

气候变化对能源系统的影响研究：文献综述

樊静丽，梁晓捷，王璐雯

摘要：气候变化是当前国际社会普遍关注的全球化重大问题，它与能源系统间有着密切的交互关系。本文以气候变化对能源系统的影响为主题，对相关国际研究进行全面的综述与展望。根据不同的作用对象，分别从需求端和供给端阐述气候变化对能源系统的影响，并从气候情景预测及供需影响评估两个视角归纳了现有的关键研究方法及其优缺点。最后指出需要进一步开展更加确定性的影响预测研究，能源系统的气候变化适应性研究以及气候变化对能源基础设施、能源运输的影响研究。

关键词：气候变化；能源系统；能源供给侧；能源需求侧

中图分类号：F206 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-0169(2014)01-0041-06

气候变化是当前国际社会普遍关注的全球化重大问题。许多观测资料表明，地球正在经历以全球气候变暖 and 极端气候事件频率/强度增加为主要特征的气候变化问题^{[1](P31-33)}。气候变化正成为一种缓慢发生的灾害，给人类社会带来严重影响，其潜在损失给世界各国提出了适应气候变化的要求。

有关气候变化影响的研究，主要集中在由气候变化带来的一般性物理影响，包括作物生长和虫害、径流量及水资源短缺、疾病与健康、生态系统、动物迁移等。对能源系统与气候变化之间的关系，更多的研究关注“能源消费对 GHG 排放及气候变化问题”，而对能源部门的气候变化易损性研究并不多，且大多仅着眼于能源系统一个方面。从能源供应链不同层次的视角，Schaeffer 等对目前能源系统的气候变化易损性问题进行了总结和归纳^[2]；Mideksa 等综述了气候变化对电力市场的影响^[3]；从区域的视角，Wilbanks 研究了气候变化对美国能源生产和使用的影响^{[4](P7-64)}；Ebinger 归纳了能源部门适应气候变化影响的若干关键问题^{[5](P26-51)}；Yau 等则综述了气候变化对热带地区商业建筑和技术服务的影响^[6]。

本文以气候变化对能源系统的影响为主题，对近十几年来的最新国际文献进行全面的综述及展望。在阐述主流研究问题的同时，归纳比较了其中的关键研究方法及各自优缺点。最后根据目前研究的特点，提出了可能的发展方向。

一、气候变化对能源需求侧的影响研究

气候变化对能源需求端影响的研究广泛关注气温变化对建筑/居民部门能源需求，尤其是电力需求。这是因为，气温升高趋势导致冬季更为舒适而夏季更为不适，进而使取暖需求降低，制冷需求增加，取暖制冷又大多由电力支撑^[6]。McGilligan 等指出建筑部门是容易受到气候变化尤其是全球变暖挑战的部门^[7]。IPCC 第三次评估报告将气候变化对建筑部门的影响总结为“电力需求增加，而能源供给可靠性降低”。

许多学者针对不同国家、地区，探讨了气候变化/ CO_2 浓度增加对能源需求/消费的影响，其中大多

基金项目：中国科学院战略先导项目“我国及世界主要国家历史排放发展轨迹及相关影响因素分析”(XDA05150600)

作者简介：樊静丽，北京理工大学管理与经济学院，北京理工大学能源与环境政策研究中心博士研究生（北京 100081）；梁晓捷，北京理工大学管理与经济学院，北京理工大学能源与环境政策研究中心博士研究生

数研究针对取暖制冷能源需求。如 Bhartendu 等用回归方法估算了在大气中 CO₂ 浓度增加一倍情景下，美国安大略省的冬季取暖和夏季制冷带来的能源需求变化^[8]。Baxter 等采用能源终端利用模型估计了到 2010 年全球变暖的两种情景下，美国加利福尼亚州的能源消费和用能峰值变动情况^[9]。Ruth 等综合气候因素和社会经济因素，研究了气候变化对美国马里兰州能源需求的影响，并依据 HadCM2 提供的温度情景进行预测，指出经济因素的影响要大于气候因素^[10]。Mirasgedis 等利用 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 模型得到气候参数情景，进一步建立了希腊气候变化对电力需求的影响模型，并用模型预测未来气候情景下电力需求的变化^[11]（如表 1 所示）。

