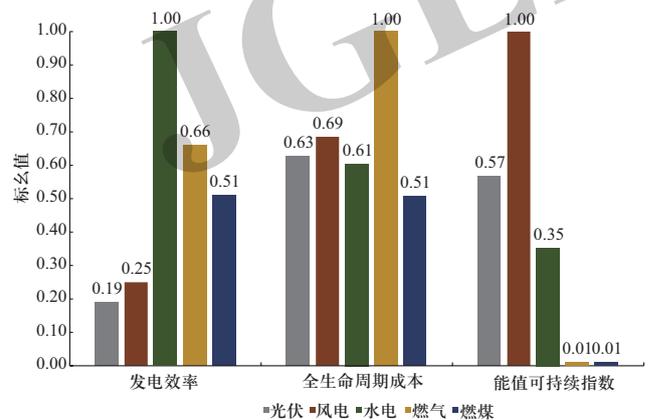


图 7 2020年不同发电方式的评价结果

Fig. 7 Evaluation results of different power generation methods in 2020

图8给出了不同权重分配下的发电技术灰色关联分析结果。可以看出,当发电效率、经济成本、能值可持续指数的权重分配为(0.33, 0.33, 0.33)时,得益于水电在能值可持续指数以及发电效率方面的优势,水力发电的综合评估结果最大,为1.0,综合性能最好,燃煤的综合评估结果最差,仅为0.52;当发电效率、经济成本、能值可持续指数的权重分配为(0.10, 0.30, 0.60)时,得益于风电在能值可持续指数方面的优势,风电的综合评估结果最大,为1.0,综合性能最好,燃煤的最差,仅为0.25;当发电效率、经济成本、能值可持续指数的权重分配为(0.20, 0.60, 0.20)时,得益于燃气在经济成本方面的优势,燃气发电的综合评估结果最大,为1.0,综合性能最好,燃煤的最差,仅为0.55。不难看出,在能源、经济、环境的三角博弈中,中国能源结构转型的趋势也将逐步突出发电技术在环境可持续以及碳中和方面的重要性,将通过技术创新与商业模式创新,不断提升可再生能源发电效率、降低度电成本,进而快速提高能源结构中可再生能源电力的比例。

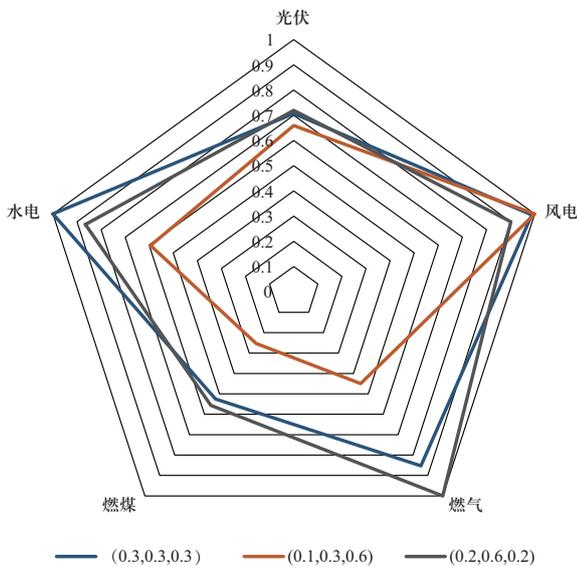


图8 不同发电模式的综合评价结果

Fig. 8 Evaluation results of different power generation modes

3 基于能值分析的中国电力能源系统可持续发展预测

图9和图10给出了计及能值可持续指数的2020—2050年中国能源电力系统的综合评价。其中,综合评价所需的中国能源电力发展规划来源于《全球能源分析与展望》^[30]及《中国能源大数据报告(2020)》。需

要说明的是,考虑到石油、核能、生物质及其他发电模式占比相对较小,图9和图10的综合评价计算过程中忽略了这部分电源,同时将2050年作为理想年进行度量。

据《中国能源大数据报告(2020)》,按2℃升温情景预测,2020年煤电装机占56.2%,风、光装机共占19.5%。到2050年,煤电装机仅占13.4%,风、光装机共占62.2%。由图9电力能源系统的能值可持续性评价可以看出,2020—2050年,中国电力能源系统的可持续指数将从0.178 2增长为1.00。图10取能值可持续指数、发电效率、经济成本的权重分配为(0.33, 0.33, 0.33),结果表明中国电力能源系统的综合发展指数从0.378 1增加到1.00。可见,电力结构从以煤炭为主向以清洁能源为主的多元化转变,将带来电力能源系统的健康可持续发展。

