

Inexact Electric-Energy and Environment System Optimization Model and Its Application

Mengwen Li¹, Cong Chen²

¹Beijing Energy Conservation and Environmental Protection Center, Beijing

²School of Economic and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing

Email: kameng512@163.com

Received: Mar. 7th, 2019; accepted: Mar. 26th, 2019; published: Apr. 2nd, 2019

Abstract

Uncertainties information of electric-energy and environment systems was fully considered in this paper. In this study, electric energy and environment decision support-interval optimization method of uncertainty (UEEEOM) was developed based on interval optimization method, which could effectively tackle the uncertainties expressed as interval. The proposed model aimed to achieve a minimized system cost with considering the environment constraints; the results of UEEEEOM could generate energy resources allocation, electricity generation schemes, and quantitatively evaluate the costs for energy purchase, maintenance and operation, capacity expansion and environment control. From results of proposed UEEEEOM, several finding could be revealed as follows: i) the electric-energy structure would be optimized. The proportion for coal-fired would be decreased and renewable energy power would increase during the planning horizon; ii) the air-pollutants emissions would obviously decrease over the planning horizon; iii) the system cost would reach to ¥ [8.91, 8.69] × 10¹². Cost for energy purchase, electric capacity expansion and environment treatment was ¥ [3.26, 4.01] × 10¹², ¥ [4.51, 4.65] × 10¹², ¥ [192.28, 221.08] × 10⁸, respectively.

Keywords

Electric Power System, Air-Pollutants Mitigation, Interval Optimization Method, Cost Analysis, Uncertainties

不确定性电力能源与环境系统优化模型及其应用

李萌文¹, 陈 聪²

¹北京节能环保中心, 北京

²北京科技大学东凌经济管理学院, 北京

Email: kameng512@163.com

收稿日期: 2019年3月7日; 录用日期: 2019年3月26日; 发布日期: 2019年4月2日

摘要

本研究充分考虑电力能源、环境及经济系统中的不确定性, 基于区间不确定优化方法, 构建不确定性电力能源与环境系统优化模型(UEEEOM)。所构建的模型可以有效处理系统中表现为区间的不确定信息。本模型在考虑环境约束的基础上, 以系统成本最小化为目标, 通过对模型求解可以得到资源配置、发电方案; 同时, 可以定量评估系统的运维、燃料配置、电力扩容以及环境治理成本。模型结果表明: 1) 规划期内电力能源结构逐步优化, 煤电占比逐步降低, 可再生能源比例稳步上升; 2) 规划期内, 因发电产生的污染物显著下降; 3) 系统总成本达到 $[8.91, 8.69] \times 10^{12}$ 元; 其中燃料成本达到 $[3.26, 4.01] \times 10^{12}$ 元, 电力投资成本 $[4.51, 4.65] \times 10^{12}$ 元, 环境治理成本为 $[192.28, 221.08] \times 10^8$ 元。

关键词

电力能源, 污染物减排, 区间优化方法, 成本分析, 不确定性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

我国以煤电为主, 煤电占比高达70%以上[1]。以煤为主的电源结构导致了严重的大气环境污染问题。2014年, SO_2 、 NO_x 和烟尘排放量分别达到1974.42、2078.00和1740.75万吨, 其中约30%左右的 SO_2 及 NO_x 排放量来源于火电行业[1][2]。超负荷的污染物排放引发了严重的大气环境污染, 我国大气环境已全面亮起“红灯”。目前我国已然“吃紧”的大气环境状况以及不合理的电力能源结构, 已成为横亘在未来经济社会发展面前一道不容回避的必答难题。因此, 积极调整能源结构, 促进能源结构绿色转型, 协调“高碳”的能源结构与大气环境之间的压力, 开展能源-环境系统优化建模的研究工作十分必要。

2. 文献综述

近年来, 众多学者针对以上问题开展了一系列的研究。赵东阳等[3]针对于电厂超低排放政策, 采用成本有效性评估方法对燃煤电厂污染物减排进行了分析, 计算出脱硫、脱硝及除尘的单位减排成本为4.46万元/吨, 2.35万元/吨, 0.43万元/吨。Zhao等[4]年计算了中国煤电厂的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 的排放系数。王姗姗等[5]基于历史数据和自回归分布滞后-误差修正模型, 对我国能源消费与环境污染进行了实证研究。结果显示, 能源结构对污染物排放的影响非常显著。

