

# 辽宁省公共机构能源供应结构优化设计

王宏伟<sup>1</sup>,刘一晗<sup>1</sup>,张芸栗<sup>2</sup>,于磊鑫<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳城市建设学院环境工程系,辽宁 沈阳 110167)

**摘 要** 目的 为了降低辽宁省公共机构建筑能耗,充分利用太阳能以及地热能等可再生能源,优化能源供应结构,确定2020年至2050年辽宁省公共机构能源供应中利用可再生能源的最佳技术方案.方法 对辽宁省公共机构能源需求量及可再生能源比例进行设定.根据辽宁省可再生能源情况,采用方案分析法设计4种不同的能源耦合方案.建立MARKAL模型对4种方案进行模拟和预测.结果 在设计的4种方案中,采用太阳能与化石能源相耦合的方案降低碳排放量最大,相比不利用可再生能源供应的基准方案降低碳排放44%.采用地热能与化石能源相耦合的方案成本最低,总投资成本约为4 622.1亿元.结论 辽宁省公共机构能源供应方案宜选择太阳能、地热能与化石能源相耦合的供应方案,该方案可减少辽宁省公共机构碳排放,满足绿色发展需要.

**关键词** MARKAL模型;可再生能源;技术方案;能源耦合

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Optimization Design of Energy Supply Structure for Public Building in Liaoning Province

WANG Hongwei<sup>1</sup>, LIU Yihan<sup>1</sup>, ZHANG Yunli<sup>2</sup>, YU Leixin<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Department of Environmental Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** In order to make full use of the resources of solar energy and geothermal energy, reduce the energy consumption of public building and optimize the energy supply structure in Liaoning Province, and the best technical scheme from 2020 to 2050 of renewable energy in energy supply structure of public building is determined. According to the energy demand of public building in Liaoning Province and the proportion of renewable energy assumed, and four different energy coupling schemes are established by scenario analysis. The four schemes are simulated and predicted by MARKAL model established. Among the four schemes, the scheme of coupling solar energy, geothermal energy and fossil energy has the largest reduction in carbon emission, which is

收稿日期:2020-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0604000)

作者简介:王宏伟(1964—),女,教授,博士,主要从事可再生能源利用技术方面研究.

44% lower than the benchmark scheme with no renewable energy. The scheme of coupling geothermal energy and fossil energy has the lowest cost, with a total investment cost of 462.21 billion yuan. The energy supply scheme of public building in Liaoning Province should adopt coupling solar energy, geothermal energy and fossil energy. The scheme can reduce carbon emissions of public building and meet the needs of environmental development.

**Key words:** MARKAL model; renewable energy; technical scheme; energy coupling

我国公共机构的建筑能耗过大. 国务院《公共机构节能“十三五”规划》指出, 政府机关、学校、医院等此类公共机构的建筑能耗占社会全部能源消耗量达 4.26% 以上. 除此之外, 公共机构的建筑能耗与常规建筑的建筑能耗相比, 还具有功能复杂、系统多样、能耗增长速度快等特点. 因此, 解决公共机构能源利用问题是降低我国建筑能耗和减少污染气体排放的有效途径之一. 2014 年, 国务院发布《能源发展战略行动计划(2014—2020)》, 计划 2020 年实现可再生能源消费比重达到 15% 以上的目标<sup>[1]</sup>; 2017 年住房和城乡建设部颁布了《建筑节能与绿色发展“十三五”规划》, 目标提升建筑应用中可再生能源的利用规模; 国际能源署和世界能源理事会根据环境的急剧恶化, 针对全球未来的能源发展也提出提高利用可再生能源比例的要求<sup>[2]</sup>. 辽宁省的太阳能和地热能等可再生能源较为丰富, 但可再生能源利用率低. 在 2017 年能源消费构成中可再生能源供应占比仅 2.6%<sup>[3]</sup>. 大部分公共机构能源供应仍以化石能源作为主要的供应能源. 调整能源结构, 提高可再生能源的利用率是降低辽宁省公共机构能耗需解决的问题. 为此, 笔者利用情景分析法设计了 4 种辽宁省公共机构的可再生能源供应方案, 通过建立 MARKAL 模型, 模拟 4 种方案下的成本及二氧化碳排放量, 得到辽宁省公共机构能源供应中利用可再生能源的最佳方案.

