

能源与环境约束下的可再生能源的发展利用

宋枫 郑新业

第一部分 引言

2010年是我国“十一五”规划的最后一年，也是“十二五”规划制定年。“十二五”是实现全面建设小康社会奋斗目标承上启下的关键时期，也是深入贯彻落实科学发展观、加快发展方式转变的重要时期。我国经济社会要持续健康发展，工业化、城镇化要继续加速进行，物质文明要进一步提高，这一切离不开能源保障。国际上，石油、煤炭等不可再生性能源的消耗使得人们担心能源供给不可持续以及随之而来的全球气候变化的危机。在这一背景下，如何在“十二五”期间以及中长期继续为国民经济和社会发展提供稳定、清洁、可靠的能源安全保障是一个重要的问题。

2009年9月，胡锦涛主席在联合国气候变化峰会上提出争取到2020年非化石能源占一次能源消费的比重达到15%左右。同年，温家宝总理在哥本哈根气候变化大会上向全世界郑重宣布，到2020年，我国单位GDP二氧化碳排放强度比2005年下降40%-45%。“十二五”期间是落实上述两个目标的关键时期。可再生能源作为一种我国资源潜力巨大，环境压力较小的非化石能源，已经受到政府的高度重视。本报告首先总结我国能源开发的现状和未来的供需矛盾，然后分析我国经济增长和能源消费以及二氧化碳排放的关系，最后针对目前我国可再生能源的发展提出建议。

第二部分 经济增长和能源消耗及二氧化碳排放

1. 目前我国能源消费状况和未来潜在的需求矛盾

在过去的三十年间，中国经济持续高速增长，年平均GDP增长率超过9%，与此同时，我国能源消费总量迅猛增长，全国一次能源消费生产由1980年的6.3亿吨标准煤增加到2008年的26亿吨标准煤，年均增长10.7%；同期一次能源消费总量由6亿吨标准煤增加到2008年的28.5亿吨标准煤，年均增长12.9%，2008年供需缺口为2.5亿吨标准煤。我国已经成为仅次于美国的世界第二大能源消费国，一级能源消费占全世界的份额从

1980年的6.3%增加到了2009年的19.5%，而同一时期美国则从27.4%降至19.6%(图1)。能源消费剧增也带来了严重的生态环境问题，我国的二氧化碳排放量已经由1980年的15亿吨增加到2009年的75亿吨，占全世界的份额由8%增至24%（图2）。

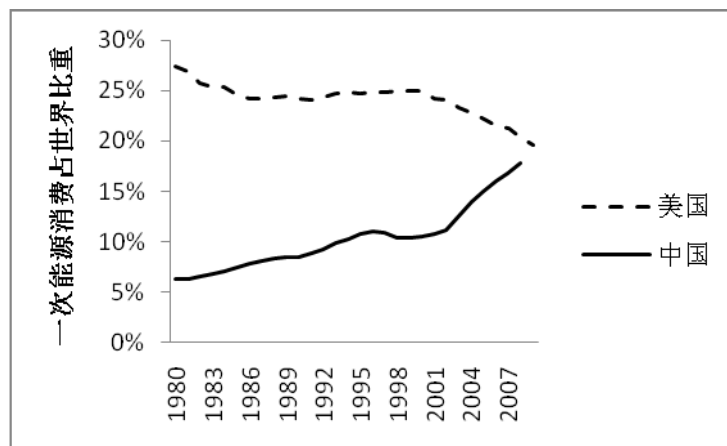


图1. 我国能源消费占世界能源消费总量比重 (1980-2008)

数据来源：BP 世界能源统计 (2010)

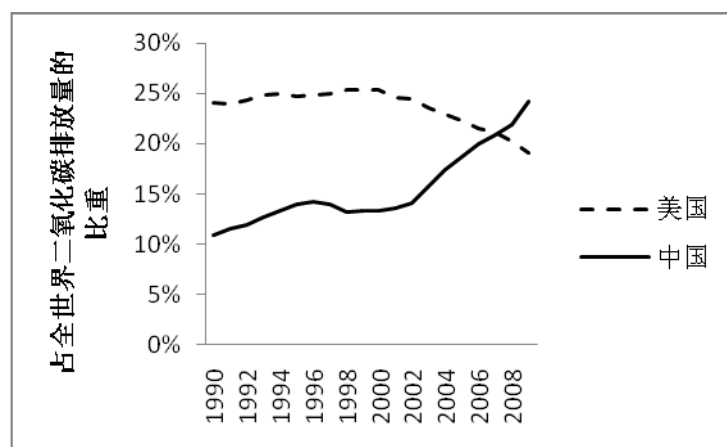


图2. 我国二氧化碳排放量占世界排放总量比重 (1990-2008)