总体来说, 以往的研究缺乏对于电力能源系统、环境以及系统成本的统筹规划, 对于当前我国重大能源策略的考虑较少。同时, 忽略了电力能源、环境和经济系统中的不确定性信息。而在电力能源-环境-经济系统中存在的很多信息(如能源价格、电力需求、电厂运维成本、投资成本等)往往具有区间不确定性。例如, 煤炭价格一般在450元/吨至500元/吨间波动, 基于区间算法可以表示为 $[450, 500]$ 元/吨。忽略系统中的不确定性信息, 将会导致决策方案偏差过大。Huang等[6]在灰色不确定性概念的研究基础上提出了区间线性优化, 区间线性优化方法在普通线性规划模型中引入代表不确定性信息的区间数(例如, 浮动在450元/吨至500元/

吨的煤炭价格可以表示为[450, 500]元/吨), 可以有效处理系统中表征为离散区间的不确定性信息。

本研究统筹考虑能源、环境与经济系统的互动关联性, 充分考虑我国“十三五”以来相继出台的“能源发展战略行动计划(2014-2020)” [7]、“中国风电发展路线图 2050” [8]等政策, 基于区间不确定优化方法, 构建不确定性电力-能源与环境系统优化模型(UEEEOM)。所构建的模型可以: i) 有效处理系统中表现为区间的不确定信息; ii) 生成源配置、发电方案、污染物管理等方案; iii) 定量评估系统的运维、燃料配置、电源扩容以及环境治理成本。

3. 方法

(一) 案例分析

本研究考虑了我国 8 种传统电力转换技术, 即煤电、天然气发电、燃油发电、水电、生物质发电(生物质发电以及垃圾发电统称为生物质发电)、核电、风电、太阳能发电。本研究主要研究时期为 2020、2025 和 2030 年, 即 $t=1$ 为 2020 年, $t=2$ 为 2025 年, $t=3$ 为 2030 年。本研究通过统计年鉴、政府报告、相关文献等资料获取模型左端所需的输入数据(表 1) [1] [2] [7] [8] [9]。表 2 为污染物排放系数, 通过参考相关论文得到 [3] [4] [9] [10] [11]。本研究中, 煤电、天然气发电、燃油发电、水电、生物质发电、核电、风电、太阳能发电的运行时间参照中国电力年鉴 [1], 分别为 4747、2340、859、3477、4748、6633、1654、950 小时。

Table 1. Economic data for each power plant

表 1. 经济和技术输入数据

	2020	2025	2030
燃料价格			
煤炭(元/吨)	[464.3, 500.0]	[533.7, 550.0]	[600.0, 600.0]
天然气(元/m ³)	[2.51, 3.25]	[2.61, 3.20]	[2.71, 3.15]
燃料油(元/吨)	[2550, 2650]	[2600, 2720]	[2700, 2800]
单位发电能源消耗量			
煤电(吨标煤/万 kWh)	3.05	3.00	2.98
气电(m ³ /万 kWh)	[1428.0, 1528.0]	[1420.0, 1520.0]	[1400.0, 1500.0]
油电(吨柴油/万 kWh)	[1.70, 2.10]	[1.65, 2.05]	[1.60, 2.0]

Table 2. Air-pollutants emissions coefficients

表 2. 污染物排放系数

		2020	2025	2030
SO ₂	煤炭	[185.0, 193.8]	[180.0, 185.8]	[175.0, 180.8]
	天然气	1.0	1.0	1.0
	油品	[55.0, 58.3]	[54.0, 57.3]	[53.0, 56.3]
NO _x	煤炭	[105.0, 112.0]	[100.0, 107.0]	[86.5, 102.0]
	天然气	[40.0, 44.0]	[39.0, 43.0]	[38.0, 42.0]
	油品	[54.0, 58.6]	[52.0, 56.2]	[50.0, 54.2]
烟尘	煤炭	[50.0, 55.0]	[48.0, 53.0]	[46.0, 50.0]
	天然气	[2.2, 2.4]	[2.1, 2.3]	[2.0, 2.2]
	油品	[0.26, 0.29]	[0.25, 0.28]	[0.24, 0.27]