1 建立模型

1.1 MARKAL 模型简介

MARKAL 模型是由能源需求约束的多

周期能源供需线性规划模型, 在用于解决一个国家或省区的能源系统规划和结构优化等问题中<sup>[4]</sup>优势突出, 具有多目标分析的功能, 用法灵活的特点. MARKAL 模型还可以结合能源系统模型相关的环境、经济和政策等条件以及不同能源载体之间转换关系进行方案模拟. 图 1 为 MARKAL 模型结构图, 能源流动方向为能源供应侧至能源需求侧, 模型优化求解过程与能源流动方向相反, 即能源需求侧至能源供应侧.

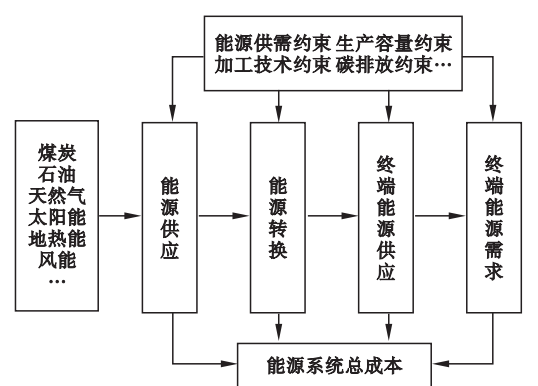


图 1 MARKAL 模型结构图

Fig. 1 MARKAL model structure diagram

MARKAL 模型的应用非常广泛, J. Marcin<sup>[5]</sup>利用 MARKAL 模型探究波兰发电厂污染物排放的交易机制带来的影响, 得到污染物排放主要因素取决于电力消耗的结论. K. Joanna<sup>[6]</sup>通过建立 MARKAL 模型模拟西里西亚市的能源结构规划, 提出基于煤炭的能源技术优化方案. 佟庆等<sup>[7]</sup>将 MARKAL 模型应用于北京市中远期能源系统建设的研究中, 针对未来多种能源系统的发展进行方案设计, 得到了适度控制污染物排放的最佳方案. 何旭波<sup>[8]</sup>利用 MARKAL 模型对陕西省不同的补贴政策 and 排放政策下的能源

利用情况进行预测,得到政府的补贴和限制排放政策均能加快可再生能源发展的结论.

1.2 构建 MARKAL 模型

根据陈文颖<sup>[9]</sup>和马丁等<sup>[10]</sup>对 MARKAL 模型运行机理的研究,笔者建立辽宁省公共机构利用可再生能源供应方案的目标函数和约束方程.

(1)规划目标方程. 整个能源流动系统成本最小化的目标函数  $Z_{\min}$ .

$$Z_{\min} = \sum C_i X_i.$$

(1)

式中: $C_i$  为已知的从能源供应侧到终端需求侧的能源流动成本系数矩阵; $X_i$  为从能源供应侧到终端能源需求侧之间各环节的能源流动向量; $i=2,3,4,5$  表示能源的流动方向,2 为辽宁省公共机构终端用能需求侧,3 为辽宁省终端能源供应侧,4 为各供应能源转换侧,5 为各能源供应侧.

(2)能源供应总量约束方程. 能源的供应量  $X_5$  不得大于资源存储量.

$$X_5 \leq S.$$

(2)

式中: $S$  为资源向量,即辽宁省公共机构规划期内基准年的能源总产量.

(3)各环节能源载体约束方程. 从供应

侧到需求侧的各环节中,每环节的能源消耗量  $X_{i-1}$  不得大于上一环节的能源转化量.

$$X_{i-1} \leq E_i X_i.$$

(3)

式中: $E_i$  为各能源转换流程中的能源转换效率矩阵.

(4)终端能源供求约束方程. 终端能耗需求量不得大于终端能源的供给量  $E_2 X_2$ .

$$D \leq E_2 X_2.$$

(4)

式中: $D$  为辽宁省公共机构终端能源需求向量.

(5)转换技术条件约束方程. 能源的转换量  $E_i X_i$  不得大于现阶段技术条件下的最大能力极限.

$$P_i \geq E_i X_i.$$

(5)

式中: $P$  为转换技术能力限制向量.

(6)碳排放约束方程. 各环节的碳排放量之和不得大于整个规划期内政策排放量限制.

$$M \geq \sum M_i X_i.$$

(6)

式中: $M_i$  为各环节碳排放量, $M$  是整个规划期内的碳排放限制.

根据 MARKAL 模型得到辽宁省公共机构能源耦合数学模型体系框架(见图2).