数据来源：BP 世界能源统计 (2010)

我们使用世界能源组织2009年《能源展望》的预测数字来显示我国未来可能面临的能源需求矛盾。根据世界货币基金组织（IMF）的预测，我国经济在2009-2030年间

仍然保持一个较快的速度发展。在 2009–2015 年之间，我国的真实 GDP 以平均每年 8.8% 的速度增长；在 2010–2030 年，增速有所放缓，但也会快于同期世界经济增长水平，达到 4.4%；在 2009–2030 年，平均增长速度大约在 5.9%。同一时期，我国的能源需求量将由目前的 32 亿吨标准煤/年增加到 56 亿吨标准煤/年，平均增长速度为 2.9%。我国能源需求量的增加占世界需求量增加的 39%，到 2030 年将占世界能源总需求的 23%。

根据世界能源组织的能源需求预测，我国在未来 20 年内的能源进口依赖程度将进一步加大，将成为煤炭、石油、天然气这三大能源的净进口国。由于我国煤炭储量较大，一直以来能够自给自足并出口到日本和韩国。但是，我国将从 2015 年开始成为煤炭净进口国，预测进口 5800 万吨，到 2030 年增加到 8800 万吨。而石油消费量的增加则会进一步恶化这种情况，2009 年我国进口石油是 390 万桶/天，到 2015 年是 660 万桶/天，而到 2030 年进口将增加到 1310 万桶/天，届时我国石油对外依存度将达到 80%。天然气的进口量也将从目前总消费量的 28% 上升至 2030 年的 35%。

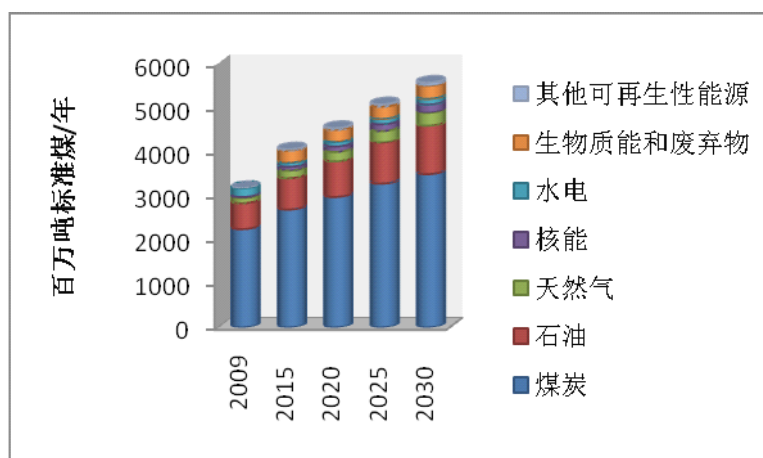


图 3. 中国能源需求预测（2009–2030）

数据来源：世界能源组织《能源展望》（2009）

2. 经济发展与能源消费及环境污染关系假说的提出与实证检验

能源在经济增长中的作用在经济学理论中是一个有争议的话题。传统的新古典增长模型并没有把能源作为一种基本的生产要素，而是把它作为一种中间品。而另一方面，生物物理、生态领域将能源作为一种重要的收入决定因素，所以能源消费会很大程度上影响经济发展。Beaudreau (1995) 批评传统的经济增长模型将能源作为一种次要的要素，指出生产是不可能脱离能源发生的。从经济学的角度来看，这需要将能源作为一种重要的生产要素纳入到经济增长模型中。许多学者也实证研究了不同国家和地区在不同发展阶段的能源消费和经济增长之间的关系，而结果也无法帮助消除理论分歧。总结起来，能源消费和经济增长之间的关系可以分为四种可测试的假设。第一种，能源是和土地、资本和劳动力等互补的一种生产要素，能源消费量会直接影响经济增长。因此，在这种假设下，节约能源会对经济增长造成负面影响。第二种，经济增长带动能源消费的上升，因此节约能源不会影响经济的发展。第三种，能源消费和经济增长是相互影响，互为因果的。第四种，能源消费和经济增长并不相关。我们使用我国能源消费和 GDP 的历史数据来检测他们之间是否存在格兰杰因果关系。如果能源消费对经济增长有单一方向的格兰杰因果关系，就支持第一种假说；如果反过来，经济增长对能源消费有单一方向的格兰杰因果关系，就支持第二种假说；如果存在双向因果关系，则第三种假设得到支持；最后，如果二者之间不存在任何格兰杰因果关系，则能源消费与经济增长之间并不相关。