(二) 模型的形成

本研究充分考虑电力、能源和环境系统中的区间不确定性, 基于区间不确定优化方法, 构建了不确定性电力-能源与环境系统优化模型(UEEEOM)。所构建的模型在满足系统电力需求、资源配置、扩容以及环境约束的基础上, 以系统成本最小化为目标。模型主要考虑 4 种成本, 即系统燃料成本、运行维护成本、投资成本和污染物控制成本。本模型旨在研究我国中长期内电力能源结构调整对于环境的影响, 生成发电以及资源配置方案, 并且深入分析系统所需的成本。所构建的模型如下所示:

模型目标:

$$\begin{aligned} \min f^{\pm} = & \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 PCEM_{kt}^{\pm} \cdot CC_{kt}^{\pm} + \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 ECM_{kt}^{\pm} \cdot OM_{kt}^{\pm} + \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 NCE_{kt}^{\pm} \cdot IC_{kt}^{\pm} \\ & + \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GES_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GES_{3t}^{\pm}] \cdot \eta S_t^{\pm} \cdot CTS_t^{\pm} \\ & + \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GEN_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GEN_{3t}^{\pm}] \cdot \eta N_t^{\pm} \cdot CTN_t^{\pm} \\ & + \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GED_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GED_{3t}^{\pm}] \cdot \eta D_t^{\pm} \cdot CTD_t^{\pm} \end{aligned}$$

式中: f^{\pm} 为系统成本; $cost(1)^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 PCEM_{kt}^{\pm} \cdot CC_{kt}^{\pm}$ 为燃料成本; $cost(2)^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 ECM_{kt}^{\pm} \cdot OM_{kt}^{\pm}$ 为运行维护成本; $cost(3)^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 NCE_{kt}^{\pm} \cdot IC_{kt}^{\pm}$ 为投资成本; $cost(4)^{\pm} = f^{\pm} - cost(1)^{\pm} - cost(2)^{\pm} - cost(3)^{\pm}$ 为污染物控制成本。k 为电力转换方式, $k=1, 2, \dots, 8$; $k=1$ 代表煤电, $k=2$ 为气电, $k=3$ 为油电, $k=4$ 为水电, $k=5$ 为生物质发电, $k=6$ 为核电, $k=7$ 为风电, $k=8$ 为太阳能发电。t 时期, $t=1, 2, 3$; $t=1$ 为 2020 年, $t=2$ 为 2025 年, $t=3$ 为 2030 年。 CC_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式燃料价格; OM_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式运行维护成本; IC_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式投资成本; $PCEM_{kt}^{\pm}$ 为第 t 时期第 k 种电力方式需要的燃料量; ECM_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式发电量; NCE_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式新增容量; GES_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式 SO_2 产生率(吨/万吨标煤); GEN_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式 NO_x 产生率(吨/万吨标煤); GED_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式烟尘产生率(吨/万吨标煤); ηS_t^{\pm} 为第 t 时期 SO_2 处理效率(%); ηN_t^{\pm} 为第 t 时期 NO_x 处理效率(%); ηD_t^{\pm} 为第 t 时期烟尘处理效率(%); CTS_t^{\pm} 为第 t 时期 SO_2 处理成本(元/吨); CTN_t^{\pm} 为第 t 时期 NO_x 处理成本(元/吨); CTD_t^{\pm} 为第 t 时期烟尘处理成本(元/吨)。

模型约束:

1) 资源配置约束:

$$\begin{aligned} ECM_{kt}^{\pm} \cdot PCEA_{kt}^{\pm} &= PCEM_{kt}^{\pm}, \quad \forall k=1, 2, 3; \\ PCEM_{kt}^{\pm} &\leq ERLA_{kt}^{\pm}, \quad \forall k=1, 2, 3; \end{aligned}$$

2) 电力供需约束:

$$\sum_{k=1}^8 ECM_{kt}^{\pm} \geq ED_t^{\pm}, \quad \forall t=1, 2, 3;$$

3) 发电约束:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^8 ECM_{kt}^{\pm} &\geq L^{\pm} \cdot ECT_{kt}^{\pm} \cdot OP_{kt}^{\pm}, \quad \forall t=1, 2, 3; \\ \sum_{k=1}^8 ECM_{kt}^{\pm} &\leq U^{\pm} \cdot ECT_{kt}^{\pm} \cdot OP_{kt}^{\pm}, \quad \forall t=1, 2, 3; \end{aligned}$$

