

基于“双碳”目标的电力供需预警与碳排放预警研究

李文琦

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月12日

摘要

为响应新型电力系统对低碳电力需求的号召, 在传统单一电力供需预警的基础上, 应展开对碳排放和电力的双重预警, 及时反映碳排放的超标以及电力供需失衡的状态。基于上述背景, 本文提出一种电力供需预警与碳排放预警的研究方法, 首先根据电力供需预警的基本理论, 结合新时代背景下对电力系统低碳化的迫切要求, 建立基于“双碳”目标的电力供需预警与碳排放预警指标体系, 包括电力供需预警指标和碳排放预警指标, 然后以某地区电力和碳排放相关数据进行算例分析, 选择模态分解预测算法对电力供需形势和碳排放趋势进行预测, 最后对该地区进行了多时间尺度预警计算, 验证了所提预警方法的有效性。

关键词

电力供需预警, 碳排放预警, 指标体系, 指标预测

Research on Power Supply and Demand Early Warning and Carbon Emission Early Warning Based on the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

Wenqi Li

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 12th, 2024; accepted: Jul. 5th, 2024; published: Jul. 12th, 2024

Abstract

In order to respond to the call of the new power system for low-carbon power demand, on the basis of the traditional single power supply and demand warning, the dual warning of carbon emissions and electricity should be launched to reflect the excessive carbon emissions and the imbalance of power supply and demand in time. Based on the above background, this paper proposes a research method of power supply and demand early warning and carbon emission early warning. First, according to the basic theory of power supply and demand early warning and combined with the urgent requirement of low-carbon power system in the new era, a power supply and demand early warning and carbon emission early warning index system based on the carbon peaking and carbon neutrality goals is established, including power supply and demand early warning index and carbon emission early warning index. Then, the relevant data of power and carbon emissions in a certain region are analyzed for example, and the mode decomposition prediction algorithm is selected to predict the power supply and demand situation and carbon emission trend. Finally, the multi-time scale early warning calculation is carried out for this region, and the validity of the proposed early warning method is verified.

Keywords

Power Supply and Demand Early Warning, Carbon Emission Warning, Index System, Index Prediction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 我国经济呈现持续增长态势, 居民消费逐渐稳步回升, 众多因素的影响增大了对电力的持续增长需求, 同时受多种用户响应行为等不确定性因素的影响, 电力需求波动性显著增强[1]。与此同时, 全国部分地区先后遭遇极寒、高温、暴雨等自然灾害, 且出现电煤供应紧张状况, 导致电力供给量和电力需求量无法实时有效匹配, 电力供需平衡状态难以维持。随着电力体制改革的持续推进和电网技术设备的不断发展, 对电力系统安全运行和可靠供电提出了更高的标准和要求。随着碳排放要求的日益严格, 传统电力系统已无法满足低碳需求, “双碳”目标的提出为电力行业的发展带来了深刻的变革[2]。为了满足社会经济的发展要求以及人民生活的需要, 电力行业应保持健康平稳发展, 维持电力供需平衡的状态。因此, 基于“双碳”目标背景, 针对不断加剧的电力供需矛盾, 对电力供需预警与碳排放预警开展研究具有很强的现实意义。彭小平等人[3]研究了用基于智能工程理论构建了中长期负荷预测的预警系统。黄茂民[4]基于灰色理论和人工神经网络建立了区域电网中长期电力预警方法。刘思捷等人[5]则基于“双碳”背景对能源电力产业链进行预警分析, 在保证供需平衡的前提下综合考虑了新能源消纳、碳排放以及电碳市场等影响因素。

然而, 现有研究大多侧重于电力供需预警方面, 缺少对碳排放预警的研究。因此, 本文提出一种电力供需预警与碳排放预警的双重预警研究方法, 积极响应当前“双碳”战略的发展要求, 在单一电力供需预警的基础上, 同时开展碳排放预警研究, 实现电力和碳排放的双重预警。首先基于电力供需预警理论以及碳排放交易机制建立了电力供需预警与碳排放预警指标体系, 选取警情指标、划分警度并确定警

限。其次以某地区电力和碳排放的相关数据作为算例，预测了电力供需的发展态势、碳排放的变化趋势以及碳排放配额的分配额度等。最后计算电力供需预警指数和碳排放预警指数，并对不同时间尺度的电力供需预警结果以及碳排放预警结果进行了研究分析。

2. 预警理论体系与碳交易机制

本节主要对预警的相关理论体系以及碳排放权交易机制进行研究。

2.1. 预警基本要素

与经济、能源等领域的预警理论相类似，电力行业的预警理论包括警情、警源、警兆和警度四个基本要素。

1) 警情，指的是预警对象出现的不正常状态，在电力领域的表现形式是因电力供需失衡而导致的异常状况，例如负荷过载、系统备用容量不足等一系列不良现象。警情的重要性体现在其是预警的前提条件，需要对警情进行重点研究，并对警情体现的预警及时做出反应。而电力供需预警的警情就是电力供需的不平衡状态。