表 1 气候变化对能源需求影响的研究

文献	区域/部门	方法	内容	能源消费变化	温度变化和时间
Amato 等 ^[12]	美国马萨诸塞州：居民和商业部门	计量经济多元回归模型（度日及其他变量）	分别估计了各部门的电力、天然气和取暖用油需求	人均生活和商业用电增加 2.1% 和 1.2% (2020)	GHG 排放情景，CO ₂ 当量每年增长 1%
Baxter 等 ^[9]	美国加利福尼亚州	终端能源模型（模拟）	年均电力使用和峰值需求	2010 年电力增长至 7 500 GWh (2.6%)	温度增加 1.9℃
Bhartendu 等 ^[8]	美国安大略州：居民部门	计量经济多元回归模型（度日及其他变量）	分别估计了电力、天然气、取暖用油需求	取暖用能：-31% ~ -45%；制冷用能：+6% ~ +7%（与 1976—1983 年相比）	在 2025—2065 年间，大气中 CO ₂ 浓度增加一倍
Christenson 等 ^[13]	瑞士 4 个城市	度日方法：冷度日和暖度日	集中于度日（而不是能源）	HDD：-13% ~ -87% CDD：20 times (2085 年情景)	IPCC SRES A2 和 B2 排放情景
Dolarin 等 ^[14]	斯洛文尼亚 2 个城市	室内条件和取暖制冷能耗的模拟	两种不同类型的建筑：标准和低能耗	取暖：-14% ~ -32% 制冷：-3% ~ +418%	未来 50 年情景：温度上涨（+1℃ 和 +3℃）、太阳辐射增加（+3%、+6%）
Hadley 等 ^[15]	美国	度日法	一次能源、居民和商业能源总和	取暖-6%，制冷+10%，一次能源+2%	+1.2℃ (2025)
Mirasgedis 等 ^[11]	希腊	计量经济多元回归模型（度日及其他变量）	电力需求	电力需求每年增加 3.6% ~ 5.5%	IPCC SRES A2 和 B2 排放情景 (2100)
Pilli-Sihvola 等 ^[16]	欧洲 5 国	计量经济多元回归模型（度日及其他变量）	电力需求	与 2007 年相比，2050 年夏季电力需求将增加 2.5% ~ 4%	IPCC SRES A2、A1B 和 B1 排放情景 (2050)
Ruth 等 ^[10]	美国马里兰州：居民和商业部门	计量经济多元回归模型（度日及其他变量）	分别估计了各部门的电力、天然气和取暖用油需求	未来能源价格和区域人口变化比未来气候对能源消耗的影响更大	气候变化中等水平（25 年）：春季+31F，夏秋冬季+41F
Thatcher ^[17]	澳大利亚 4 个城市：居民部门	含当日内调整的线性回归模型	电力需求	区域峰值需求变动 -2.1% 和 +4.6%	平均气温上涨 1℃
Wang 等 ^[18]	澳大利亚 5 个城市：居民部门	能够反映建筑热力模型软件和多地带通风模型	五星级建筑房屋的总取暖/制冷能耗	-19% ~ +61% -27% ~ +112% -23% ~ +81% -37% ~ +193% -26% ~ +101% -48% ~ +350%	550ppm (2050) 550ppm (2010) IPCC A1B (2050) IPCC A1B (2100) IPCC A1F1 (2050) IPCC A1F1 (2100)
Isaac 等 ^[19]	借助度日指标的自下而上的方法	综合了人口、结构、气候、强度、效率等指标	全球取暖/空调能耗	取暖能耗-34% 空调能耗+72%	TIMER/IMAGE 中获得气温变化情景