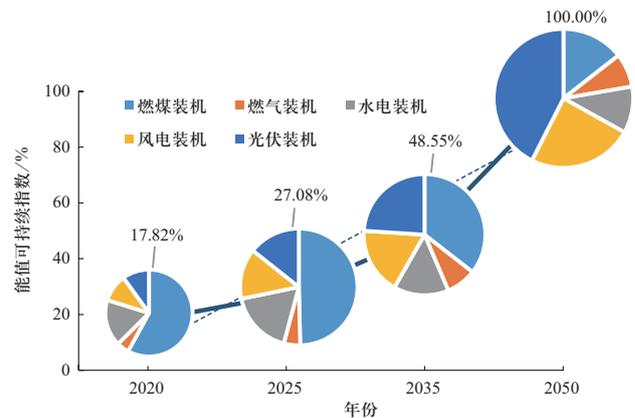


图9 2020—2050年能值可持续指数计算结果

Fig. 9 Energy sustainability index for 2020-2050

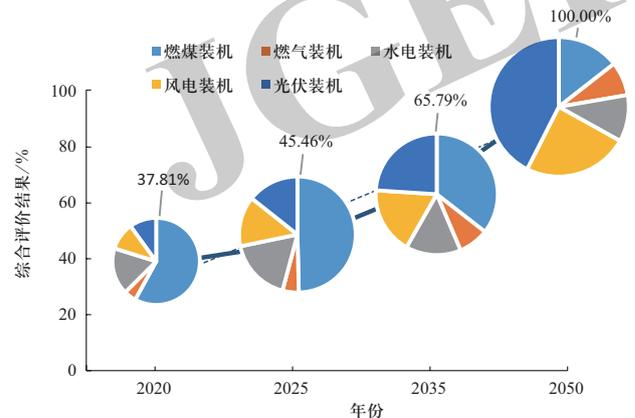


图10 2020—2050中国电力能源系统的综合评价结果

Fig. 10 China's power system comprehensive evaluation indicators for 2020-2050

4 结论

本文基于能值理论，建立了发电效率、全生命周期发电成本及能值可持续指数3个维度的综合评价体系，是对宏观电力能源系统可持续性量化分析的一种尝试。首先对光伏、风电、水电、燃气及燃煤5种发电模式的能值可持续指数进行了分析，发现现有技术经济水平下，风电的能值可持续指数最优。其次，基于能值分析的中国电力能源系统可持续发展综合评价表明，2020—2050年，中国电力能源的综合评估结果从0.378 1增加到1.00，表明可再生能源的发展将促使中国

电力能源系统表现出较高的可持续发展力。本文所提出的基于能值分析的电力能源系统可持续性评估方法，可用于不同尺度能源系统规划的前评估和后评估。

本文对不同发电模式的评价均是在特定技术经济背景下进行的，能值基准选取具有一定的不确定性，但同一时空下横向对比的总体结论不会变化，必要时应进行适当的敏感性分析。同时，本文所提电力能源系统的能值可持续性评价是一个简化模型，后期还应基于特定的时空边界，对不同电力能源系统的耦合及互补关系，即多输入和多输出能源系统中的能值分摊关系进行细化研究。