2) 警源，是警情产生的根源，是潜在安全危机的“火种”，是电力系统运行中的安全隐患。电力供需问题中的警源主要出现在两个方面，分别是电力供给侧和电力需求侧。

3) 警兆，是警情爆发前的先兆性指标，预警的关键在于警兆的准确分析。在警源经过量变的累积与质变的发展后会出现警情，在该过程中，必定会出现警兆。

4) 警度，是指警情指标数值变化所具有的程度或强度。通过考察警兆的变化情况，参照相应的警兆报警区间和警情的警界区间或警情等级，结合未来情况进行适度修正，最终预报出警度。

2.2. 碳排放权交易机制

碳排放权交易市场作为一种为温室气体减排定价的重要机制，在促进能源电力低碳转型、有效减少碳排放过程中发挥着重要作用。碳交易机制是支撑碳交易市场正常运行的核心，它是指政府部门根据相关标准确定各行业主体可排放二氧化碳的最大值，以适当分配方法分配给各个行业主体，通过市场的调节作用实现碳减排。碳交易机制规则如图 1 所示，政府部门为企业制定碳排放规则，并发放免费碳排放配额。当企业的实际碳排放量多于免费碳配额时，企业需要购买额外的碳排放权以满足需求，增加了企业运行成本；当实际碳排放量低于免费碳配额时，企业则可以通过出售剩余的碳排放权从而获得收益。

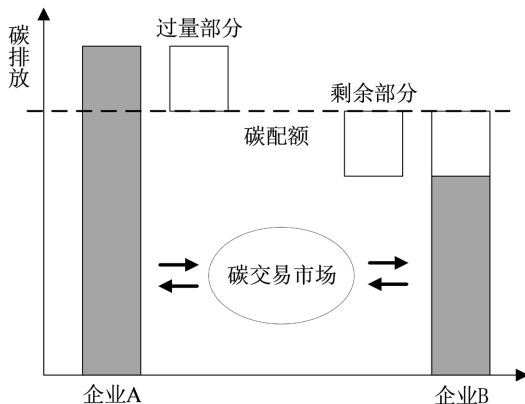


Figure 1. Carbon trading mechanism rules
图 1. 碳交易机制规则

碳交易机制主要包括三个部分，分别是实际碳排放量、初始碳排放配额和碳交易成本[6]。碳排放量限制和碳配额分配原则是碳交易机制的基础，能够影响碳交易市场的正常运行和整体减排效果。

2.2.1. 碳排放量计算方法

目前，世界上主要的碳交易市场通常是使用碳排放总量作为减排目标，通过设定逐年递减的总量上限来控制二氧化碳的排放，符合全球气候协议的要求。碳排放因子法计算简单、通俗易懂，拥有成熟的核算公式、活动数据以及碳排放因子库，适用于宏观、中观和微观层面的碳排放量计算，因此被广泛使用[7]。它是通过对活动水平数据和相关参数的分析得到二氧化碳排放量的计算结果，即碳排放量等于材料或能量的消耗量与碳排放因子的乘积之和，具体的计算公式为：

$$Q_C = \sum AD \cdot EF \quad (1)$$

式中， Q_C 为碳排放量； AD 为导致碳排放的某一能源消耗量； EF 为碳排放因子系数。

2.2.2. 碳排放配额分配方法

碳排放交易市场建立初期，总体经济发展依赖于能源消耗，碳排放量大会给企业带来沉重的减排负担，因此在实施碳交易机制的初级阶段一般会免费分配碳配额。免费的配额分配相当于对企业履行减排责任进行高额补贴，防止其损失已有的生产力，从而最小化减排政策实施所带来的阻力。政府通过开通碳排放交易市场配额买卖，激励企业产品绿色升级，进一步推动企业提高排放效率。目前我国最常用的分配方法是基准制分配方法[8]，它是以企业或行业经济活动绩效为基准设置的碳排放配额分配方法，将碳排放许可证以免费形式发放给行业或企业。具体到电力行业的基准制碳配额分配方法如下：

$$Q_C^* = \sum \varepsilon \cdot E \quad (2)$$

式中， Q_C^* 为碳排放配额量； E 为电力行业电力的生产量； ε 为按照行业基准设置的碳排放配额系数。

3. 电力供需预警与碳排放预警指标体系模型

预警分析的重点是先建立预警指标体系，针对“双碳”目标背景下的碳排放和电力的双重预警，本节重点对电力供需预警与碳排放预警指标体系的模型进行建立。

3.1. 电力供需预警指标体系模型

3.1.1. 警情指标

电力供需预警的研究对象是电力供需的发展趋势，选取的电力供需预警指标应能够体现电力供需变化形势。电力供需预警实则是反映电力供需的平衡状况，而电力供需平衡包括两个方面，分别为电力平衡和电量平衡。因此，本节选取电力供需预警指数作为预警指标，包括电力预警指数和电量预警指数，其中，电力预警指数通过电力系统容量备用率计算得到，电量预警指数通过发电设备利用小时数计算得到，通过电力预警指数和电量预警指数的加权计算可得到电力供需预警指数。