4) 新增装机容量约束:

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^8 NCE_{k1}^{\pm} &= ECM_{k1}^{\pm} / OP_{k1}^{\pm} - RC_{k2014}^{\pm} \\ \sum_{k=1}^8 NCE_{k2}^{\pm} &= ECM_{k2}^{\pm} / OP_{k2}^{\pm} - ECM_{k1}^{\pm} / OP_{k1}^{\pm} \\ \sum_{k=1}^8 NCE_{k3}^{\pm} &= ECM_{k3}^{\pm} / OP_{k3}^{\pm} - ECM_{k2}^{\pm} / OP_{k2}^{\pm}\end{aligned}$$

5) 环境约束:

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 PCEM_{kt}^{\pm} \cdot GES_{kt}^{\pm} \cdot (1 - \eta S_t) &\leq SCL_t^{\pm}, \quad \forall i, t \\ \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 PCEM_{kt}^{\pm} \cdot GEN_{kt}^{\pm} \cdot (1 - \eta N_t) &\leq NCL_t^{\pm}, \quad \forall i, t \\ \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 PCEM_{kt}^{\pm} \cdot GED_{kt}^{\pm} \cdot (1 - \eta D_t) &\leq DCL_t^{\pm}, \quad \forall i, t\end{aligned}$$

式中, $PCEA_{kt}^{\pm}$ 为第 t 时期第 k 种电力方式单位发电量需要的燃料; $ERLA_{kt}^{\pm}$ 为第 t 时期第 k 种发电方式的资源供给上限; ED_t^{\pm} 为第 t 时期电力需求量, 由 logistic 预测得到; ECT_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式装机容量; OP_{kt}^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式运行时间; L^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式发电量下限制; U^{\pm} 为第 t 时期第 k 种电力方式发电量上限制; RC_{k2014}^{\pm} 为 2014 年第 k 种电力方式装机容量; SCL_t^{\pm} 为第 t 时期 SO_2 排放上限约束; NCL_t^{\pm} 为第 t 时期 NO_x 排放上限约束; DCL_t^{\pm} 为第 t 时期烟尘排放上限约束; $PCEM_{kt}^{\pm} = PCEA_{kt}^{\pm} \cdot (ECM_{kt}^{\pm} + NCE_{kt}^{\pm})$ 为第 t 时期第 k 种电力方式所需要的资源配量(万吨标煤);

$TS_t^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GES_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GES_{3t}^{\pm}] \cdot (1 - \eta S_t^{\pm})$ 为第 t 时期 SO_2 排放量;

$TN_t^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GEN_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GEN_{3t}^{\pm}] \cdot (1 - \eta N_t^{\pm})$ 为第 t 时期第 k 发电方式的 NO_x 排放量;

$TD_t^{\pm} = \sum_{k=1}^8 \sum_{t=1}^3 [PCEM_{1t}^{\pm} \cdot GED_{1t}^{\pm} + PCEM_{3t}^{\pm} \cdot GED_{3t}^{\pm}] \cdot (1 - \eta D_t^{\pm})$ 为第 t 时期第 k 发电方式的烟尘排放量。