美国经济学家 Grossman 和 Krueger (1991) 年在研究北美自由贸易区的环境质量和人均收入水平之间的关系时，发现了“污染在低收入水平上随着人均 GDP 增加而上升，高收入水平上随着 GDP 增长而下降”的结论。这样一种“先升后降”的曲线形状和库兹涅茨 (Simon Kuznets) 提出的经济发展和收入分配不公平之间的关系相类似，因而 1993 年 Panayotou 首次将这种环境质量与人均收入之间的倒“U”型关系称为环境库兹涅茨曲线 (Environmental Kuznets Curve, EKC)。EKC 假定在没有其他环境政策干预的情况下，一个国家的整体环境质量或污染水平在经济发展的初期随着国民收入的增加而恶化；但是当该国经济发展到一定水平时，环境质量的恶化和污染水平开始保持平稳；当国民收入继续增加时，环境质量开始好转，环境污染的变动趋势和经济发展变动趋势之

间呈现到“U”型的关系。如果环境库兹涅兹曲线（EKC）假说适用二氧化碳排放和收入关系，经济增长本身就是一个解决环境恶化问题的方法（Rothman and de Bruyn, 1998）。

我们将经济增长、环境污染和能源消费纳入一个分析框架，运用 Toda and Yamamoto 方法（以下简称 TY），从长期格兰杰因果关系角度来研究中国的能源消费、二氧化碳排放和经济增长之间的关系。模型与数据以及实证结果请参见附录一。这里我们讨论实证结果的含义。结果显示实际人均 GDP 对二氧化碳排放之间不存在任何方向上的格兰杰因果关系，因此我们没有证据支持库兹涅茨曲线；此外，在 5% 的显著性水平下，能源消费是二氧化碳排放的格兰杰原因。让人意外的结果是，收入和能源消费也没有格兰杰因果关系，因此我们可以通过减少能源消费来减少二氧化碳排放，这可能不会引起收入水平的降低。

我们应该谨慎的看待能源消费和经济增长之间不存在格兰杰因果关系这一实证结果。虽然我们这一结果和 Soyoo et al (2007) 研究美国经济增长、能源消费和二氧化碳排放之间关系的结论一致，但是和马超群等 (2004)、王海鹏等 (2006) 林伯强等 (2001) 的研究我国近似时期能源和消费和经济增长之间关系的实证结果并不一致。虽然这三个研究得出的格兰杰因果方向也不尽相同，但结果都表明能源消费和经济增长之间长期内是有关系的。我国改革开放后的经济发展经验也表明，至少短期内，能源部门可能会对经济发展产生制约作用。

能源消费是二氧化碳的格兰杰原因符合我们的预期，也和其他研究的结果一致。对我国能源结构更深入的分析能帮助我们进一步理解我国的能源消费和环境污染之间的关系。中国拥有较为丰富的化石能源资源，其中煤炭占主导地位。2006 年，煤炭保有资源量 10345 亿吨，剩余探明可采储量约占世界的 13%，列世界第三位。已探明的石油、天然气资源储量相对不足，油页岩、煤层气等非常规化石能源储量潜力较大。中国人口众多，人均能源资源拥有量在世界上处于较低水平。煤炭和水力资源人均拥有量相当于世界平均水平的 50%，石油、天然气人均资源量仅为世界平均水平的 1/15 左右。耕地资源不足世界人均水平的 30%，制约了生物质能源的开发。

能源的天然禀赋造成了我国能源消费结构不合理，主要以煤炭和石油为主。2009 年，世界能源消费消费的结构基本上是石油、煤、天然气三分天下，分别占 35%，29% 和 24%，核能和水电分别占 5% 和 7%。而我国煤炭能源占绝对优势，超过了 70%，而核

能源仅占能源消费的1%(图4)。相对落后的煤炭生产方式和消费方式,加大了环境保护的压力。煤炭消费是造成煤烟型大气污染的主要原因,也是二氧化碳排放的主要来源。对比美国,我国二氧化碳排放强度(以吨/\$1000 GDP来衡量)在1980年是美国的3倍左右,2006年有所下降,但仍是美国和世界平均水平的2倍左右(图5)。