注：文献源自 Schaeffer 等^[2]及作者整理。

从表 1 中可以看出，气候变化对能源需求影响的研究结果差异较大，主要是因为：（1）研究对象的不

同; (2) 研究方法的区别; (3) 预测情景的选取不同。这说明, 为了解气候变化对一个国家或地区能源需求的影响, 不能直接挪用其他国家或地区的研究结论, 而应该采用合适的研究方法并根据预设的气候变化情景开展特定国家或地区的研究。

二、气候变化对能源供给侧的影响研究

气候变化对能源供给端的影响研究中, 大多是围绕可再生能源的开发利用, 主要研究由气候因子变化所造成的能源资源禀赋以及生产能力的改变。可再生能源生产受气候条件影响比化石能源更大, 因为这种“能源”与全球能量守恒及所导致的大气流动相关^[20]。因此, 未来全球气候变化将对可再生能源供给产生较大影响。

Pašicko 等研究了气候变化对克罗地亚太阳能、风能和水能的影响, 其气候情景数据来自全球气候模型 ECHAM5-MPIOM 和区域动态降尺度气候模型 RegCM, 在 IPCC 未来气候情景 A2 (2011—2040 和 2041—2070) 基础上得出结论: 气候变化对克罗地亚沿海及濒临区域可再生能源的影响最大, 其中第一阶段风速预计增加 20%, 将使风力发电增产一倍, 对光伏发电的影响为中性, 2050 年以后水电生产预计将减产 10%^[21]。Pryor 等综述了气候变化对风能的影响, 并得出结论: 有时气候变迁可能会使风能产业受益, 有时则对风能发展有负面影响, 具体地, (1) 对风力资源 (风力强度和风力资源变化) 的影响; (2) 对风力农场运营维护及涡轮设计的影响, 包括极端风速/狂风、冰冻、海面结冰/永动等因素的影响^[22]。

巴西的能源供给很大程度上依赖于可再生能源资源, 2007 年可再生能源占总能源生产的 47%, 所以巴西可再生能源的气候变化易损性问题引起较多关注。De Lucena 等分析了在一系列长期气候预测排放情景下 (IPCC 的 A2 和 B2), 巴西水电生产和液态生物燃料生产的易损性, 结果表明最贫穷地区的能源易损性逐渐增大, 生物燃料 (尤其是生物柴油) 和电力生产 (尤其是水电) 将受到负面影响^[23]。他们还通过模拟 IPCC 的 A2 和 B2 情景下的风力条件, 分析了全球气候变化对巴西风力发电潜力的可能影响^[24]。其中, 巴西的降尺度风力预测数据源自 Hadley 中心开发的 PRECIS 模型。

三、现有研究方法

很大比例的研究均涉及以不同气候情景来分析能源供需的变化。因此, 下面分别就气候情景预测方法和供需影响评估研究方法来论述现有的关键研究方法。

(一) 气候情景预测方法

目前 IPCC 气候情景是应用最为广泛也较为权威的温室气体排放及气候变化情景。IPCC 致力于开发大气海洋一般循环模型 (General Circulation Model, GCM), 可以预测较高精度的 5×5 经纬度格点气候模式, 主要包括英国的 HadCM3、美国的 PCM、加拿大的 CGCM2。IPCC 根据不同的社会、人口、环境、技术和经济发展轨迹, 开发了四组全球范围内的排放预测情景 (如表 2 所示)。

表 2 IPCC 四种温室气体排放预测情景

情景名称	描述
A1 经济快速增长	较快的人口增长和经济发展, 三组可选择的能源系统变化 (化石密集型资源、非化石资源和两者均衡)。
A2 全球不同步 (高排放)	持续的人口增长但分立的经济增长。
B1 全球收敛	在 21 世纪中叶出现人口峰值, 经济向服务业和信息化发展; 全球范围内实现清洁高效资源技术水平。
B2 可持续增长 (低排放)	局部的经济、社会、环境可持续性解决方案; 中等的人口增长和经济增长水平。