(三) 模型的求解

根据 Huang [5], 该模型可以拆分为上限 f^+ 和下限 f^- 两个子模型。对于区间算法, 当模型目标为求解最小值时, 先拆解 f^- , 同时可以得到决策变量 $PCEM_{kt}^-$ 、 ECM_{kt}^- 、 NCE_{kt}^- 、 TS_{kt}^- 、 TN_{kt}^- 、 TD_{kt}^- 、 $cost(1)^-$ 、 $cost(2)^-$ 、 $cost(3)^-$ 、 $cost(4)^-$ 。第二步, 拆解上届 f^+ , 相应于目标函数 f^{\pm} , 同时可以得到决策变量 $PCEM_{kt}^+$ 、 ECM_{kt}^+ 、 NCE_{kt}^+ 、 TS_{kt}^+ 、 TN_{kt}^+ 、 TD_{kt}^+ 、 $cost(1)^+$ 、 $cost(2)^+$ 、 $cost(3)^+$ 、 $cost(4)^+$ 。将下届模型 f^- 和 f^+ 得到结果相结合, 即是模型(1-1) f^{\pm} 的解: $[PCEM_{kt}^-, PCEM_{kt}^+]$ 、 $[ECM_{kt}^-, ECM_{kt}^+]$ 、 $[NCE_{kt}^-, NCE_{kt}^+]$ 、 $[TS_{kt}^-, TS_{kt}^+]$ 、 $[TN_{kt}^-, TN_{kt}^+]$ 、 $[TD_{kt}^-, TD_{kt}^+]$ 、 $[cost(1)^-, cost(1)^+]$ 、 $[cost(2)^-, cost(2)^+]$ 、 $[cost(3)^-, cost(3)^+]$ 和 $[cost(4)^-, cost(4)^+]$ 。所构建的模型将通过 lingo 软件进行求解。

4. 结果分析

(一) 电力结构进一步优化

本模型考虑了我国当前火电厂中的三种化石燃料, 即煤炭、天然气、油品作为火电厂的主要资源供给。图 1 为 UEEEOM 模型得到的电力能源系统资源配置方案。我国主要以煤电为主, 由于当前环境压力, 在“十三五”时期及未来中长期内, 电力结构将得到大幅改善。结果显示, 煤炭配置量至 2025 年达到峰

值, 规划期内煤炭配置量分别为[144783.50, 152782.79]万吨标煤(2020年), [149530.50, 157754.68]万吨标煤(2025年), 和[148533.63, 156702.98]万吨标煤(2030年)。在“十三五”时期及未来中长期内, 气电将得到大力的发展, 与国家能源清洁化发展趋势相同。结果显示, 规划期内天然气配置量分别为[3043.20, 4341.75]万吨标煤(2020年), [4034.87, 5182.83]万吨标煤(2025年), 和[4375.85, 6158.87]万吨标煤(2030年)。燃油发电逐步被替代, 油品配置量呈现下降趋势, 规划期油品配置量分别为[95.75, 118.28]万吨标煤(2020年), [82.61, 102.64]万吨标煤(2025年), 和[59.45, 74.31]万吨标煤(2030年)。