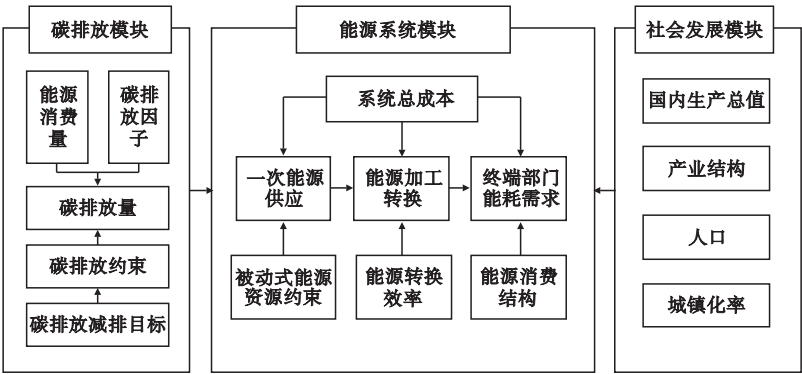


图2 辽宁省公共机构能源耦合数学模型体系框架图

从图2可以看出,体系框架包括能源系统模块、碳排放模块以及社会发展模块3部分. 能源系统模块主要为能源的流动过程,并在能源流动过程中加入相应的约束条件,即能源供应总量约束、各环节能源载体约束、终端能源供求约束、转换技术条件约束等. 碳排放模块主要为碳排放约束条件,通过设置二氧化碳减排目标,并利用排放系数法计算二

氧化碳排放量.排放系数法是指在正常技术经济和管理条件下,根据生产单位产品所排放的气体数量的统计平均值来计算碳排放量的一种方法,符合辽宁省公共机构用能情况和计算条件.社会发展模块主要为模型预测过程中的影响因素,主要包括辽宁省人口、国内生产总值以及城镇化率等社会发展情况.社会发展模块在各部分数据计算和预测中均具有重要的影响.在辽宁省公共机构能源耦合数学模型中,能源载体有煤炭、石油、天然气、太阳能、地热能等;转换技术有火力发电、可再生能源发电;能源载体形式包括热能、电能、液体燃料、合成气等;用能方式包括供电、供热以及生活热水;终端用能部门为辽宁省各类公共机构,主要包括政府机关类、教育事业类以及卫生事业类等.

2 方案设定

2.1 基本设定

模型以2020年为基年,以10年为时间跨度,模拟2020年至2050年辽宁省公共机构利用可再生能源的供应方案.表1为模型设定的未来30年内辽宁省公共机构能源需求量<sup>[11]</sup>及可再生能源比例<sup>[12]</sup>.预计2050年,辽宁省公共机构能源需求量相比于2020年将增长 $1.95 \times 10^9$  (kW·h),可再生能源比例同比增长300%以上.

表1 辽宁省公共机构能源需求量及可再生能源比例设定

Table 1 Energy demand and renewable energy share for public building in Liaoning province		
年份	能源需求量/ $10^{10}$ (kW·h)	可再生能源比例/%
2020	5.740	15
2030	5.802	20.6
2040	5.868	32
2050	5.935	48

2.2 设计方案

辽宁省拥有丰富的太阳能及地热能资源,年平均太阳辐射量可达 $5\,000\text{ MJ/m}^2$ 以

上,年均日照达264 d,历年变化相对平稳<sup>[13]</sup>.地热能勘探网点数量37个,可开采水量 $65.78\text{ m}^3/\text{d}$ ,所含热能达10.34 MW,储量相当于100亿t标准煤以上<sup>[14]</sup>.但基于目前的可再生能源资源储量,开发技术等限制条件,可再生能源不能完全供应辽宁省公共机构全部能耗需求,仍需要化石能源进行能源供应<sup>[15]</sup>.由此设定4种方案进行对比分析.4种设计方案具有相同的终端能源转换效率,可再生能源比例,辽宁省公共机构能源需求量及能源技术成本.

基于情景分析法的理论方法<sup>[16]</sup>,设计方案A为基准方案,以此作为其他方案的对比方案.在基准方案A下不使用可再生能源,模型在满足公共机构能源需求的情况下仅使用化石能源进行能源供应.设计方案B为利用太阳能进行能源供应,但不使用地热能,在太阳能供应不足的情况下使用化石能源进行能源补充供应.设计方案C为使用地热能进行能源供应,但不使用太阳能,同时使用化石能源进行能源补充供应.设计方案D为同时使用太阳能和地热能,在可再生能源供应不足时采用化石能源进行能源补充供应.具体辽宁省公共机构能源供应方案如表2所示.

