

基于 TIMES-Water 模型的能源与水资源分析

TIMES-Water model for analysis of energy and water resources

马丁 陈文颖 清华大学能源环境经济研究所 清华大学现代管理研究中心 中国北京

摘 要 能源与水资源密切相关。能源的开发和利用受到水资源的各种制约。本文基于 TIMES-Water 模型，耦合了能源系统与水资源系统，评估了中国未来水资源需求，并分析了征收水费对电力部门的影响。结果表明：（1）中国未来的水资源需求将会逐年增加，并在 2030 年左右达峰，峰值为 6880 亿立方米；（2）征收水费会降低电力部门用水，尤其是 2020 年以后的火电和核电的用水量；（3）征收水费会影响发电结构，降低高耗水发电技术（火电与核电）的份额。

关键词 能源；水资源；TIMES-Water 模型；情景分析

免责声明 本文仅代表作者个人观点，与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)

1 引言

水资源是人类生存和发展的基础，但是中国水资源的开发利用面临一系列的问题：包括时空分布不均、人均占有量少、水资源利用效率低以及水体污染严重等。水资源问题严重制约了中国经济社会的发展和人民生活水平的提高^[1]。近年来，为了缓解水资源压力，提高水资源利用效率，中国政府设定了一系列水资源“约束性”目标，并采取了一系列的“节水治污”措施^[2]。

水资源与能源密切相关。水资源分布在能源生产和消费的各个环节（开采、洗选、加工、发电和尾气处理等）；能源也涵盖在水资源开发和利用的各个阶段（开采、运输、净化、淡化以及终端利用等）。耦合能源与水资源系统对于实现水资源的可持续利用具有重要意义。

目前国内外学者针对水资源问题开展了诸多研究^[3-7]，但是科学系统的耦合能源与水资源，涵盖多个部门的综合系统分析较少。本文基于 TIMES-Water 模型对中国未来水资源需求进行预测，并通过情景分析评估征收水

费（water fee）对电力部门水资源需求和发电结构的影响，旨在为中国能源与水资源的可持续利用提供参考。

2 方法学 (Methodology)

TIMES 是在国际能源署（IEA）的组织下，基于 MARKAL 模型和 EFOM 模型开发出的新一代模型平台。基于该平台开发的能源系统综合评价模型（如 China-TIMES, TIMES-FR 等）已被广泛应用于国内外的能源系统规划和能源环境政策分析^[8-9]。清华大学基于该平台构建的 TIMES-Water 模型在传统能源系统模块的基础上，添加了水资源模块，对能源与水资源的开采、加工、转换和终端利用都有非常详细的刻画。

2.1 模型框架

水资源模块将水资源需求分为农业、电力、一次能源开采和加工、工业、居民和生态用水等，如图 1 所示。电力和一次能源开采及加工的取用水量通过能源系统模块优化的结果内生得到，农业、工业、居民和生态

用水量通过外生给定。电力部门按照冷却类型分为开式水冷 (open-loop cooling)、闭式水冷 (close-loop cooling) 和空冷 (dry cooling) 等。水资源供应包括常规水和非常规水两种, 其中常规水主要包括地表水和地下水等, 非常规水主要包括海水/咸水和废水等。考虑到水资源的开采、加工和输送等环节需要电力和损耗。我们结合国内外相关的研究报告和科研文献, 对主要水流程的能耗和效率进行了归纳假设。

能源系统模块将终端能源服务需求分为电力、农业、工业、交通和居民 5 个部门以及水资源的开采加工

输送用电等, 如图 1 所示^[10]。电力部门按照发电类型分为煤电、油电、气电、核电、风电、光伏发电等。农业考虑了灌溉用水和非灌溉用水。工业既考虑了钢铁、水泥、合成氨、玻璃等高耗能行业, 也考虑了食品饮料加工、纺织、造纸等高耗水行业。交通主要分为客运和货运, 并分别考虑了航空、铁路、公路和水运等交通模式。居民部分主要考虑了农村居民、城市居民和商用建筑的采暖、照明、制冷和其它电器等。交通主要分为客运和货运, 根据客货运需求, 分别考虑了航空、铁路、公路和水运等交通模式。