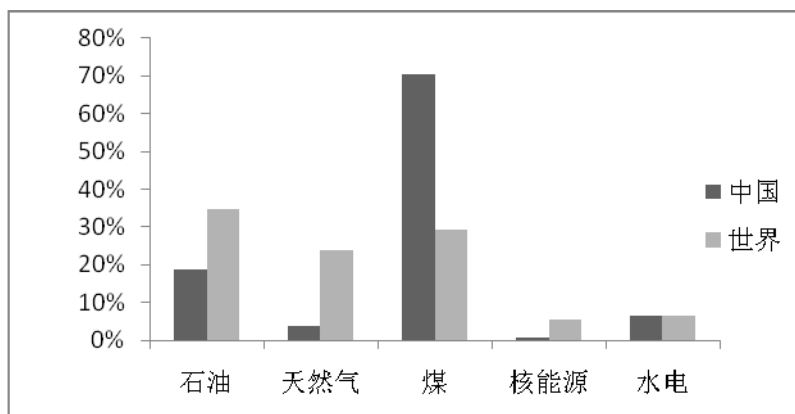


图4. 2009年我国能源结构和世界能源结构比较

数据来源: BP 能源统计

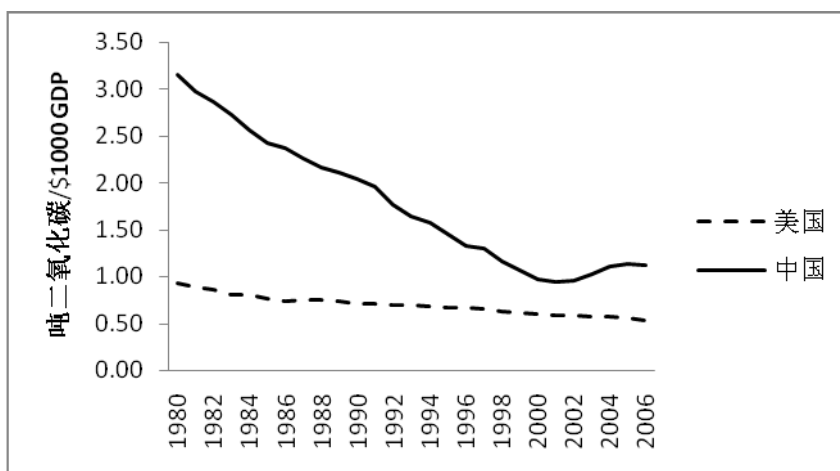


图5. 中美单位GDP二氧化碳密度比较(1980-2006)

数据来源: 美国能源部

第三部分 可再生性能源发展现状和存在问题

1. 我国可再生能源潜力和开发现状

目前我国能源结构以煤炭、石油等不可再生资源为主，这是一种不可持续的结构，如果没有政策干预，任这种趋势继续下去，将会威胁到经济发展，能源安全和环境保护。要降低不可再生性能源在能源消费中的比例，就要相应的提高可再生能源的使用比例。可再生能源是指经利用消耗后可以不断得到补充、“再生”的能源。这类能源有太阳能、水能、风能、地热能、生物质能、海洋能、潮汐能等。我国可再生资源比较丰富，根据初步资源评价，我国资源潜力大、发展前景好的可再生能源主要包括水能、生物质能、风能和太阳能。根据 2003 年全国水力资源复查成果，全国水能资源技术可开发装机容量为 5.4 亿千瓦，年发电量 2.47 万亿千瓦时；经济可开发装机容量为 4 亿千瓦，年发电量 1.75 万亿千瓦时；生物质资源可转换为能源的潜力约 5 亿吨标准煤；全国陆地可利用风能资源 3 亿千瓦，加上近岸海域可利用风能资源，共计约 10 亿千瓦；全国三分之二的国土面积年日照小时数在 2200 小时以上，年太阳辐射总量大于每平方米 5000 兆焦，属于太阳能利用条件较好的地区；全国可采地热资源量约为 33 亿吨标准煤（《可再生能源中长期发展规划》，2007）。

可再生能源是一种重要的能源资源，中国政府也较早意识到其成为未来新兴能源的巨大潜力。在近年来的国际能源危机和气候变化的大环境下，可再生能源被中国政府定位为“缓解能源供需矛盾、减轻环境污染、调整能源结构、转变经济增长方式和促进社会主义新农村建设的重要途径”。从八五规划开始，可再生能源已经成为能源发展的重点，1995 年国家科委、计委和经贸委共同制订了《中国新能源和可再生能源发展纲要（1996-2010）》。2005 年《可再生能源法》的颁布，标志着我国可再生能源发展进入了一个新的历史阶段。2007 年《可再生能源中长期发展规划》进一步明确了我国可再生能源未来十五年的总体目标，即“提高可再生能源在能源消费中的比重，解决偏远地区无电人口用电问题和农村生活燃料短缺问题，推行有机废弃物的能源化利用，推进可再生能源技术的产业化发展。”