表2 辽宁省公共机构能源供应方案

Table 2 Energy supply plan for public building in Liaoning province

设计方案	太阳能	地热能	化石能源
A	×	×	√
B	√	×	√
C	×	√	√
D	√	√	√

注:√为设计方案中使用该能源供应,×为设计方案中不使用该能源供应.

3 结果与分析

3.1 4种方案的能源需求

表3~表5为笔者通过模拟4种方案得到的辽宁省公共机构各能源需求量.笔者将

2019 年辽宁省太阳能、地热能的总发电量设定为能源供应总量. 能源转换矩阵取自陈文颖和吴宗鑫<sup>[9]</sup>. 能源转换效率取自《辽宁统计年鉴 2019》<sup>[17]</sup> 中主要年份能源加工的转换效率统计. 各环节能源流动量取自《辽宁统计年鉴 2019》<sup>[17]</sup> 以及国家统计局. 各能源单位投资成本来自白建华等<sup>[18]</sup>. 各设计方案中化石能源的煤炭、石油以及天然气比例分别为 68.1%、21.2%、10.7%<sup>[19]</sup>. 方案 D 中太阳能与地热能配比的获取途径为《中国能源统计年鉴 2018》<sup>[20]</sup> 辽宁省太阳能及地热能开采量.

表 3 30 年内辽宁省公共机构化石能源需求量  
Table 3 Demand of fossil energy for public building in Liaoning province within 30 years

年份	化石能源需求量/万 t	
	基准方案 A	方案 B、C、D
2020	1 894.2	1 610.1
2030	1 627.8	1 292.5
2040	1 407.9	957.4
2050	1 389.1	722.3

表 4 30 年内辽宁省公共机构太阳能需求量  
Table 4 Demand of solar energy for public building in Liaoning province within 30 years

年份	太阳能需求量/EJ	
	方案 B	方案 D
2020	1 120	448
2030	1 163	488
2040	1 446	633
2050	1 718	820

表 5 30 年内辽宁省公共机构地热能需求量  
Table 5 Demand of geothermal energy for public building in Liaoning province within 30 years

年份	地热能需求量/EJ	
	方案 C	方案 D
2020	408	245
2030	559	324
2040	867	485
2050	1 304	675

通过分析可再生能源需求量与化石能源需求量可知,在未来很长一段时间内,能源的消耗仍是以化石能源为主,可再生能源为辅的能源供应模式,因此提升化石能源的能源转换效率是降低公共机构能耗的关键之一. 其次,目前太阳能相比于地热能,具有开发技术低,但发展速度快的特点,因此在模型中太阳能的能源转换效率的增长速度相对于地热能更快,从而太阳能的能源需求量增幅小于地热能的能源需求量增幅. 所以,开发可再生能源技术,提高能源转换效率也是降低公共机构能耗的方法之一.

3.2 碳排放量模拟结果分析

图 3 为 4 种方案下的二氧化碳排放量. 在基准方案 A 下,在化石能源的能源转换效率提升 20% 的前提下,2050 年辽宁省公共机构的碳排放量仍高达 3 392 万 t. 在投入可再生能源的设计方案中,化石能源使用量均比基准方案中相同目标年的水平低,二氧化碳的排放量也逐年下降. 尤其在设计方案 B 中,即利用太阳能与化石能源的供应方案,二氧化碳排放量最低. 预计 2050 年辽宁省公共机构碳排放总量达 1 439 万 t,相比同年基准方案 A 碳排放总量降低 1 168 万 t,相比 2020 年碳排放总量降低 1 306 万 t. 由此可以说明,引入可再生能源可大幅度减少二氧化碳排放量,是辽宁省公共机构节能减排的关键.