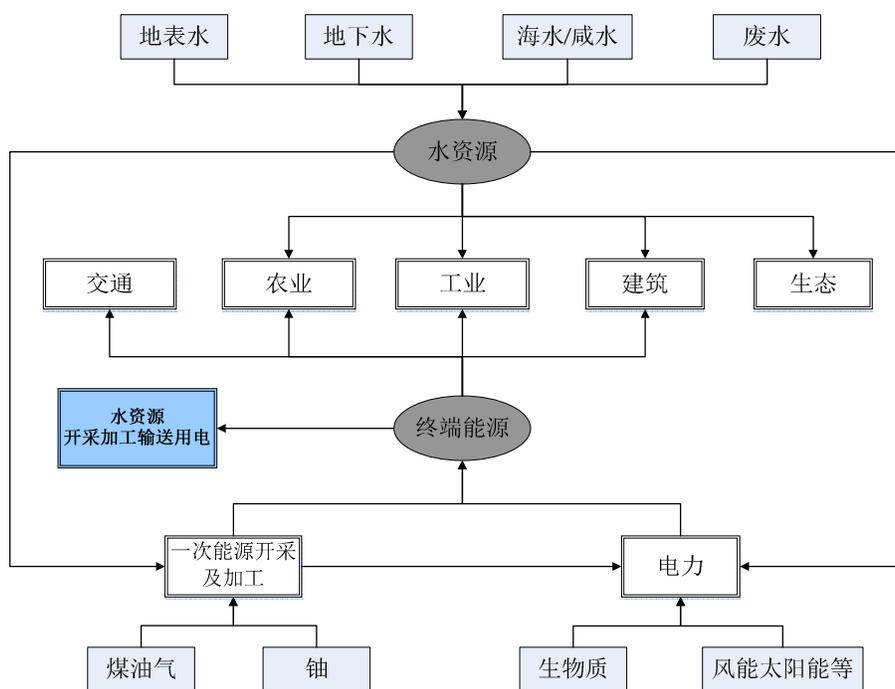


图 1: China-TIMES 模型示意图

2.2 模型机理

China-TIMES 以 2010 年为基年, 5 年为一个周期, 2010 年和 2050 年分别是第一个和最后一个规划期里程年。模型以中国能源服务需求和水资源需求作为出发点, 在终端能源服务需求和水资源需求的驱动下, 利用多周期动态线性优化思路, 选择规划期内的最优能源与水资源配

置, 实现整个系统能源与水资源的配置成本最小化。模型目标函数包括规划期内的所有能源与水资源的供应成本 (如开采成本、加工转化成本、运输成本、设备的固定成本和可变成本), 以及与能源和水资源利用相关的其它成本, 如公式 (1) 所示。

$$Dis\ cost = \sum_{y=2010}^{y=years} (1+\varepsilon)^{2010-y} \times [Inv\ cost(y) + Fix\ cost(y) + Var\ cost(y) - Salvage(y)] \quad (1)$$

式中： ϵ 代表贴现率； y 代表年份； $Invcost$ 、 $Fixcost$ 和 $Varcost$ 分别代表能源或水资源相关的技术投资成本、运营维护成本和可变成本； $Salvage$ 代表技术装置淘汰时的残值。

2.3 基本假设

本模型对我国未来经济社会发展的基本假设如下：考虑“单独二胎”政策后，人口在 2030 年左右达到峰值，约为 14.5 亿^[11]，届时城镇化率为 62.5%；2050 年的人口数约为 13.8 亿，城镇化率为 75.0%。2010、2020、2030、2040 和 2050 年 GDP 年均增长率分别为 7.5%、6%、4.5% 和 3.5%^[12]。

2.4 情景设定

考虑到能源与水资源的开发利用具有较大不确定性，本文采用情景分析方法，设定了参考情景（reference scenario, REF）和两个水费情景（water fee scenario）。