(1) 系统容量备用率

电力系统备用容量是指电力系统为应对设备检修、事故、调频等特殊情况而增设的设备容量，包括检修备用容量、事故备用容量和负荷备用容量，目的是用来保证正常的电力供应。系统容量备用率是用来表征系统备用容量设置的指标，其相关计算公式为：

$$R_{capacity} = 1 - \frac{P_{load}^{max}}{P_{adjust}^{max}} \quad (3)$$

$$P_{adjust}^{max} = P_{install}^{thermal} \times 0.86 + P_{install}^{new} \times 0.3 + P_{install}^{water} \times 0.3 \quad (4)$$

式中, $R_{capacity}$ 为系统容量备用率; P_{load}^{max} 为统计期内系统的最大负荷; P_{adjust}^{max} 为统计期内系统发电设备可调出力的最大值; $P_{install}^{thermal}$ 为系统火电装机容量; $P_{install}^{new}$ 为系统新能源机组装机容量; $P_{install}^{water}$ 为水电装机容量。

(2) 发电设备利用小时数

发电设备利用小时数是指在一定时期内某地区平均发电设备容量在满负荷运行状态下的时间, 相关计算公式为:

$$T_h = \frac{E}{\bar{P}_{install}} \quad (5)$$

$$\bar{P}_{install} = \tilde{P}_{install} + \Delta P_{install} \cdot k \quad (6)$$

式中, T_h 为发电设备利用小时数; E 为发电设备的发电量; $\bar{P}_{install}$ 为系统平均发电设备容量; $\tilde{P}_{install}$ 为前一个统计期期末的发电设备容量; $\Delta P_{install}$ 为统计期本期净投产的发电设备容量; k 为净投产机组换算系数, $0 < k < 1$, 其与机组的投产时间有关, 本文取 $k = 0.5$ 。

3.1.2. 警度划分

预警目的是预报警度, 利用预警预测方法对建立的警情指标进行预测, 以警度的方式直观的展现预警结果的严重程度。本节将电力供需预警情况分为以下 5 种:

- 1) 富裕, 系统电力、电量均有过剩;
- 2) 平衡, 系统备用容量在合理范围内, 电力电量维持平衡;
- 3) 较紧张, 电力电量基本维持平衡, 会有部分电量缺少的情况出现;
- 4) 紧张, 系统电量基本平衡, 但负荷备用不足, 主要表现为缺少电力;
- 5) 缺电, 系统电力和电量均不足。

电力供需各预警情况所对应的分值如表 1 所示:

Table 1. Power supply and demand early warning index table
表 1. 电力供需预警指数表

评分	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
状况	富裕	平衡	较紧张	紧张	缺电

将由电力预警指数和电量预警指数加权计算得到的电力供需预警指数对照预警指数表, 可判断预警结果。本文将电力预警指数和电量预警指数的加权比设置为 1:1。

3.1.3. 警限确定

本文主要根据国家《电力系统技术导则》规定备用容量的相关要求, 结合中国电力企业联合会和国电动力经济研究中心制定的备用容量和发电设备利用小时数的标准, 以及对我国历年各电网电力供需情况的分析, 完成对电力预警指数和电量预警指数进行划分。由于目前我国发电结构中火力发电仍占最大比例, 因此, 本文以火力发电系统作为研究对象。电力预警指数和电量预警指数的换算方法分别如表 2 和表 3 所示:

Table 2. Power early warning index conversion table
表 2. 电力预警指数换算表

评分	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
状况	富裕	平衡	较紧张	紧张	缺电
火电系统	(40%, 50%]	(26%, 40%]	(18%, 26%]	(12%, 18%]	[8%, 12%]

Table 3. Electricity warning index conversion table**表 3.** 电量预警指数换算表

评分	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]
状况	富裕	平衡	较紧张	紧张	缺电
月度	[200, 230)	[230, 306)	[306, 360)	[360, 400)	[400, 480]

表 2 中, 是采用插值法将系统容量备用率换算成电力预警指数。假设火电系统容量备用率为 20%, 则该系统的电力预警指数 $= 40 + (60 - 40) \times (26\% - 20\%) / (26\% - 18\%) = 55$, 系统处于电力较紧张状态。

表 3 中, 同样是采用插值法将发电设备利用小时数换算成电量预警指数。假设火电系统月度火电利用小时数为 320 小时, 则该系统的电量预警指数 $= 40 + (60 - 40) \times (320 - 306) / (360 - 306) = 45.19$, 系统处于电量较紧张状态。