表格1是我国“十一五”和中长期的可再生能源规划目标以及目前的产业发展状况。到2008年底，可再生能源年利用量总计约为2.5亿吨标准煤(不包括传统方式利用的生物

质能)，约占一次能源消费总量的9%，比2005年的7%左右上升了2个百分点，其中水电为1.8亿吨标准煤，太阳能、风电、现代技术生物质能利用等提供了7000万吨标准煤的能源。虽然我们还没有2010年的统计数字来考察十一五期间的规划目标实现情况，但可以根据现有数据推测，总体上实现规划指标的问题不大。产业发展状况方面，水电技术成熟，产业化程度高，盈利稳定，目前仍是可再生能源的主体，占到了年利用量的70%以上。风电在十一五期间迅猛增长，2009年累计装机就已经超过2500万千瓦，预计2010年就可能达到2020年的3000万千瓦的预定目标。太阳能利用方面，我国是全球太阳能热水器生产量和使用量最大的国家。太阳能热水器已基本实现了商业化，并带动了玻璃、金属、保温材料等相关行业的发展，成为一个产业规模迅速扩大的新兴产业。太阳能光伏发电产业发展还很落后，不具备核心技术，生产的太阳能电池虽然产量世界第一，但由于成本较高，只能出口，真正并网型的太阳能光伏市场远未形成。

表1 我国可再生能源中长期发展目标和产业发展状况

	十一五末目标	2020年目标	产业目前发展状况
水电	装机容量 1.9 亿千瓦	装机容量 3 亿千瓦	产业化程度高，非常成熟，利润高。
风电	总装机容量 500 万千瓦	总装机容量 3000 万千瓦	规模不断增长，预计 2010 年即可完成 2020 年的装机目标，但成本高，依靠政府补贴能维持收支平衡。
太阳能	太阳能发电 30 万千瓦；太阳能热水器及其他年替代能源 3000 万吨标准煤	太阳能发电 180 万千瓦；太阳能热水器及其他年替代能源 6000 万吨标准煤	热利用较为成熟，处于世界领先地位；光伏发电受高成本制约，产业化程度远远不够。
生物质燃料	固态成型燃料年利用量 100 万吨；生物乙醇年利用量 200 万吨，生物柴油 20 万吨	固态成型燃料年利用量 5000 万吨；生物乙醇年利用量 1000 万吨，生物柴油 200 万吨	处于研制阶段或者试点推广阶段，未达到产业化。

资料来源：《可再生能源发展“十一五”规划》，《可再生能源发展中长期发展规划》，《2009-2010年中国新能源产业发展研究年度报告》。

根据初步分析判断，要实现2020年可再生能源消费比重达15%的目标，我国届时水电装机要达到3亿千瓦以上，核电投运装机达到6000万千瓦至7000万千瓦以上，风电、太阳能及其他可再生能源利用量达到1.5亿吨标准煤以上。考虑到我国的资源情况和目前行业发展状况，水电在未来一段时间内仍然是可再生能源的主体，而风电目前已经具备了一定的产业规模，太阳能具有很大的潜力。

2. 可再生能源开发中面临的一些问题

(1) 开发成本比较高，市场风险大，和传统能源相比不具备竞争优势。近年来，我国风能、太阳能等新能源迅速发展，已经成为世界风电装机第二大国、太阳能电池生产第一大国，但在基础研发领域投入明显不足，核心技术依赖国外，自主创新能力薄弱。在风电制造领域，主要设备要从国外进口，大大增加了初始资本的投入，国产设备的质量和运行可靠性存在一定的问题。在光伏产业领域，同样由于核心技术研发滞后，生产成本居高不下，我国在这一产业分工链条的低端，负责生产高能耗、高污染的太阳能电池，而国外则生产清洁的能源。

(2) 风电、太阳能发电接入电网困难，运行效率低。我国风电装机容量2010年已经超过约为3000万千瓦，但接入量为1600万千瓦，很大部分的电量因无法并入现行电网到达最终用户而浪费掉。另一方面，风电运行效率低下。2007，美国风电容量是1660万千瓦，生产了3400亿千瓦时的电力；而我国风电容量是560万千瓦，生产了536亿千瓦时的电力。也就是说，美国风电运行效率是我国的两倍以上。

(3) 水电开发中片面考虑经济利益，忽视开发给环境和生态的负面影响。我国水电能源主要分布在西部地区的大江大河上，而这些地方经济发展相对落后、生态环境又比较脆弱。如何协调好水电开发和环境保护之间的关系，是一个重要的问题。水电开发对生态与环境可能造成的主要危害包括：1) 引发地质灾害。一些地区地质地貌特色特殊，建设水坝以及一些配套项目（例如大型料厂的开山取石/引水涵洞以及大型基坑的