附录A 发电系统能值表

表A1 5种发电系统能值表

Table A1 Emergy table of 5 different power generation systems

发电形式	符号	名称	数值	单位	能值转换率 ^[14]	能值/sej
光伏发电	R_s	太阳辐射	5.44×10^{12}	MJ	1.00×10^6	5.44×10^{18}
	N_s	不可再生能源投入	0	—	—	0
	F_{s1}	光伏发电设备资产	1.87×10^2	万元	4.33×10^{15}	3.06×10^{16}
	F_{s2}	运维	5.11×10	万元	4.33×10^{15}	9.99×10^{17}
	F_{s3}	人力	3.51×10	万元	4.33×10^{15}	1.52×10^{17}
	Y_s	产出电能	3.60×10^8	MJ	1.84×10^{10}	6.62×10^{18}
风力发电	R_w	风能	9.74×10^{10}	MJ	5.89×10^7	5.74×10^{18}
	N_w	不可再生能源投入	0	—	—	0
	F_{w1}	风力发电设备资产	1.21×10^2	万元	4.33×10^{15}	5.22×10^{17}
	F_{w2}	运维	1.77×10	万元	4.33×10^{15}	7.64×10^{16}
	F_{w3}	人力	6.75×10	万元	4.33×10^{15}	2.92×10^{17}
	Y_w	产出电能	3.60×10^8	MJ	1.84×10^{10}	6.62×10^{18}
水力发电	R_h	水	1.33×10^7	m^3	3.43×10^{11}	4.56×10^{18}
	N_h	不可再生能源投入	2.76×10^2	万元	4.33×10^{15}	1.2×10^{18}
	F_{h1}	水力发电设备资产	1.17×10^2	万元	4.33×10^{15}	5.05×10^{17}
	F_{h2}	运维	1.71×10	万元	4.33×10^{15}	7.41×10^{16}
	F_{h3}	人力	6.54×10	万元	4.33×10^{15}	2.83×10^{17}
	Y_h	产出电能	3.60×10^8	MJ	1.84×10^{10}	6.62×10^{18}
冷热电联供燃气发电	R_g	氧气	1.43×10^7	kg	5.16×10^{10}	7.37×10^{17}
	N_g	天然气	9.39×10^{10}	MJ	7.73×10^7	7.26×10^{18}
	F_{g1}	天然气发电设备资产	1.28×10^2	万元	4.33×10^{15}	3.81×10^{17}
	F_{g2}	烟气吸收式制冷机资产	1.54×10^2	万元	4.33×10^{15}	4.11×10^{17}
	F_{g3}	运维	1.38×10	万元	4.33×10^{15}	4.49×10^{17}
	F_{g4}	人力	4.40×10	万元	4.33×10^{15}	1.90×10^{17}
	Y_{g1}	产出电能	3.60×10^8	MJ	1.84×10	6.62×10^{18}
	Y_{g2}	冷/热量	1.42×10^8	MJ	1.97×10	2.81×10^{18}

续表

	符号	名称	数值	单位	能值转换率 ^[13]	能值/sej
基于脱硫石膏 利用技术的燃 煤发电 ^[31]	R_{c1}	氧气	5.15×10^8	g/a	5.16×10^7	2.66×10^{16}
	R_{c2}	水	9.73×10^{11}	g/a	6.64×10^5	6.46×10^{17}
	N_{c1}	煤	1.36×10^{11}	g/a	6.69×10^4	9.09×10^{15}
	N_{c2}	石灰石	1.53×10^9	g/a	3.63×10^9	5.57×10^{18}
	F_{c1}	发电建设投资	1.01×10^2	万元	4.33×10^{15}	2.18×10^{15}
	F_{c2}	FGD系统建设投资	2.08×10^2	万元	4.33×10^{15}	1.33×10^{18}
	F_{c3}	运维	9.45	万元	4.33×10^{15}	4.09×10^{16}
	F_{c4}	人力	4.05	万元	4.33×10^{15}	1.75×10^{16}
	Y_{c1}	产出电能	3.60×10^8	MJ	1.84×10^{10}	6.62×10^{18}
	Y_{c2}	脱硫石膏	1.02×10^9	g/a	1.00×10^9	1.02×10^{18}

参考文献

- [1] 王永真. 能源互联网下综合能源服务的新特征、新挑战[J]. 能源, 2020(6): 64-66.
- [2] 王盛, 丁一. 考虑多能互补和负荷不确定性的区域综合能源系统优化定容与资产利用效率分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 426-432.
WANG Sheng, DING Yi. Optimal sizing and asset utilization efficiency analysis of a distributed multi-energy system considering energy substitution and load uncertainty[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 426-432(in Chinese).
- [3] 李顺昕, 高峰, 张靖, 等. 城市能源战略发展指标评价体系研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 117-124.
LI Shunxin, GAO Feng, ZHANG Jing, et al. Study on urban energy strategy development index evaluation system[J]. Engineering Science, 2018, 20(3): 117-124(in Chinese).
- [4] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708(in Chinese).
- [5] 谭雪, 刘俊, 郑宽, 等. 新一轮能源革命下中国电网发展趋势和定位分析[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 49-55.
TAN Xue, LIU Jun, ZHENG Kuan, et al. Research on tendency and positioning of power grid development in the new round energy revolution[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 49-55(in Chinese).
- [6] 赵一冰, 蔡闻佳, 丛建辉, 等. 低碳战略下供给侧减缓技术的综合成本效益分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 319-327.
ZHAO Yibing, CAI Wenjia, CONG Jianhui, et al. Comprehensive cost-benefit evaluation of supply side mitigation technologies for low-carbon strategy [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 319-327(in Chinese).
- [7] JALILI M, CHITSAZ A, HASHEMIAN M, et al. Economic and environmental assessment using emergy of a geothermal power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113666.
- [8] GENG Y, ZHANG P, ULGIATI S, et al. Emergy analysis of an industrial park: The case of Dalian, China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5273-5283.
- [9] 高乐华, 高强. 中国沿海地区生态经济系统能值分析及可持续评价[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(8): 86-93.
- [10] LU H F, XU F Y, LIU H X, et al. Emergy-based analysis of the energy security of China[J]. Energy, 2019, 181: 123-135.
- [11] YANG H, CHEN L, YAN Z C, et al. Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(1): 581-589.
- [12] 王灵梅, 张金屯. 火电厂生态工业园的能值评估[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1047-1050.
WANG Lingmei, ZHANG Jintun. Emergy evaluation of power plant eco-industrial park[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1047-1050(in Chinese).
- [13] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2925-2934.
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Multi-energy system valuation method based on emergy analysis[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2925-2934(in Chinese).
- [14] ZHANG H L, GUAN X, DING Y, et al. Emergy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 1207-1215.
- [15] REN S Y, FENG X, YANG M B. Emergy evaluation of power generation systems[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211: 112749.
- [16] 李瑞平. 中国建筑业生态经济系统能值分析[D]. 南昌: 南昌