REF 情景主要是基于中国当前状况，仅考虑了 2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放降低 40~45% 目标以及“十二五”期间已有的能源与水利发展规划目标，如能源发展“十二五”规划、可再生能源发展“十二五”规划、水利发展规划等。假定农业灌溉水有效利用系数的从 2015 年 0.53 提高到 2050 年的 0.65^[13]；居民人均用水量从 150L/天提高到 250L/天；生态用水从 2010 年的 120 亿立方米逐年增加到 2050 年 440 亿立方米^[14]。

征收水费是提高水资源利用效率、优化水资源配置的重要经济手段。国内外学者对征收水费开展了大量研

究^[15-16]。本文假设在 2015-2050 年间对电力部门用水征收固定水费，在水费情景 1（WF1）下，水费为 2 元/吨；在水费情景 2（WF2）下，水费为 10 元/吨。通过设定水费情景，旨在评估征收水费对能源部门用水量和发电结构的影响。

3 结果分析

3.1 分部门用水量

参考情景下的分部门用水量如下图 2 所示。从总体来看，中国未来取用水需求将从 2010 年开始逐年上升，并在 2030 年左右达峰，约为 6880 亿立方米；然后逐年下降，2050 年的需求量约为 6500 亿立方米。分部门来看，不同行业的用水量将发生较大变化。随着灌溉效率的提高，农业部门用水量逐年下降，从 2010 年 3690 亿立方米下降到 2050 年的 3200 亿立方米，用水份额从 2010 年的 62% 逐年下降到 2050 年的 50% 左右。随着电力需求的逐年增加，用水量也呈现逐年增加的趋势，但是逐年趋缓。2050 年电力部门的水资源需求将会达到 900 亿立方米左右，用水份额从 2010 年的 6% 提高到 2050 年的 13% 左右。工业部门用水需求将在 2020 年左右达到峰值，约为 1150 亿立方米，此后将呈缓慢下降态势，2050 年的工业用水需求约为 785 亿立方米。随着城镇化率和居民生活水平的提高，居民用水量会有显著增加，2050 年的居民用水量约为 1300 亿立方米，成为推动未来用水量增加的重要力量。一次能源的开采和加工用水量将会逐年增加，并逐渐趋于稳定；生态用水量逐年增加，从 2010 年的 100 亿立方米增加到 2050 年的 400 亿立方米。

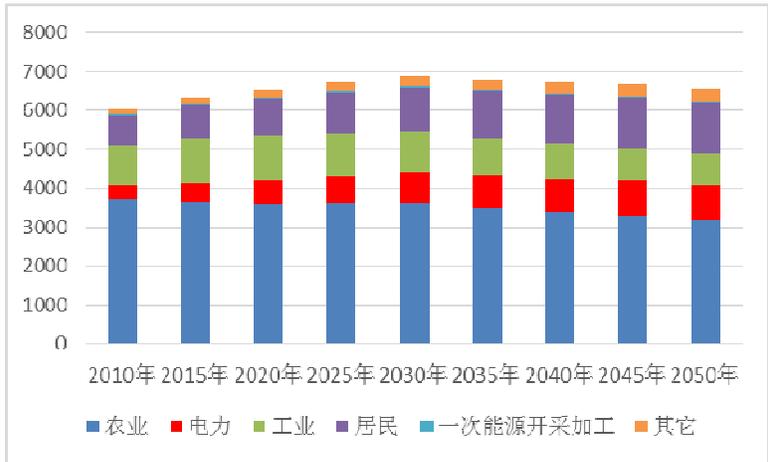


图2：中国分部门水资源消费量（亿立方米）

3.2 电力部门用水

下图3展示了3种情景下电力部门用水量的变化。总量来看，在电力部门在3种情景下的用水量逐年增加，从2010年的330亿立方米分别提高到2050年的780亿立方米（REF）、680亿立方米（WF1）和520亿立方米（WF2），相较于2010年分别增长了135%、106%和58%。水费的征收提高了电力部门耗水技术的生产成本，促使电力系统倾向于采用低耗水的发电技术（风电、光伏等），进而降低电力部门用水量。从图中可以看出，