3.2. 碳排放预警指标体系模型

3.2.1. 警情指标

与电力供需预警的研究方法类似, 碳排放预警指标应能够体现碳排放变化形势的指标。本节建立碳排放预警指数模型作为碳排放预警指标, 由碳排放量和碳排放配额的差值计算得到, 即:

$$Q'_C = Q_C - Q_C^* \quad (7)$$

式中, Q'_C 为碳排放量和碳排放配额的差值, 可由插值法换算成碳排放预警指数。

碳排放量采用碳排放因子法计算得到, 即碳排放量等于机组发电量乘以碳排放系数; 碳排放配额采用基准制计算得到, 即碳排放配额等于机组发电量乘以碳排放配额系数。

3.2.2. 警度划分

本节将碳排放预警情况分为以下 3 种:

- 1) 轻度, 碳排放量超标较少, 对环境造成一定污染, 产生较低的碳交易成本;
- 2) 中度, 碳排放量超标较多, 对环境造成较大污染, 产生较高的碳交易成本;
- 3) 重度, 碳排放量严重超标, 对环境造成巨大污染且给发电企业带来高额的碳交易成本;

3.2.3. 警限确定

碳排放预警指数由碳排放量和碳排放配额的差值计算得到, 虽然碳排放权交易市场按照年度核算碳排放配额并进行分配, 但为了更直观地体现不同时间尺度的碳排放压力, 以便更精准地采取碳减排措施, 因此本文碳排放预警按照年度、季度和月度进行预测分析。碳排放预警指数的警限值和对应分数如表 4 所示:

Table 4. Carbon emission early warning index conversion table**表 4.** 碳排放预警指数换算表

评分	(0, 40]	(40, 70]	(70, 100]
状况	轻度	中度	重度
月度	(0, 170]	(170, 340]	(340, 680]

表 4 中, 运用插值法将碳排放量与碳排放配额的差值换算成碳排放预警指数。假设年度碳排放量与碳排放配额的差值为 1500 万吨, 则碳排放预警指数 $= 0 + (40 - 0) \times (1500 - 0) / (2000 - 0) = 30$, 发电企业处

于碳排放轻度预警状态。

4. 电力供需预测与碳交易指标预测

预警所要分析的数据来源于预测，预测是预警过程中的一个重要环节，研究电力供需预警和碳排放预警需要预测电力供需和碳排放交易相关的指标。在电力供需方面，本节重点开展电力供需的预测研究，包括电力负荷预测、电量需求预测、发电机组装机容量预测、新能源出力预测和外购电力预测等；在碳排放交易方面，碳排放量和碳排放配额是不可或缺的两部分，重点对碳排放量预测和碳排放配额预测进行研究。

4.1. ICEEMDAN 预测模型

预测的关键在于预测算法的选择，合适的预测算法可以使预测结果更加准确，本文采用一种改进型自适应白噪声完备集成经验模态分解(ICEEMDAN)预测算法[9]。该算法在经验模态分解(EMD)算法的基础上进行改进，是一种“分解-预测-重构”的组合预测方法，首先将预测目标分解为多个波动较为平稳的模态分量，即本征模态函数(IMF)，然后分别对多个模态分量进行预测，其次将各模态分量的预测值叠加重构，最终得到目标预测结果。该算法的优点在于在添加自适应高斯白噪声抑制重构误差的基础上，使用信号的均值提取 k 阶模态，最大程度降低了白噪声对模态分解产生的影响。

定义 IMF_k 为使用 ICEEMDAN 算法分解的第 k 个模态分量； $E_k(\cdot)$ 为使用 EMD 算法产生的第 k 个模态分量的算子； $W_i(t)$ 为第 i 次加入的高斯白噪声，均值为 0，方差为 1； t 为时间变量； ε_{k-1} 为求解第 k 个模态分量 IMF_k 时产生的自适应系数； $M(\cdot)$ 为预测目标信号的局部均值； $\langle \cdot \rangle$ 表示取均值。

(1) 将噪声分量 $\varepsilon_0 E_1(W_i(t))$ 加入到原始预测目标信号 $X(t)$ 中，得到

$$X_i(t) = X(t) + \varepsilon_0 E_1(W_i(t)) \quad (8)$$

(2) 计算第一余量信号为

$$r_1(t) = \langle M X_i(t) \rangle \quad (9)$$

(3) 计算一阶模态分量，表示为

$$IMF_1(t) = X(t) - r_1(t) \quad (10)$$

(4) 将第二余量信号估计为一系列 $r_1(t) + \varepsilon_1 E_2 W_i(t)$ 的均值，计算二阶模态分量为

$$IMF_2(t) = r_1(t) - r_2(t) = r_1(t) - \langle M(r_1(t) + \varepsilon_1 E_2 W_i(t)) \rangle \quad (11)$$