开挖，弃渣的堆放等）的实施，可能造成严重的地质灾害隐患；2）破坏动植物生活环境，带来生态多样性和旅游景观资源的损失；3）侵占土地、形成移民压力；4）加剧水土流失（于代松，2005）。如果不在建设之前对环境影响进行评估而贸然上马，所造成的环境破坏是巨大甚至是不可逆转的。

第四部分 发展可再生能源的政策建议

(1) 加强可再生能源开发利用领域的科技进步，降低可再生能源的生产成本，这是可再生能源可持续发展的关键所在。目前我国的可再生能源行业除水电、太阳能热水器外还处于起步阶段，无法与传统能源行业竞争，政府投资、政策支持是可以帮助其发展。但能源的选择最终要交由市场去决定，由各种能源的相对成本来决定。解决可再生能源高成本的关键因素是依靠科技创新，尤其是自主创新，加大基础研发和成果转化的投入。科技创新的研发一般周期长、投资大、风险高，又具有正的外部性，政府应该使用各种财政、税收政策来鼓励企业投资自主研发。

(2) 改善可再生能源的市场竞争环境，促进产业发展，建立稳定的市场需求。由于目前大多数可再生能源和传统能源如煤炭相比，不具备价格优势和市场竞争能力。一方面，我们应该推进建立合理的能源价格机制，去除目前存在的或明或暗的补贴，使得不可再生能源如化石能源的价格能够真正的反映其稀缺程度和环境外部性，从而降低可再生能源进入市场的壁垒。另一方面，也可以采取优惠的价格政策和强制性的市场份额政策来稳定的增加对可再生能源的需求，来帮助产业能规模生产，最终降低其生产成本到能和传统能源价格竞争。风电并网难主要是相关电力企业没有足够的动力购买风电。风电电流不稳定，对电网损伤很大，而并网需要对相关设备和电网进行改造，需要的资金量很大，这损害了相关企业购买的积极性。使用强制性行政手段要求电网企业或者发电企业在一定时期内可再生能源发电要达到一定比例或者以一个固定电价收购全部或者部分可再生能源发电，可以在产业发展初期保证市场份额，帮助其发展。

(3) 加强可再生能源开发利用的统筹规划，不仅要重视经济利益，更要重视环境和社会效益。据估计，为了完成 2020 年的碳减排目标，十二五期间，需要开工的水电至少要在 1 亿千瓦以上。短时间、大规模的建设水电项目需要提前慎重考虑其可能带来的

负面影响。水电开发应该考虑综合开发模式，不仅要考虑技术可能性、经济效益，更应充分考虑水资源的生态功能、环境功能和文化功能。在建设之前，就要对可能产生的生态环境影响和社会文化影响作出评估，在建设后，要对河流生态系统产生的影响采取恢复性措施。一方面，我们要依靠政府管理，认真执行《建设项目环境保护条例》，做到在水坝建设前，由国家环境保护主管部门进行环境可行性研究和评价，并且将水坝建设可能影响到的各利益方都引入到评价中来。另一方面，也可以发挥市场机制对环境影响较小的水电进行区别，为环境影响较小的水电打上标志，以帮助其在市场上获得认可。

附录一 二氧化碳排放、能源消费和经济增长关系的实证研究

1. 模型与数据

向量自回归模型 (VAR) 和误差修正模型 (ECM) 是检验变量之间格兰杰因果关系的常用方法。如果变量都是 $I(1)$ (一阶单整) 且没有协整关系, 我们可以用这些变量的一阶差分估计一个 VAR 模型; 如果变量之间存在协整关系, 我们可以应用 ECM 模型。但是在应用这两种方法前, 无论变量是单整的、协整的或者平稳的都需要提前进行检验。Toda (1995) 指出在有限样本中针对 Johansen-type ECM 模型的协整秩的检验对多余参数的值非常敏感。因此基于 ECM 的因果推断可能遭受严重的事前偏误。由 Toda-Yamamoto 提出的扩展 VAR 模型很好的解决了上述方法中可能存在的偏误 (以下称 TY 模型)。Toda and Yamamoto (1995) 指出 TY 方法无需考虑变量是否是 $I(0)$ 、 $I(1)$ 或协整, 而只需要决定所有变量序列的最大单整阶数 d_{\max} , 然后据此建立一个 $(k+d_{\max})$ 阶 VAR 模型 (k 是模型的真实滞后阶数, 且要求 $k \geq d_{\max}$), 从而避免了协整检验可能出现的偏倚对格兰杰因果检验结果的扭曲。Toda and Yamamoto 从理论上证明根据前 k 个系数构建 wald 统计量服从于标准的 χ^2 分布, 据此我们可以用扩展 wald 检验来判定每一方程右边的变量是否是左边变量的长期格兰杰因果关系。综上, TY 方法是一个方便简单的检验变量间长期格兰杰因果关系的方法。