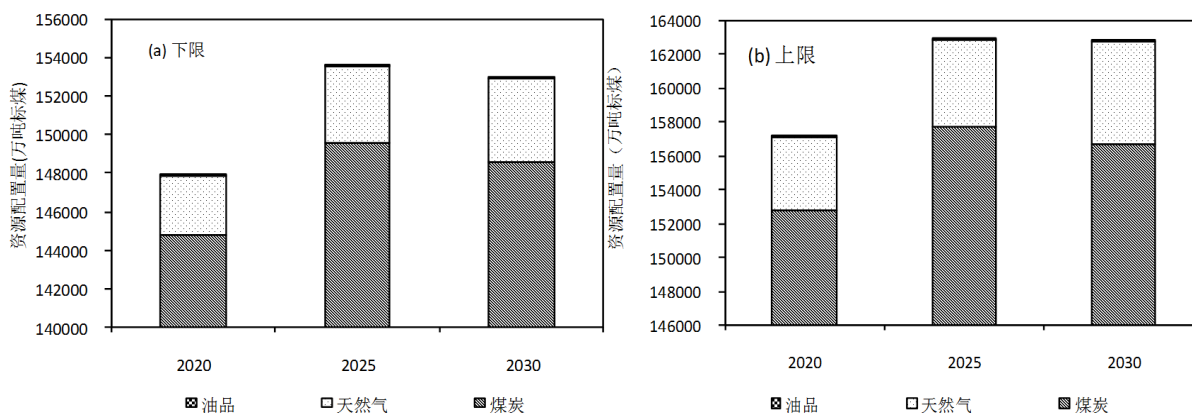


Figure 1. Energy allocation optimization scheme

图 1. 资源配置优化方案

(二) 低碳能源比重持续提升

图 2 为 UEEEOM 得到的不同发电方式的发电方案。结果显示, 煤电预计在 2025 年达到峰值, 规划期内煤炭占比呈现下降趋势。煤电发电量分别为[47470.00, 50092.00]亿千瓦时(2020年), [49843.50, 52584.89]亿千瓦时(2025年), 和[49843.50, 52584.89]亿千瓦时(2030年); 从占比分析, 煤电占比由 2020 年的[65.75%, 65.89%]下降至 2030 年内的[56.35%, 56.95%]。规划期内天然气发电量分别达到[1755.00, 2340.00]亿千瓦时(2020年), [2340.00, 2808.00]亿千瓦时(2025年), 和[2574.00, 3381.30]亿千瓦时(2030年)。规划期内, 可再生能源将得到大力发展, 结果显示, 至 2020 年可再生能源发电比例达到[30.99%, 31.77%], 至 2025 年达到[34.40%, 35.22%], 至 2030 年达到[39.36%, 40.71%]。其中, 核电由 2020 年的[3847.14, 3913.47]亿千瓦时增加至 2030 年的[9286.20, 8954.50]亿千瓦时, 其占比由 2020 年的[5.15%, 5.33%]增长至 2030 年的[9.70%, 10.50%]; 风电由 2020 年的[3721.50, 3804.20]亿千瓦时增加至 2030 年的[6946.80, 7112.20]亿千瓦时, 其占比由 2020 年的[5.00%, 5.15%]增长至 2030 年的[7.52%, 8.04%]; 太阳能发电量由 2020 年的[855.00, 950.00]亿千瓦时增加至 2030 年的[2232.50, 2335.05]亿千瓦时。结果显示, 在“十三五”时期及未来中长期内, 我国发电结构得到大幅度改善, 低碳能源比重的提升将导致环境压力进一步降低。

(三) 污染物排放逐步下降

图 3 为 UEEEOM 得到的火电方式产生的污染物气体排放量(SO₂、NO_x和烟尘)。规划期内, 由于煤电削减以及可再生能源的大力发展, 污染物排放量呈现下降趋势。至 2020 年, SO₂ 排放量达到[536.11, 592.76]万吨, 至 2025 年达到[538.80, 586.85]万吨, 至 2030 年达到[520.37, 567.34]万吨; 规划期内下降了[2.94%, 4.29%]。煤电是 SO₂ 气体的主要贡献源, 占比高达 99.9%。NO_x 排放量呈现下降趋势, 至 2020 年, 下降至[544.43, 618.25]万吨, 至 2025 年下降为[539.24, 613.28]万吨, 至 2030 年下降为[466.42, 584.44]万吨; 其中煤电为 NO_x 的主要贡献源, 其贡献率从 2020 年的[96.87%, 97.73%]下降至[95.56%, 96.41%]。煤电是烟尘排放量的主要贡献源。规划期内, 烟尘将下降[5.62%, 6.76%], 从 2020 年的[72.39, 84.03]万吨下降至 2030 年的[68.33, 78.35]万吨。

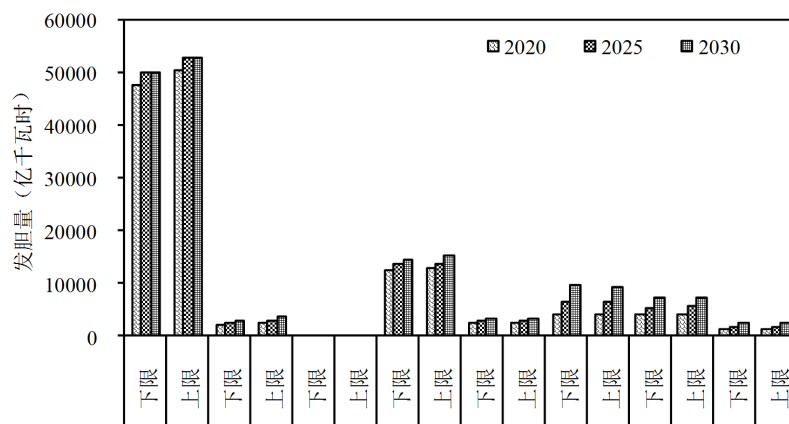


Figure 2. Electricity generation optimization plan over the planning horizon
图 2. 规划期内优化发电方案