由于气候变化对能源的影响研究基本上集中于局部区域或城市尺度, 非全球尺度, 而 IPCC 提供的预测情景难以直接应用于微观区域范围, 因此, 需要得到降尺度的气候情景。从现在文献来看, 降尺度气候变化情景预测方法大致可以分为两类^[22]: 动态降尺度方法和统计降尺度方法。其中, 动态降尺度方法主要指的是应用区域气候模型 (Regional Climate Model, RCM) 来分解气候情景, 如美国的 NARCCAP 项

目^[25]，欧洲的 PRUDENCE^[26]和 ENSEMBLES^[27]模型。统计降尺度方法则主要是通过运用大尺度气候资料和局部区域气候变量间的实证关系函数，推测区域未来气候情景^{[28][29][30]}。动态降尺度在理论上优于统计降尺度，并且即使无法获取区域地表观测变量，也可以应用于任何区域地点，但缺点是计算量大且对计算机的要求很高。统计（实证）降尺度方法不需要诸如地标山川、粗略地图等额外数据，但需要气候原地数据，相对 RCM 来讲，计算成本小^[22]。

（二）供需影响评估研究方法

从目前文献来看，评估气候变化对能源供需影响的研究方法大致包括三类：热平衡模拟法、度日回归的计量方法和能源生产仿真模型。

1. 热平衡模拟法。热平衡模拟法以能量平衡和热传导为基础，建筑物参数（窗体材料等）、住户参数以及气候参数为主要指标，用仿真软件来模拟天气变化对建筑物热量收支及能耗的影响。如 Roetzel 等用建筑模拟软件 EnergyPlus，模拟了希腊雅典不同的建筑设计方案和居住人数情景下，IPCC 气候变化 A2 情景（2020，2050，2080）对单元办公室舒适度和能源消费的影响^[31]。Xu 等利用降尺度的 GCM 气候数据预测了 2040、2070、2100 年加利福尼亚建筑能源消费，研究发现：制冷技术条件若保持不变，在 IPCC 最差的碳排放情景（A1F1）下，加利福尼亚一些地区未来 100 年制冷用电将增加 50%；在 IPCC 最可能情景（A2）下，制冷电耗将增加 25%。仿真软件是 EnergyPlus 和 DOE-2.1E，模拟方案包括 16 种不同的商业建筑原型^[32]。热平衡模拟法的优点在于不需要详尽的能源消费或能源需求的实地数据，减轻了数据收集负担。但其缺点是软件内部参数较多，模拟较为复杂，系统性差，仿真结果与实际建筑能效结果可能出现不一致。

2. 度日回归的计量方法。基于度日（冷度日和暖度日）指标的计量经济学回归方法是气候对能源需求侧的影响评价研究中最常采用的研究方法类型，这方面的研究始于 1980 年代后期。度日是研究气温与能源消费之间关系时最常用到的一种时间温度指标，是指日平均温度与规定的基准温度间的实际离差。为了研究方便，度日又分为：采暖供热度日（Heating Degree Day, HDD, 简称热度日）和制冷降温度日（Cooling Degree Day, CDD, 简称冷度日）。凡是平均温度低于基础温度的均计入热度日数，而高于基准温度的均计入冷度日数。基准温度由人为设定，一般取 18℃ 作为人体最舒适温度。将冷度日和暖度日作为回归元引入能源供需回归模型中，即为最常见的度日回归的计量方法。度日计量回归模型由于方法简单、适用性强、结果稳健等得到广泛应用，但其缺点在于需要收集大量的时间序列数据作为变量条件。

3. 能源生产仿真模型。能源生产仿真模型主要用于气候变化对可再生能源生产影响的研究中，一般将气候因子变量作为原始输入变量，进而利用降尺度方法得到对机组运行起作用的有效气候因子，最后由产量仿真模型进行模拟。如 De Lucena 等^[23]在分析巴西水电生产和液态生物燃料生产的气候变化易损性时运用了能源生产仿真模型。首先，由大尺度 GCM 模型预测得到目标年的天然降雨量，然后用统计降尺度方法 ARMA12 季节调整模型预测得到局部盆地详细的水流量信息，两者结合预测水电机组注入水流量，最后以此作为输入变量输入到能源生产仿真模型来预测水电产量。