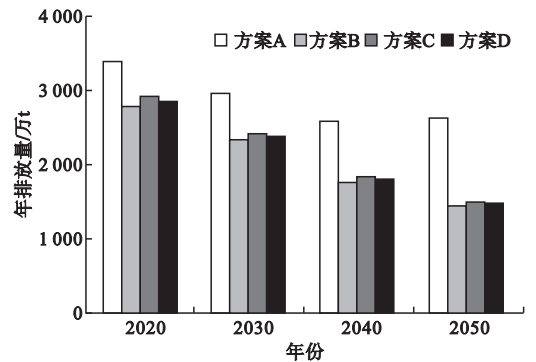


图 3 4 种方案下的二氧化碳排放量  
Fig. 3 Carbon dioxide emissions under four schemes



从碳排放量的降幅上看,使用可再生能源的各个供应方案之间相差不大,但相比基准方案的降幅有明显的提升.此外,除提升可再生能源比例可达到降低碳排放的目的以外,提升各能源的转换效率也可大幅降低碳排放量.以太阳能为例,若2050年能源转换效率可提升至80%以上,那么在太阳能充足的情况下,辽宁省公共机构利用太阳能进行能源供应,年碳排放量可降至1 000万t以下,为公共机构实现绿色建筑零排放目标更进一步.

3.3 成本估计模拟结果分析

图4为4种方案下的年成本的变化量.由于科技发展带来的能源转换效率的提高,各方案中的成本逐年下降.因太阳能近年来的飞速发展,方案B的年成本变化中降幅最大.方案C中由于仅使用地热能作为可再生能源部分的供应,随着地址资源日益枯竭,开发难度加大,因而成本下降速度逐年放缓.

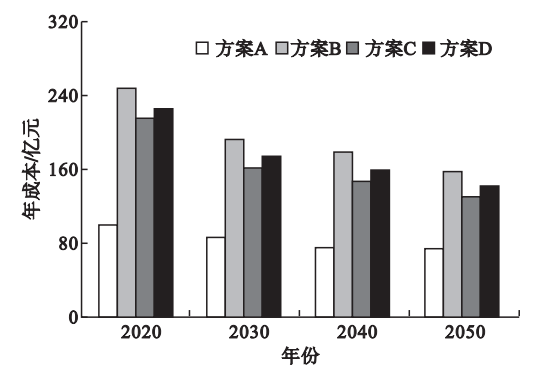


图4 4种方案下的年成本

Fig. 4 Annual cost of four schemes

表6为4种方案下未来30年内的总成本估计.方案B、方案C和方案D均可实现我国发展绿色建筑,低碳减排的目标.其中方案C成本最低,未来30年总投资成本约4 622.1亿元.相比之下,在规划期内方案B和D的成本比方案C的成本分别高出1 139.2和532.6亿元,若以成本最小化为最佳方案唯一目标,可采用方案C作为公共机构的能源供应方案.

表6 4种方案下未来30年总成本估计

Table 6 Total cost estimation with four schemes in the next 30 years

设计方案	总成本估计	与基准方案 相比增量成本
A	2 490.9	0
B	5 761.4	3 270.4
C	4 622.1	2 131.2
D	5 154.8	2 663.8

由于地热能过度开发会导致水量减少,水温下降等其他破坏环境的问题出现.因此在能源方案中应加入太阳能进行能源供应.尽管太阳能建设初期需要大量投资,运行维护费用也比传统火电成本高.但太阳能降低碳排放的效果最好,也可以弥补地热能的地质资源不足的缺点.同时利用太阳能与地热能的方案D与基准方案A相比,可以减少碳排放量1 150万t,同时,以未来30年辽宁省的经济实力,可以完全负担方案D中总计2 663.8亿元的增量成本.

4 结 论

- (1) 辽宁省公共机构的能源供应方案应选择设计方案D即采用化石能源、太阳能与地热能的供应方案.
- (2) 能源转换效率对模拟结果的影响很大.因此提升化石能源利用效率,开发可再生能源技术是优化辽宁省公共机构能源供应结构的关键.

(3) 在经济条件可充分满足增量成本的要求下,利用可再生能源供应方案可有效降低辽宁省公共机构碳排放量,减少化石能源需求量,从而优化能源供应结构,满足绿色发展的需要.

参考文献

[1] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年)(摘录)[J]. 上海节能, 2014(12):1-2.  
(General Office of the State Council. Energy development strategic action plan (2014—