(5) 重复上述步骤(3)和(4)，则第 j 个余量信号和第 j 阶模态分量分别表示为

$$r_j(t) = \langle M(r_{j-1}(t) + \varepsilon_{j-1} E_j W_i(t)) \rangle \quad (12)$$

$$IMF_j(t) = r_{j-1}(t) - r_j(t) \quad (13)$$

将分解后得到的模态分量按照过零率的大小分为高频分量和低频分量，过零率的计算公式如下：

$$P_{zero} = \frac{Z_{zero}}{Z_{all}} \quad (14)$$

式中， Z_{zero} 为序列中过零点的个数； Z_{all} 为序列的长度； P_{zero} 为过零点的概率，其值越大，表示序列信号频率越高。

4.2. 电力负荷预测

负荷预测在保障电力系统的经济可靠运行中发挥重要作用，基于负荷预测结果可预知未来电力负荷的紧张情况，判断电力平衡形势，提前制定好各发电机组的发电计划，保障电网安全、可靠的运行。

由于数据获取方式有限，本节只收集到某省(以下称 A 省) 2013 年 1 月至 2023 年 4 月共 124 个月的月度最大负荷数据，将 90%的历史数据作为训练数据，10%的历史数据作为测试数据，验证月度最大负荷预测模型拟合的效果，其均方根误差图如图 2 所示。

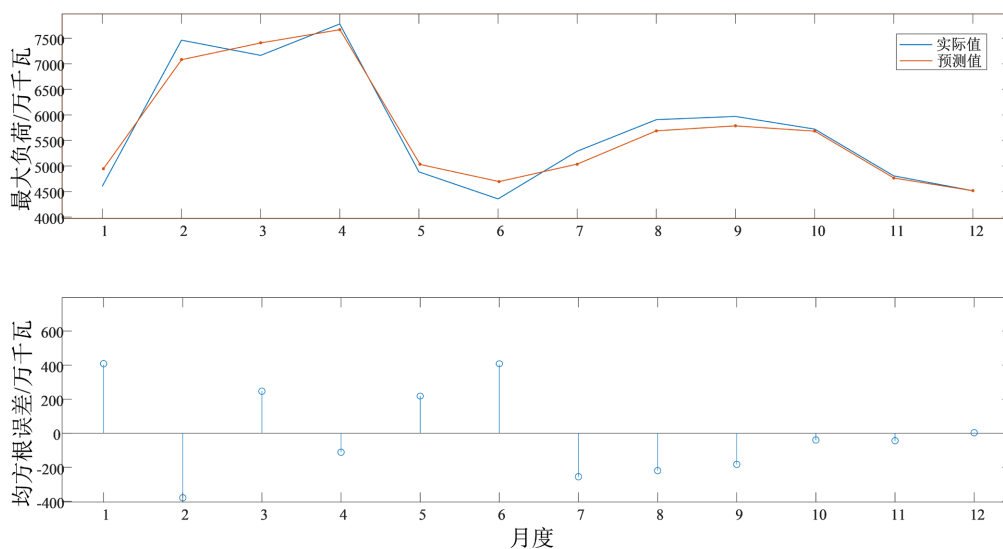


Figure 2. Monthly maximum load fitting effect and root mean square error graph

图 2. 月度最大负荷拟合效果及均方根误差图

经计算，月度最大负荷预测结果的平均相对误差为 3.32%，拟合效果较好，用其预测 2023.05~2024.04 共 12 个月的最大负荷数据如表 5 所示：

Table 5. Monthly maximum load forecast data (2023.05~2024.04)

表 5. 月度最大负荷预测数据(2023.05~2024.04)

日期	最高负荷(万千瓦)	日期	最高负荷(万千瓦)	日期	最高负荷(万千瓦)
2023.05	4770.62	2023.09	6213.50	2024.01	6748.49
2023.06	5824.89	2023.10	6051.94	2024.02	5651.16
2023.07	6322.09	2023.11	5922.39	2024.03	4868.15
2023.08	6546.67	2023.12	6032.10	2024.04	4324.57

4.3. 电量需求预测

全社会用电量的历史波动可以反映全社会用电量的波动规律。由于电力需求的稳定增长，电力消费的历史波动与未来波动有很大的相似之处，这是预测全社会用电量历史波动的基础。本节收集到 A 省 2014.01~2023.04 共 112 个月的月度用电量，将 96%的历史数据作为训练数据，4%的历史数据作为测试数据，验证月度用电量预测模型的拟合效果，其均方根误差图如图 3 所示。