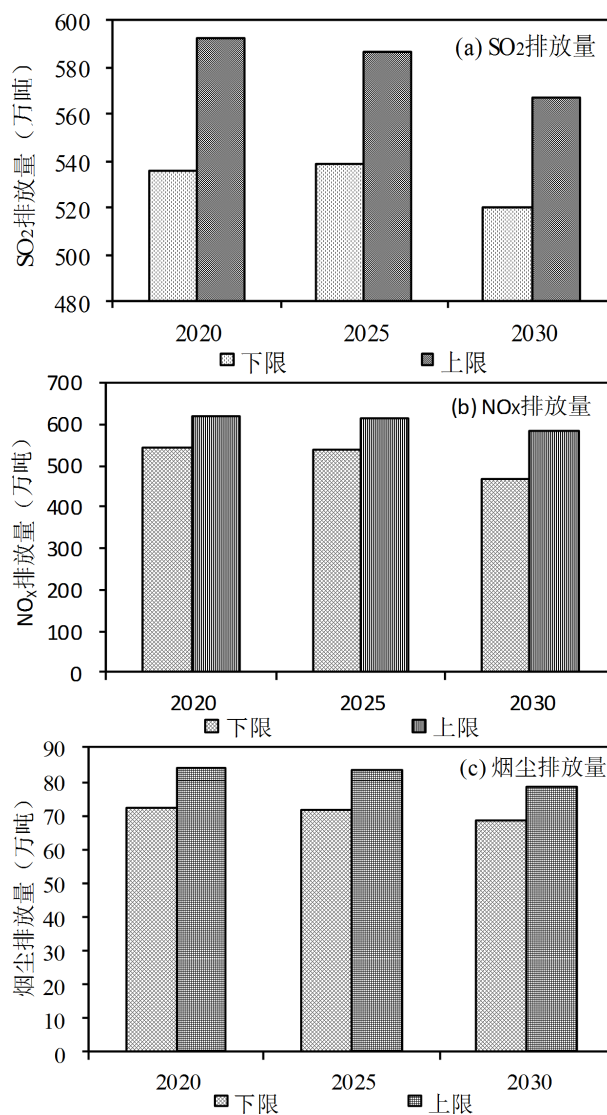


Figure 3. The air-pollutants emissions over the planning horizon
图 3. 规划期内电力系统污染物排放情况

(四) 电力系统成本简析

图4为UEEEOM输出的规划期内的电力能源与环境系统成本。本研究主要考虑了燃料成本、运行维护成本、投资成本以及环境治理成本。其中,燃料成本为 $[3.56, 4.01] \times 10^{12}$ 元,占总成本的 $[44.02\%, 46.24\%]$;运维成本为 $[6733.38, 7881.81] \times 10^4$ 元;电源成本投资成本为 $[4.51, 4.65] \times 10^{12}$ 元,占总成本的 $[53.50\%, 55.74\%]$;环境治理成本为 $[192.28, 221.08] \times 10^8$ 元。 f^- 和 f^+ 是系统的两个极值,分别代表最佳条件和严苛条件下的运算结果。按模型优化计算结果的下限 f^- 执行决策,所需燃料成本、运维成本、投资成本以及环境控制成本较少,相应的模型输出的发电量较小;与此同时,系统面临的电力短缺的风险也较大。按优化结果的上限 f^+ 执行决策,所需系统成本较大,模型的发电量也较大,但是系统出现电力短缺的风险相对较小。