四、当前研究特点及未来发展方向

（一）供需预测研究中存在较多的不确定性问题

由于气候变化是较长期的影响和反应过程，考虑气候变化影响的能源供需预测研究的预测范围大多是几十年甚至上百年。不同的气候情景直接影响预测结果，而未来温室气体排放总量、大气温室气体浓度和全球气候变化均存在较高的不确定性，这直接导致能源供需的长期预测结果同样存在不确定性。例如，水电生产取决于水流量和全年不同时间的变化，长期趋势预测不会捕捉到这样详细的信息^[23]。此外，能源生产与使用除受气候变化的影响外，还会受众多其他因素的影响，如经济增长模式、土地利用、人口增长、技术水平、社会和文化差异等。因此，目前气候变化对能源系统影响的预测研究还仅仅是方向性和趋势性的情景分析，而非准确的预测结果，更加确定性的预测是未来研究中的重要问题。

(二) 气候变化影响研究较多,适应性研究较少

在已有文献中,有关气候变化对能源系统影响的研究探讨较多,而专门针对能源系统适应气候变化的研究较少。如果包括气温升高和极端气候事件增多的气候变化事实无法避免或快速减少,而通过适应措施能够有效降低其潜在的负面成本,那么,提高能源系统的气候变化适应性问题就显得尤为重要和紧迫。例如,改进建筑防护标准以适应可能出现的暴雨现象,提高风机的耐狂风、耐永冻性能,开发设计智能电网以适应气温变化带来的用电峰谷等重要措施均可提高能源系统的适应性。因此,为有效适应气候变化,实现可持续发展,在脆弱性研究基础上的适应性研究尤为重要。有关能源系统对气候变化的适应性是未来的重要研究方向。

(三) 能源供需影响研究较多,对能源基础设施、能源运输影响研究较少

将气候变化对能源供需的影响纳入到能源长期规划中具有重要意义。然而,除对供需造成影响外,气候变化还会对能源基础设施、能源运输等方面产生影响。例如,气候极端事件可能引起电网系统出现故障,进而导致电力供应瘫痪。事实上,世界很多国家都发生过大规模停电事故,如1997年纽约大断电,2003年的中国东北大断电,2012年印度大停电,这些停电事件中不乏由于气候或灾害等造成的基础设施破坏,如电缆压断、变压器冻坏等。再如,由于极端天气,常常导致管道、公路、铁路运输不顺畅,这直接影响油气管道运输、煤炭运输等,并进一步影响下游产业的能源供给。正确认识能源基础设施、运输等方面的气候变化易损性问题,有利于避免灾难性能源短缺的发生。因此,此类问题需要进一步研究。