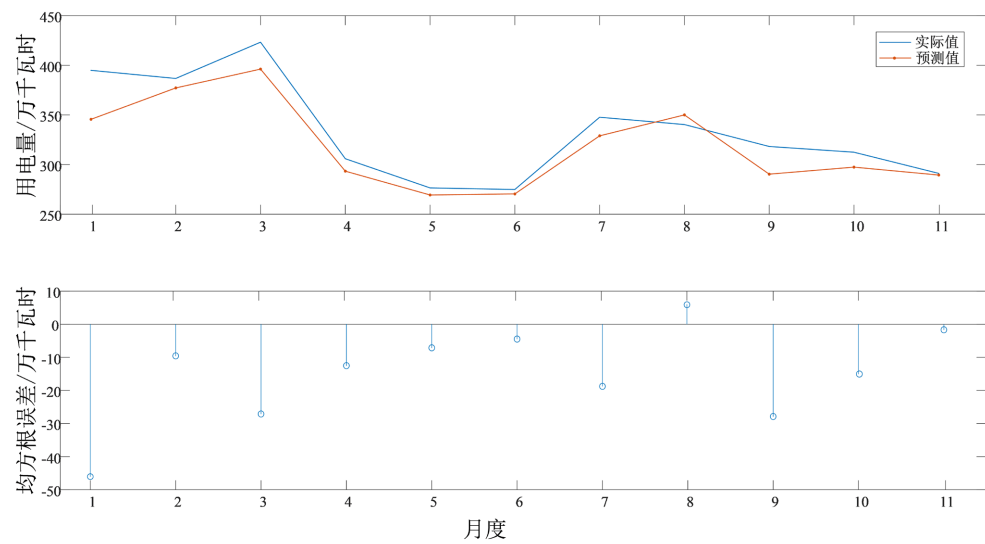


Figure 3. Monthly electricity consumption fitting effect and root mean square error graph
图 3. 月度用电量拟合效果及均方根误差图

经计算，月度用电量拟合结果的平均相对误差为 3.43%，拟合效果很好，用其预测 2023.05~2024.04 共 12 个月的用电量数据如表 6 所示：

Table 6. Monthly electricity consumption forecast data (2023.05~2024.04)

表 6. 月度用电量预测数据(2023.05~2024.04)

日期	用电量(亿千瓦时)	日期	用电量(亿千瓦时)	日期	用电量(亿千瓦时)
2023.05	297.55	2023.09	325.14	2024.01	304.23
2023.06	336.75	2023.10	277.82	2024.02	281.54
2023.07	341.06	2023.11	283.63	2024.03	302.24
2023.08	396.58	2023.12	329.76	2024.04	280.94

4.4. 电力供给预测

根据电力供需预警指标的选取，需要计算火发电机组的发电量，本文采用预测的全社会用电量减去水电、新能源发电和外购电量等计算需要的火电发电量，同时获取发电机组装机容量数据，进而计算电力供需预警指数。

受季节、降水等天气因素的影响，水电发电量每年同一时期的波动变化不大，本文将收集到的 2016~2023 年部分月份的水电发电量数据，结合每月的水电发电计划将 2023 年 5 月~2024 年 4 月的月度水电发电量数据计算出来。A 省的新能源发电主要为光伏发电和风力发电，随着新能源装机的不断增加，新能源发电量也在不断增多，本研究将前几年同月份的新能源发电同比增长率的平均值作为预测月份的新能源发电增长率，从而计算得到预测月份的新能源发电量。同时通过数据调研已知，A 省 2021 年累计购入省外电量约占全省全社会用电量的十分之一，由于具体的外购电量数据不易获取，而根据每个月的用电需求不同外购电量也不同，因此假定各个时间尺度的外购电量均为该时间尺度内全社会用电量乘以一个小于 1 的系数，用电高峰时段系数稍大，用电平稳或低谷时段系数稍小。

经过上述分析，可得 2023 年 5 月~2024 年 4 月的月度水电发电量、新能源发电量、外购电量以及火

电发电量预测数据如表 7 所示：

Table 7. Monthly hydropower, new energy, purchased electricity and thermal power generation (2023.05~2024.04)
表 7. 月度水电、新能源、外购电量以及火电发电量(2023.05~2024.04)

日期	月度电力供给量(亿千瓦时)			
	水电发电量	新能源发电量	外购电量	火电发电量
2023.05	11.38	82.38	24.80	179.00
2023.06	10.29	72.04	33.68	220.74
2023.07	7.84	58.92	37.90	236.41
2023.08	8.06	78.12	56.65	253.75
2023.09	10.30	56.61	32.51	225.72
2023.10	11.90	62.34	25.26	178.33
2023.11	10.32	58.38	25.78	189.14
2023.12	9.30	61.98	27.48	231.00
2024.01	7.63	66.07	25.35	205.18
2024.02	8.92	70.21	23.46	178.95
2024.03	12.14	91.95	25.19	172.96
2024.04	11.91	94.57	17.56	156.90

4.5. 火电装机容量预测

根据电力供需预警指标的要求，需要计算火电机组的平均发电装机容量，可结合 A 省的火电机组投产计划按照式(6)计算得到 2023.05~2024.04 的月度火电机组平均发电装机容量如表 8 所示。

Table 8. Monthly average installed capacity of thermal power units (2023.05~2024.04)
表 8. 月度火电机组平均发电装机容量(2023.05~2024.04)