针对电力部门征收的水费越高，节水效果越显著。分时段来看，水费对2020年以前的电力部门影响不大，主要是因为发电机组寿命较长，水费难以在短期内对发电结构产生显著影响；但是从2030年开始，政策情景下的电力部门用水量显著低于参考情景下的电力部门用水量。分技术类型来看，征收水费对核电和火电的影响较大，二者的用水量显著降低，但是对其他类型的发电技术（生物质发电、天然气发电以及油电）的用水量影响不大。

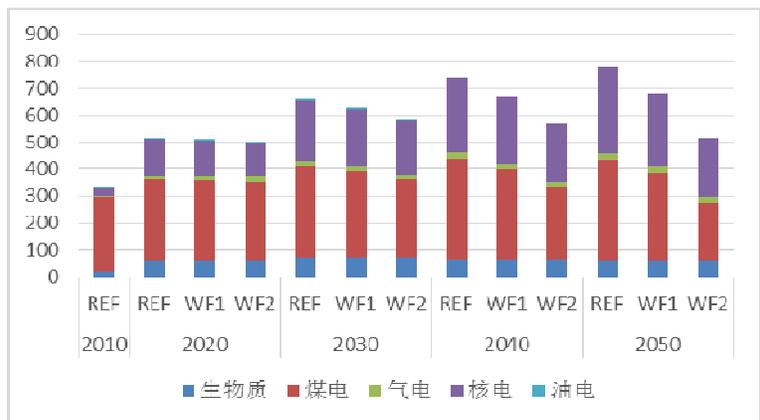


图3：电力部门用水量（亿立方米）

3.3 电力生产构成

图4展示了3种情景下电力部门发电结构的变化。从总体来看，水费的征收促使发电技术从高耗水型发电技术（火电）向低耗水型发电技术（风电、光伏等）转变；

促使冷却方式从开式水冷技术转向闭式水冷技术或空冷技术。分技术来看，在基准情景下，煤电的份额从2010年的77%逐渐降低到2050年的60%；但是在两个政策情景下，2050年的煤电份额分别下降为57%（WF1）和40%

(WF2)。在基准情景下，可再生能源的发电量在逐年增加，但是比例在 2010-2050 年间变化不大；在政策情景下，可再生能源的比例在 2040 年和 2050 年大幅增加，

2050 年的可再生能源的份额分别为 25% (WF1) 和 44% (WF2)。其它发电技术（煤电和气电）的份额不大，同时受水费的影响也较小。

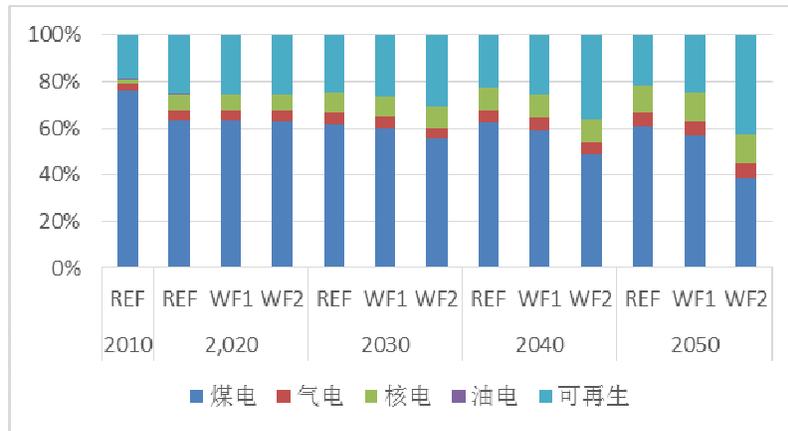


图 4: 发电结构的比较 (%)