基于数据的获取, 我们的研究时间跨度限制在 1960 至 2003 年间。除了名义 GDP 数据、能源消费, 我们也将二氧化碳排放量和开放度纳入模型中。二氧化碳排放量 (C) 数据从 world development indicators database 获得, 名义 GDP 数据、能源消费 (E) 和开放度 (F) 从新中国 55 年统计资料汇编 (1949-2004) 获得。实际人均 GDP (Y) 是以 2003 年作为基期用 GDP 平减指数调整名义 GDP 数据获得; 开放度 (F) 是实际进出口总额与实际 GDP 比值, 基期为 2003 年。实际人均 GDP 的单位是元, 二氧化碳排放量的单位是万吨, 能源消费单位为万吨标准煤。其中, 二氧化碳排放量 (C)、能源消费 (E) 和人均 GDP (Y) 用的是自然对数值。

2. 实证结果

在应用 TY 方法之前，我们首先要做的是通过单位根检验确定这些变量的最大单整阶数。我们采用两种不同单位根检验方法，分别是 ADF 检验和 KPSS 检验。ADF 检验零假设是序列有单位根，KPSS 检验零假设是序列是平稳的。表一报告了单位根检验的结果，二氧化碳排放 (C)、实际人均 gdp (Y)、能源消费 (E) 和开放度 (F) 均是一阶单整的，从而，我们确定 $d_{max}=1$ 。

表 1 单位根检验结果

		ADF	KPSS
原序列			
截距	C	-0.8429 (3)	0.7920***
	Y	0.3552 (0)	0.8260***
	E	-1.4505 (3)	0.7985***
	F	1.8222 (0)	0.7973***
截距和趋势	C	-2.9627 (1)	0.1391*
	Y	-1.7745 (1)	0.2175***
	E	-3.1471 (1)	0.1358*
	F	-1.1864 (0)	0.2049**
一阶差分序列			
截距	C	-4.7390*** (0)	0.1747
	Y	-7.0581*** (0)	0.5295**
	E	-5.5398*** (0)	0.1860
	F	-5.1312*** (0)	0.5272**
截距和趋势	C	-3.9170** (0)	0.1430*
	Y	-6.7701*** (0)	0.1799**
	E	-5.3336*** (0)	0.1531**
	F	-5.7829*** (0)	0.0490

注：滞后阶数由 SIC 准则决定在括号中表示。上标*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%下显著。
KPSS 的零假设是序列是平稳的，其他检验的零假设均是序列有单位根。

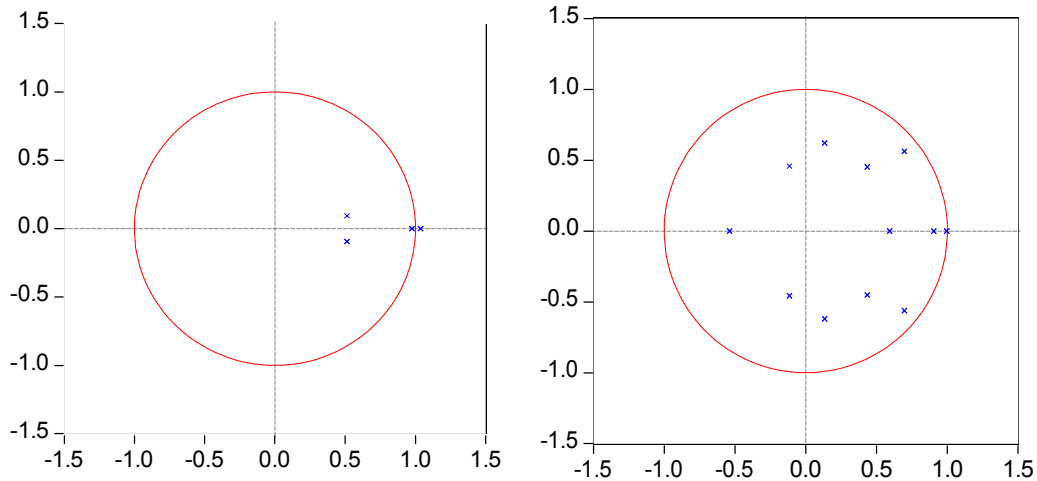
为了确定水平 VAR 模型的最佳滞后阶数，我们选取了五种不同滞后阶数评判准则，他们分别是 LR、FPE、AIC、SC 和 HQ。SC 准则显示最佳滞后阶数为 1，LR、FPE、AIC 和 HQ 准则显示最佳滞后阶数为 3。而根据图 1 的稳定性检验，VAR（3）模型的全部根的倒数都落在单位园以内，因此，VAR（3）模型的稳定性条件得以满足，而 VAR（1）模型有一个根的倒数落在单位圆外，说明 VAR（1）模型不稳定。所以我们确定水平 VAR 模型的滞后阶数为 3。