日期	平均装机容量 (万千瓦)	日期	平均装机容量 (万千瓦)	日期	平均装机容量 (万千瓦)
2023.05	7306.01	2023.09	7348.45	2024.01	7358.35
2023.06	7320.99	2023.10	7356.52	2024.02	7367.90
2023.07	7338.17	2023.11	7351.00	2024.03	7375.64
2023.08	7340.37	2023.12	7347.32	2024.04	7383.00

4.6. 碳排放量与碳排放配额预测

根据《2021、2022 年度全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》，本节中碳排放配额系数取 0.82 kg/(kW·h)，碳排放系数取 0.9 kg/(kW·h) [10]，基于 4.4 节火电发电量的预测值可以计算月度碳排放量和碳排放配额数据如表 9 所示：

Table 9. Monthly carbon emission and carbon emission quota (2023.05~2024.04)
表 9. 月度碳排放量和碳排放配额(2023.05~2024.04)

日期	碳排放量(万吨)	碳排放配额(万吨)	日期	碳排放量(万吨)	碳排放配额(万吨)
2023.05	1611.00	1467.80	2023.11	1702.29	1550.98
2023.06	1986.63	1810.04	2023.12	2078.99	1894.19
2023.07	2127.65	1938.53	2024.01	1846.61	1682.47
2023.08	2283.78	2080.77	2024.02	1610.56	1467.40
2023.09	2031.47	1850.90	2024.03	1556.65	1418.28
2023.10	1604.95	1462.29	2024.04	1412.09	1286.57

5. 预警仿真分析

5.1. 电力供需预警分析

经过上述分析计算，利用 3.1 节中的警情计算公式可计算电力预警指数和电量预警指数。首先，计算火电利用小时数及系统容量备用率如表 10 所示：

Table 10. Monthly thermal power utilization hours and system capacity reserve rate (2023.05~2024.04)
表 10. 月度火电利用小时数及系统容量备用率(2023.05~2024.04)

日期	系统备用容量率 (%)	火电利用小时数 (小时)	日期	系统备用容量率 (%)	火电利用小时数 (小时)
2023.05	39.47	245.00	2023.11	26.72	257.30
2023.06	26.37	301.51	2023.12	26.57	314.40
2023.07	20.93	322.16	2024.01	18.26	278.84
2023.08	17.94	345.70	2024.02	31.75	242.88
2023.09	22.51	307.17	2024.03	41.45	234.50
2023.10	24.85	242.41	2024.04	48.31	212.51

其次，计算电力预警指数、电量预警指数和电力供需预警指数，如表 11 所示：

Table 11. Monthly power supply and demand warning index table (2023.05~2024.04)
表 11. 月度电力供需预警指数表(2023.05~2024.04)

日期	电力预警指数 及警度	电量预警指数 及警度	电力供需预警 指数及警度	日期	电力预警指数 及警度	电量预警指数 及警度	电力供需预警 指数及警度
2023.05	20.76 平衡	23.95 平衡	22.36 平衡	2023.11	38.97 平衡	27.19 平衡	33.08 平衡
2023.06	39.47 平衡	38.82 平衡	39.14 平衡	2023.12	39.19 平衡	43.11 较紧张	41.15 较紧张
2023.07	52.68 较紧张	45.98 较紧张	49.33 较紧张	2024.01	59.36 较紧张	32.85 平衡	46.10 较紧张
2023.08	60.20 紧张	54.70 较紧张	57.45 较紧张	2024.02	31.79 平衡	23.39 平衡	27.59 平衡
2023.09	48.73 较紧张	40.43 较紧张	44.58 较紧张	2024.03	17.10 富裕	21.18 平衡	19.14 富裕
2023.10	42.88 较紧张	23.27 平衡	33.07 平衡	2024.04	3.37 富裕	8.34 富裕	5.86 富裕