4 结论及建议

本文通过 TIMES-Water 模型研究了参考情景和 2 个水费情景下未来水资源的供需变化，评估了水费对电力部门用水量和发电结构的影响，得到以下主要结论：

(1) 中国的水资源需求将在 2010-2030 年间持续增长，并在 2030 年左右达峰，2030-2050 年间中国水资源需求将逐步呈缓慢下降态势。农业部门的水资源需求逐年降低；工业部门（包括电力）和一次能源生产及加工的水资源需求先升后降；居民和生态行业的用水量逐年增加，成为推动未来取用水量增加的重要力量。

(2) 电力部门的用水量逐年增加，2030 年的用水量约为 580-620 亿立方米；2050 年的用水量约为 520-780 亿立方米，未来电力部门的水资源压力较大。电力部门的用水量主要集中在煤电和核电行业，二者合计消费电力部门 80% 以上的水资源。水费的征收可以对电力部门的用水量和发电结构产生显著影响。

为了合理配置能源与水资源，提高能源与水资源的利用效率，实现经济社会与可持续发展，必须采取相应的措施：

(1) 开发利用非常规水资源。 提高电力部门废水的回收利用率，将城市污水处理后作为再生水用于电力部门，实现废水的资源化利用。此外，应该增加海水/咸水淡化的技术份额，提高淡化用水量。

(2) 开发利用节水型技术。 积极推广国内外先进的节水技术，采用先进的节水工艺、节水系统和节水装置，提高循环水浓缩倍率、降低灰分比、采用节水型冷却技术等。

(3) 加强电力企业节水管理。 积极开展创建节水型企业活动，指导企业落实各项节水措施，建立和完善电力部门节水指标体系，规范企业用水统计报表制度。

参考文献

[1] 清华大学，自然资源保护协会. 中国节能政策的节水效果评价[R]. 2013.

[2] 工信部、水利部、国家统计局、全国节约用水办公室. 重点工业行业用水效率指南[R]. 2013.

- [3] Gao Li, Wen Zongguo, Du Bin, Zhang Chao, Chen Jining. An analysis of industrial water conservation potential and selection of key technologies based on the IWCPA model[J]. Resource, conservation and recycling, 2008, 52:1141-1152.
- [4] 郦建强, 王建生, 颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利. 2011.
- [5] 刘宝勤, 姚治君, 高迎春. 北京市用水结构变化趋势及驱动力分析[J]. 2003.
- [6] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报. 2011.
- [7] Welsch M. Adding value with CLEWS—Modelling the energy system and its interdependencies for Mauritius. Applied energy, 2014, 113 :1434-1445.
- [8] 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).
- [9] Dubreuil A., Assoumou E., Boukaert S., Selosse S., Maizi N. Water modelling in an energy optimization framework - the water scare middle east context [J]. Applied energy, 2013, 101:268-279.
- [10] Chen W, Yin X, Ma D. A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO2 emissions [J]. Applied energy. (Online available), 2014.
- [11] 王广州, 张丽萍. 到底能生多少孩子?——中国人的政策生育潜力估计[J]. 社会学研究. 2012.
- [12] 尹祥, 陈文颖. 基于中国 TIMES 模型的碳排放情景比较[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2013, 53(9):1315-1321.
- [13] 水利部. 节水型社会建设“十二五”规划技术大纲 [R]. 2010
- [14] 张亮. 未来十年中国水资源需求展望[J]. 发展研究, 2013.
- [15] Mushtaq S, Khan S, Dawe D, et al. Evaluating the impact of Tax-for-fee (Fei Gai Shui) on water resources and agriculture production in the Zhanghe irrigation system, China [J]. Food Policy, 2008, 33:576-586.
- [16] Treitler Roland, Integrated Water Fee [C]. ICAAA 2012, Singapore, 2012.

作者简介: 马丁, 男, 清华大学能源环境经济研究院, 博士研究生, 主要研究方向为能源系统建模和节能节水分析。地址: 北京市海淀区清华大学能科楼 C400, 邮编: 100084。

通讯作者: 陈文颖, 博士生导师, 清华大学能源环境经济研究院。