- 2020) (excerpts) [J]. Shanghai energy saving, 2014(12):1-2.)
- [2] 马丁,单葆国. 2030 年世界能源展望: 基于全球能源展望报告的对比研究[J]. 中国能源, 2017, 39(2):21-24.  
(MA Ding, SHAN Baoguo. World energy outlook 2030 brexit's potential impacts on the Sino-UK energy [J]. Energy of China, 2017, 39(2):21-24.)
- [3] 吴海建. 辽宁省新能源产业发展的财政支持政策研究[D]. 大连: 东北财经大学, 2015.  
(WU Haijian. Fiscal policies study on new energy industry development in Liaoning province [D]. Dalian: Northeast University of Finance and Economics, 2015.)
- [4] 李宁. 北京市 3E-S (能源-经济-环境、安全) 系统 MARKAL 模型研究开发[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
(LI Ning. Research MARKAL model for Beijing 3E-S (energy-economy-environment, security) system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [5] MARCIN J. Modelling long-term technological transition of polish power system using MARKAL: emission trade impact[J]. Energy policy, 2016, 97:365-377.
- [6] JOANNA K. Application of MARKAL model generator in optimizing energy systems[J]. Journal of sustainable mining, 2013, 12(2):35-39.
- [7] 佟庆,白泉,刘滨,等. MARKAL 模型在北京中远期能源发展研究中的应用[J]. 中国能源, 2004(6):36-40.  
(TONG Qing, BAI Quan, LIU Bin, et al. Application of MARKAL model for study on Beijing's energy development in mid & long-term [J]. Energy of China, 2004(6):36-40.)
- [8] 何旭波. 补贴政策与排放限制下陕西可再生能源发展预测: 基于 MARKAL 模型的分析[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2013(12):1-8.  
(HE Xubo. Forecasting renewable energy development of Shaanxi province under subsidy policies and emission limit-a scenario analysis based on MARKAL [J]. Journal of jinan (philosophy and social science edition), 2013(12):1-8.)
- [9] 陈文颖,吴宗鑫. 用 MARKAL 模型研究中国未来可持续发展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12):103-106.  
(CHEN Wenying, WU Zongxin. Using MARKAL model to study China's future sustainable development [J]. Journal of tsinghua university (natural science edition), 2001, 41(12):103-106.)
- [10] 马丁,陈文颖. 基于中国 TIMES 模型的碳排放达峰路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(10):1070-1075.  
(MA Ding, CHEN Wenying. China's carbon emission peak path-based on China TIMES model [J]. Journal of tsinghua university (natural science edition), 2017, 57(10):1070-1075.)
- [11] 于水,杨江辉. 辽宁省公共机构主被动能源供应协调耦合研究[J]. 节能, 2019, 38(11):159-162.  
(YU Shui, YANG Jianghui. Study on coordinated coupling of active and passive energy supply of public building in Liaoning province [J]. Energy saving, 2019, 38(11):159-162.)
- [12] 刘嘉,陈文颖,刘德顺. 基于中国 TIMES 模型体系的低碳能源发展战略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(4):525-529.  
(LIU Jia, CHEN Wenying, LIU Deshun. China's low carbon energy development strategy based on China TIMES model system [J]. Journal of tsinghua university (natural science edition), 2011, 51(4):525-529.)
- [13] 于华深,蔺娜,于杨. 辽宁省太阳能资源分布及区划初探[J]. 气象与环境学报, 2008(2):18-22.  
(YU Huashen, LIN Na, YU Yang. Solar energy resource distribution and regional division in Liaoning province [J]. Journal of meteorology and environment, 2008(2):18-22.)
- [14] 张领. 辽宁省新能源产业发展能力评价及对策研究[J]. 知识经济, 2014(16):22-23.  
(ZHANG Ling. Evaluation and countermeasures of Liaoning new energy industry development capability [J]. Zhishi jingji, 2014(16):22-23.)
- [15] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
(ZHANG Hailong. Research on the new energy development in China [D]. Changchun: Jilin University, 2014.)
- [16] 赵亚涛,南新元,贾爱迪. 基于情景分析法的煤电行业碳排放峰值预测[J]. 环境工程, 2018, 36(12):177-181.  
(ZHAO Yatao, NAN Xinyuan, JIA Aidi. Prediction of carbon emission peak in coal-fired power industry based on scenario analysis [J]. Environmental engineering, 2018, 36(12):177-181.)
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 辽宁统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.  
(National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Liaoning statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.)
- [18] 白建华,辛颂旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3699-3705.  
(BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, ZHENG Kuan. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3699-3705.)
- [19] 马丽梅,史丹,裴庆冰. 中国能源低碳转型 (2015—2050): 可再生能源发展与可行路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2):8-18.  
(MA Limei, SHI Dan, PEI Qingbing. Low carbon transformation of China's energy in 2015—2050: renewable energy development and feasible path [J]. China population resources and environment, 2018, 28(2):8-18.)
- [20] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.  
(Department of energy statistics, national bureau of statistics. China energy statistics yearbook 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)