然后，画出月度电力供需预警指数变化趋势如图 4 所示：

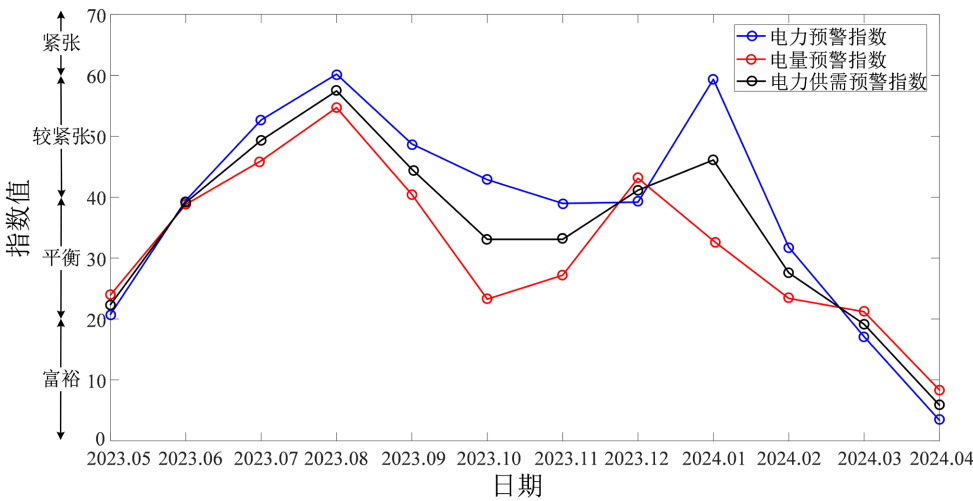


Figure 4. Monthly power supply and demand early warning index change trend chart
图 4. 月度电力供需预警指数变化趋势图

最后，分析表 11 及图 4 可知，A 省在 2023 年 5 月至 2024 年 4 月的 12 个月内，电力供需预警指数会出现较大波动，其中在 2023 年 11 月前后以及 2024 年 3 月前后电力供需形势较好，电力和电量供给略有富余；在 2023 年 7、8、9 月份以及 2024 年 1 月份的电力供需形势面临着较为严峻的挑战，电力需求量持续处于高位，这是由于夏季和冬季为了降温和取暖导致空调等大功率电器的使用，使得电力负荷极具增大，缺电主要表现为缺电力。随着夏季和冬季的度过，电力负荷逐渐减小，电力供需矛盾有所缓和，电力供需继续进入平衡状态。

5.2. 碳排放预警分析

根据 4.6 节碳排放量和碳排放配额的预测值，结合 3.2 节中碳排放预警的警情设置，可计算 2023.05~2024.04 月的碳排放预警指数，从而判断碳排放预警程度。月度碳排放预警指数及对应警度如表 12 所示：

Table 12. Monthly carbon emission warning index table (2023.05~2024.04)
表 12. 月度碳排放预警指数表(2023.05~2024.04)

日期	碳排放预警指数及警度	日期	碳排放预警指数及警度
2023.05	33.69 轻度	2023.11	35.60 轻度
2023.06	41.16 中度	2023.12	42.61 中度
2023.07	43.37 中度	2024.01	38.62 轻度
2023.08	45.82 中度	2024.02	33.68 轻度
2023.09	41.87 中度	2024.03	32.56 轻度
2023.10	33.57 轻度	2024.04	29.53 轻度

分析上表可知，比较严重的碳排放预警集中在 2023 年夏季所对应的月份，这是因为夏季用电需求较

高,火电机组出力较大,因此排放的二氧化碳越多,导致碳排放量超标较为严重。

6. 结论

本章首先基于电力供需预警理论与碳排放权交易机制,分别建立了以电力供需预警指数为预警指标的电力供需预警指标体系和以碳排放预警指数为预警指标的碳排放预警指标体系,为后续预警工作的进行明确了研究方向。然后采用某地区电力和碳排放数据进行分析,预测了电力供需指标和碳排放指标。最后计算了电力供需预警指数和碳排放预警指数,并对电力供需预警结果以及碳排放预警结果进行了分析,良好地体现了未来电力供需形势和碳排放形势的紧张状况,验证了所提预警理论方法的有效性,实现了电力和碳排放的双重预警。经过预警计算,得出以下结论:

1) 所选地区的电力供需形势在夏季和冬季的月份较为严峻,这是由于因降温和取暖导致空调等大功率电器的使用,极大地增加了电力负荷,使得电力供需平衡出现紧张态势。

2) 所选地区的碳排放预警情况集中出现在夏季月份,这是由于夏季较高的电力需求增大了火电机组的出力,导致二氧化碳排放较多,出现较为严重的碳排放预警状况。

参考文献

- [1] 胡博,谢开贵,邵常政,等. 双碳目标下新型电力系统风险评述:特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15.
- [2] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [3] 彭小平. 中长期电力负荷预测及预警系统的分析与设计[D]:[硕士学位论文]. 北京:华北电力大学, 2007.
- [4] 黄茂民. 区域电网的电力需求预测与预警技术研究[D]:[硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- [5] 刘思捷,白杨,陈中飞,等. 碳中和背景下能源电力产业链预警研究框架[J]. 广东电力, 2021, 34(10): 1-9.
- [6] 毕锐,王孝淦,袁华凯,等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 122-132.
- [7] 武振华. 我国化工行业碳排放效率、影响因素及碳配额分配研究[D]:[博士学位论文]. 天津:天津大学, 2020.
- [8] 张潇. 基于终端能源消费的工业部门碳排放权配额分配研究[D]:[硕士学位论文]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
- [9] 杨德州,刘嘉明,宋汶秦,等. 基于改进型自适应白噪声完备集成经验模态分解的工业用户负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 36-43.
- [10] 崔杨,谷春池,付小标,等. 考虑广义电热需求响应的含碳捕集电厂综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8431-8446.