- 航空大学, 2016.
- [17] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 3-6, 32-44.
- [18] 李经宽, 王灵梅, 李瑞泽, 等. 基于能值分析法的风电场可持续性发展研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3): 105-109.
- LI Jingkuan, WANG Lingmei, LI Ruize, et al. Study on sustainable development of wind farm based on energy synthesis[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(3): 105-109(in Chinese).
- [19] PAOLI C, VASSALLO P, FABIANO M. Solar power: an approach to transformity evaluation[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(3): 191-206.
- [20] BROWN M T, ULGIATI S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 321-334.
- [21] CUI B S, HU B, ZHAI H J. Employing three ratio indices for ecological effect assessment of Manwan Dam construction in the Lancang River, China[J]. River Research and Applications, 2011, 27(8): 1000-1022.
- [22] 贺成龙. 水力发电的能值转换率计算方法[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1958-1968.
- HE Chenglong. Transformity calculation method of hydropower[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1958-1968(in Chinese).
- [23] 张弘鹏, 刘家庆, 段志伟, 等. 基于改进云分段模型的光伏功率缺失数据补齐研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(12): 1590-1596.
- ZHANG Hongpeng, LIU Jiaqing, DUAN Zhiwei, et al. Research on photovoltaic power missing data completion based on improved cloud segmentation model[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(12): 1590-1596(in Chinese).
- [24] WESCHENFELDER F, DE NOVAES PIRES LEITE G, ARAÚJO DA COSTA A C, et al. A review on the complementarity between grid-connected solar and wind power systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120617.
- [25] 李嘉鹏. 发电燃气轮机效率的分析及提高措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(6): 13-14.
- [26] 李平姣. 超临界二氧化碳循环燃煤流化床锅炉的构型研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [27] 刘姣姣. 不同能源类型发电利用状况评价及政策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [28] 张力波, 葛禄璐, 陈昌奇, 等. 电价补贴退坡趋势下户用光伏发展演化的仿真研究[J/OL]. 系统仿真学报. (2020-04-30)[2020-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20200430.1221.004.html>.
- ZHANG Libo, GE Lulu, CHEN Changqi, et al. A simulation on the development of residential distributed photovoltaic power generation under the declining trend of feed-in-tariff[J/OL]. Journal of System Simulation. (2020-04-30)[2020-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20200430.1221.004.html>.
- [29] 王火根, 王可奕. 基于生命周期评价的生物质与煤炭发电综合成本核算[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 56-61.
- WANG Huogen, WANG Keyi. Comparative study on comprehensive benefits of biomass and coal power generation project[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 56-61(in Chinese).
- [30] 侯方心, 张士宁, 赵子健, 等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 34-43.
- HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global energy interconnection scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 34-43(in Chinese).
- [31] 李涛, 宋沂邈. 基于能值分析的环境管制背景下中国燃煤发电环境可持续性评价[J]. 生态经济, 2020, 36(6): 188-195.
- LI Tao, SONG Yimiao. Environmental sustainability assessment of coal-fired power generation in China under environmental regulation based on emergy analysis[J]. Ecological Economy, 2020, 36(6): 188-195(in Chinese).

收稿日期: 2020-10-17; 修回日期: 2020-12-18.

作者简介:



王永真

王永真(1988), 男, 博士后, 主要从事能源互联网与能源战略、中低品位多能互补综合能源系统建模及优化的研究工作, E-mail: wyz80hou@mail.tsinghua.edu.cn.

康利改(1983), 女, 博士, 副教授, 主要从事综合能源系统多目标优化、区域能源系统及建筑环境的研究。通信作者, E-mail: ligaikang@hebust.edu.cn.

(责任编辑 李锡)