参考文献

- [1] Parry, M. L. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Schaeffer, R., A. S. Szklo, A. F. P. De Lucena, et al. Energy sector vulnerability to climate change: A review[J]. *Energy*, 2012, (1).
- [3] Mideksa, T. K., S. Kallbekken. The impact of climate change on the electricity market: A review[J]. *Energy Policy*, 2010, (7).
- [4] Wilbanks, T. J. *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*[M]. Darby: DIANE Publishing, 2009.
- [5] Ebinger, J., W. Vergara. *Climate Impacts on Energy Systems: Key Issues for Energy Sector Adaptation*[M]. Washington D. C.: World Bank Publications, 2011.
- [6] Yau, Y. H., S. Hasbi. A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18.
- [7] McGilligan, C., S. Natarajan, M. Nikolopoulou. Adaptive comfort degree-days: A metric to compare adaptive comfort standards and estimate changes in energy consumption for future UK climates[J]. *Energy and Buildings*, 2011, (10).
- [8] Bhartendu, S., S. Cohen. Impact of CO₂-induced climate change on residential heating and cooling energy requirements in Ontario, Canada[J]. *Energy and Buildings*, 1987, (2).
- [9] Baxter, L. W., K. Calandri. Global warming and electricity demand: A study of California[J]. *Energy Policy*, 1992, (3).
- [10] Ruth, M., A. C. Lin. Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA[J]. *Energy Policy*, 2006, (17).
- [11] Mirasgedis, S., Y. Sarafidis, E. Georgopoulou, et al. Modeling framework for estimating impacts of climate change on electricity demand at regional level: Case of Greece[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, (5).
- [12] Amato, A. D., M. Ruth, P. Kirshen, et al. Regional energy demand responses to climate change: Methodology and application to the commonwealth of Massachusetts[J]. *Climatic Change*, 2005, (1-2).
- [13] Christenson, M., H. Manz, D. Gyalistras. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, (6).
- [14] Dolinar, M., B. Vidrih, L. Kajfež-Bogataj, et al. Predicted changes in energy demands for heating and cooling due to climate change[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, (1).
- [15] Hadley, S. W., D. J. Erickson, J. L. Hernandez, et al. Responses of energy use to climate change: A climate modeling study

- [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, (17).
- [16] Pilli-Sihvola, K., P. Aatola, M. Ollikainen, et al. Climate change and electricity consumption—Witnessing increasing or decreasing use and costs? [J]. *Energy Policy*, 2010, (5).
- [17] Thatcher, M. J. Modelling changes to electricity demand load duration curves as a consequence of predicted climate change for Australia [J]. *Energy*, 2007, (9).
- [18] Wang, X., D. Chen, Z. Ren. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia [J]. *Building and Environment*, 2010, (7).
- [19] Isaac, M., D. P. Van Vuuren. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change [J]. *Energy Policy*, 2009, (2).
- [20] Hubbert, M. Energy resources of the earth [J]. *Scientific American*, 1971, (224).
- [21] Pašicko, R., Č. Branković, Z. Šimić. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia [J]. *Renewable Energy*, 2012, (46).
- [22] Pryor, S. C., R. J. Barthelmie. Climate change impacts on wind energy; A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, (1).
- [23] De Lucena, A. F. P., A. S. Szklo, R. Schaeffer, et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil [J]. *Energy Policy*, 2009, (3).
- [24] De Lucena, A. F. P., A. S. Szklo, R. Schaeffer, et al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil [J]. *Renewable Energy*, 2010, (5).
- [25] Mearns, L., R. Arritt, G. Boer, et al. NARCCAP North American regional climate change assessment program; A multiple AOGCM and RCM climate scenario project over North America [A]. *Proceedings of the 16th Conference on Climate Variability and Change* [C]. San Diego; American Meteorological Society, 2005.
- [26] Christensen, J. H., O. B. Christensen. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century [J]. *Climatic Change*, 2007, (1).
- [27] Hewitt, C. D., C. M. Goodess, R. A. Betts. Towards probabilistic projections of climate change [J]. *Proceedings of the ICE-Municipal Engineer*, 2009, (1).
- [28] Von Storch, H. On the use of “inflation” in statistical downscaling [J]. *Journal of Climate*, 1999, (12).
- [29] Pryor, S., J. T. Schoof, R. Barthelmie. Empirical downscaling of wind speed probability distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2005, (D19).
- [30] Pryor, S., J. T. Schoof, R. Barthelmie. Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: Empirical downscaling of multiple AOGCMs [J]. *Climate Research*, 2005, (3).
- [31] Roetzel, A., A. Tsangrassoulis. Impact of climate change on comfort and energy performance in offices [J]. *Building and Environment*, 2012, 57.
- [32] Xu, P., Y. J. Huang, N. Miller, et al. Impacts of climate change on building heating and cooling energy patterns in California [J]. *Energy*, 2012, (1).

(责任编辑 朱 蓓)