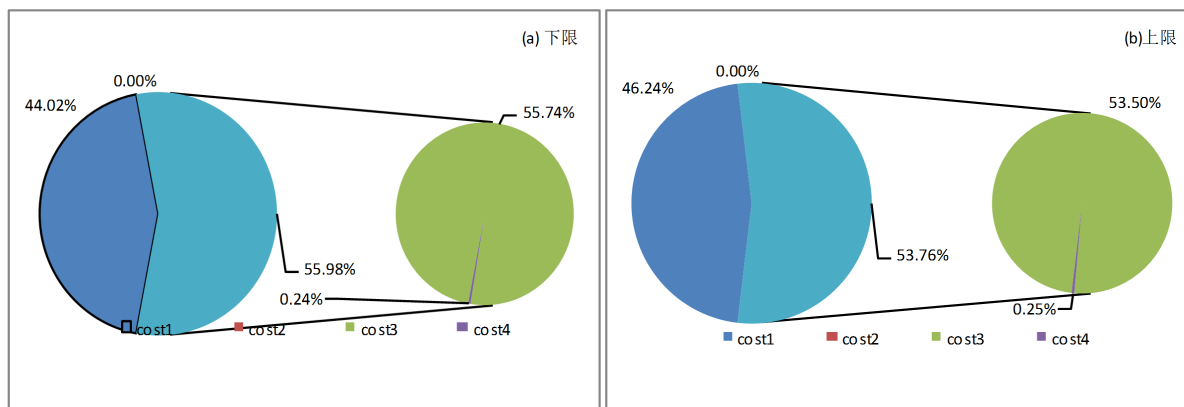


Figure 4. System cost
图4. 电力系统成本

5. 结语

本研究基于区间不确定优化方法,构建不确定能源与环境系统优化模型(UEEEOM)。所构建的模型可以有效处理系统中表现为区间的不确定信息。所构建的模型可以生成资源配置、发电方案;同时,可以定量评估系统的运维、燃料配置、电源扩容以及环境治理成本。通过对模型求解,可以得到:

1) 规划期内煤炭配置量于2025年达到峰值,规划期末(2030年)煤炭配置量下降至 $[148533.63, 156702.98]$ 万吨标煤。气电将得到大力的发展,天然气配置量将上升 $[41.85\%, 43.79\%]$ 。

2) 规划期内电源结构逐步优化,煤电发电量至2025年将达到峰值;至2030年煤电占比下降至 $[56.35\%, 56.95\%]$ 。可再生能源比例稳步上升,由2020年的 $[30.99\%, 31.77\%]$ 上升至2030年内的 $[39.36\%, 40.71\%]$ 。

3) 规划期内发电而产生的污染物显著下降。规划期内 SO_2 排放量下降 $[2.94\%, 4.29\%]$; NO_x 排放量下降 $[5.46\%, 14.32\%]$; 烟尘排放量下降 $[5.62\%, 6.76\%]$ 。

4) 系统总成本达到 $[8.91, 8.69] \times 10^{12}$ 元;其中燃料成本达到 $[3.26, 4.01] \times 10^{12}$ 元,能源电力投资成本 $[4.51, 4.65] \times 10^{12}$ 元,环境治理成本 $[192.28, 221.08] \times 10^8$ 元。

参考文献

- [1] 中国电力年鉴编辑委员会. 中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 环境保护部. 环境统计年报[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [3] 赵东阳, 靳雅娜, 张世秋. 燃煤电厂污染减排成本有效性分析及超低排放政策讨论[J]. 中国环境科学, 2016,

36(9): 2841-2848.

- [4] Zhao, Y., Wang, S.X., Nielsen, C.P., Li, X.H. and Hao, J.M. (2010) Establishment of a Database of Emission Factors for Atmospheric Pollutants from Chinese Coal-Fired Power Plants. *Atmospheric Environment*, **44**, 1515-1523. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.017>
- [5] 王姗姗, 徐吉辉, 邱长溶. 能源消费与环境污染的边限协整分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2010, 20(4): 69-73.
- [6] Huang, G.H., Baetz, B.W., Patry, G.G., et al. (1994) A Grey Dynamic Programming for Waste-Management Planning under Uncertainty. *Journal of Urban Planning and Development*, **120**, 132-156. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(1994\)120:3\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(1994)120:3(132))
- [7] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014-2020) [R]. 北京: 国务院办公厅, 2014-06-07.
- [8] 国家发展和改革委员会能源研究所. IEA. 《中国风电发展路线图 2050》[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2014.
- [9] Chen, C., Li, Y.P. and Huang, G.H. (2016) Interval-Fuzzy Municipal-Scale Energy Model for Identification of Optimal Strategies for Energy Management—A Case Study of Tianjin, China. *Renewable Energy*, **86**, 1161-1177. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.040>
- [10] 国方媛. 北京能源需求及环境综合模型研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [11] Chen, C., Li, Y.P., Huang, G.H. and Zhu, Y. (2012) An Inexact Robust Nonlinear Optimization Method for Energy Systems Planning under Uncertainty. *Renewable Energy*, **47**, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.007>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7540, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sd@hanspub.org