表2 水平VAR模型最佳滞后阶数检验结果

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	120.9095	NA	3.40e-08	-5.845477	-5.676589	-5.784412
1	319.1955	347.0005	3.76e-12	-14.95978	-14.11534*	-14.65445
2	345.3868	40.59643	2.32e-12	-15.46934	-13.94935	-14.91976
3	367.6267	30.02395*	1.81e-12*	-15.78134*	-13.58579	-14.98750*
4	380.4623	14.76086	2.43e-12	-15.62311	-12.75202	-14.58502

注：上标“*”表示被标注的数值所在行对应的滞后阶数即为该数值所在列的检验标准推荐的最佳滞后阶数。

图 1 VAR 模型的稳定性检验



注：左图为 VAR（1）模型，右图为 VAR（3）模型。

基于上述分析，我们按照 Toda-Yamamoto 方法，建立 4 阶 ($k+d_{\max}=4$) VAR 模型

$$V_t = \alpha_v + \beta_1 V_{t-1} + \beta_2 V_{t-2} + \beta_3 V_{t-3} + \beta_4 V_{t-4} + \varepsilon_{vt} \quad (1)$$

其中 $V_t = (C_t, E_t, Y_t, F_t)'$ ， α_v 是一个 (4×1) 常数向量， $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 是 (4×4) 系数矩阵， ε_{vt} 表示白噪声残差。通过 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ，构建扩展 wald 统计量对变量间因果关系进行检验，结果见表 3。

表 3 格兰杰因果检验结果

被解释变量	C	Y	E	F
C	—	5.73396	8.458077**	6.504128*
Y	1.79034	—	2.54789	1.1715
E	1.84925	5.28123	—	6.504128*
F	0.91311	4.73611	2.64766	—

注：上标*、**和***分别表示在 10%、5%和 1%下显著。显著代表列变量是行变量的格兰杰原因。

参考文献

Beaudreau, B.C.. 1995. The Impact of Electric Power on Productivity: the Case of U.S. Manufacturing 1958–1984, *Energy Economics* **17**,pp. 231–236

Grossman, G. M. and Krueger.A. B.,1991. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. NBER Working Paper Series, Vol. 3914.

Hiro Y. Toda. 1995. Finite Sample Performance of Likelihood Ratio Tests for Cointegrating Ranks in Vector Autoregressions. *Econometric Theory*, 11.

Hiro Y. Toda, Taku Yamamoto, Statistical Inference in Vector Autoregressions with Possibly Integrated Processes, *Journal of Econometrics*, Volume 66, Issues 1-2

Rothman D.S.. 1998. Environmental Kuznets Curves--Real Progress or Passing the Buck?: A Case for Consumption-Based Approaches, *Ecological Economics*, Volume 25, Issue 2.

Soytas U., Ramazan S., Bradley T. E.. 2007. Energy Consumption, Income, and Carbon Emissions in the United States, *Ecological Economics*, Volume 62.

British Petroleum, 2010. Statistical Review of World Energy.

International Energy Agency. 2009. World Energy Outlook.

U.S. Energy Information Administration. 2010. International Energy Outlook.

林伯强. 2001. 中国能源需求的经济计量分析. *统计研究*, 2001 (10).

马超群, 储慧斌, 李科, 周四清. 2004. 中国能源消费与经济增长的协整与误差校正模型研究. *系统工程* 2004 (2).

胡锦涛, 2009. 携手应对气候变化挑战——在联合国气候变化峰会开幕式上的讲话. 美国纽约:2009年9月22日.

赛迪顾问有限公司, 2010. 2009–2010年中国新能源产业发展研究年度报告.

谢治国, 胡化凯, 张 逢. 2005. 建国以来我国可再生能源政策的发展. *中国软科学* 2005 (9).

王海鹏, 田澎, 靳萍. 2006. 基于变参数模型的中国能源消费经济增长关系研究. *数理统计与管理*, 2006 (3).

于代松. 2005. 川西水电开发对生态与环境的影响分析及建议. *理论前沿*. 2005 (8).