

## 能源转型碳减排效益的货币价值化评估

胡春璇<sup>1,2</sup>, 黄杰<sup>2</sup>, 薛禹胜<sup>2</sup>, 李天然<sup>1</sup>, 宋晓芳<sup>2</sup>, 赖业宁<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏省南京市 210023;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106)

**摘要:** 气候变化已成为人类可持续发展面临的核心挑战, 低碳能源转型已成为减缓气候变化的关键举措。碳减排是能源转型的关键效益之一, 若能对其进行货币价值化评估, 将有助于在统一货币量纲下, 对不同能源转型目标和路径进行成本效益分析。分析了国际主流碳排放货币价值化评估方法, 认为碳排放社会损失更适用于长期能源转型问题的评估。进而, 对碳排放社会损失评估模型中社会经济、气候变化、损失评估、结果折现各子模块进行了详细介绍, 并明晰了评估模型的不确定性来源。最后, 选择典型评估模型对中国碳排放社会损失进行了试算, 并对折现率这一关键参数进行了灵敏度分析, 为能源转型方案碳减排效益货币价值化提供了评估思路。

**关键词:** 能源转型; 碳排放; 成本效益; 货币价值化; 综合评估模型

### 0 引言

随着全球气候变化与人类工业活动的关系逐步被证实, 气候变化已成为人类可持续发展面临的核心挑战, 减少人类工业活动所产生温室气体排放的呼声愈演愈烈<sup>[1]</sup>。第21届联合国气候变化大会上达成的《巴黎协定》中, 各国同意将全球气温相对于工业化前水平的升幅控制在 $2^{\circ}\text{C}$ 内, 并努力控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 内。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2018年10月8日在韩国仁川发布《IPCC全球升温 $1.5^{\circ}\text{C}$ 特别报告》<sup>[2]</sup>指出: 相比 $2^{\circ}\text{C}$ 目标, 将全球变暖控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 将减少生态系统、人类健康和福祉面临的挑战性影响, 这意味着全球温室气体排放量必须在2030年前减少至平均 $2.5 \times 10^9 \sim 3.0 \times 10^9$  t二氧化碳当量(较2010年水平下降约45%), 并于2050年左右实现净零排放。

根据国际能源署的统计, 人类能源活动所产生的温室气体排放是全球人类活动所产生碳排放量的最主要贡献者(约占全球碳排放总量的58%)<sup>[3]</sup>, 低碳能源转型将成为减缓气候变化的关键举措, 其根本任务是构建清洁、低碳的新型能源体系, 目前已有超过170个国家制定了本国的清洁能源发展目

标<sup>[4]</sup>, 中国也在积极响应全球能源转型革命的号召, 根据自身国情、发展阶段、可持续发展战略和国际责任担当制定了目标: 要求在2021—2030年期间将非化石能源消费总量比重达到20%左右, 天然气占比达到15%左右, 碳排在2030年左右达到峰值并尽早达峰, 单位国内生产总值二氧化碳的排放要比2005年下降60%~65%<sup>[5]</sup>。碳减排量将是能源转型的关键效益之一, 若能对碳排放进行货币价值化评估, 将有助于在统一货币量纲下, 对不同能源转型目标和路径进行有效的成本效益分析。

### 1 碳排放货币价值化方法

碳排放货币价值化与碳定价是两个不同的概念。碳排放货币价值化旨在将对碳排放的物理影响转换至货币量纲来进行评估, 而碳定价(例如碳税和碳市场)则是落到实处的碳减排机制。原则上, 碳排放货币价值化可为碳减排相关的政策机制的制定提供决策依据(例如作为碳税的定价依据), 而非一种具体的碳减排措施。

在短期的企业运营决策优化时, 尚可采用碳市场/碳税价格对碳排放进行货币价值化。然而, 在针对能源政策制定、能源转型路径优化这类长期宏观决策问题时, 由于碳市场/碳税价格并不能反映应对气候变化的物理机理, 不能被用来对碳排放物理影响进行货币价值化。

目前国际上用于辅助政策制定的碳排放货币价值化方法主要有两类: 通过评估边际碳减排成本(marginal abatement cost, MAC)与碳排放社会损失

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-07-03。

上网日期: 2019-08-13。

国家电网公司科技项目“电力转型对能源转型主动支撑——以青海省为例”; 江苏省研究生培养创新工程项目(KYCX19\_0804)。

(social cost of carbon, SCC)来实现。其中,MAC方法评估事前的主动控制成本,对应的是为减少给定碳排放量所对应的边际控制成本;SCC方法评估事后的被动社会损失,对应的是每增加单位碳排放量所造成的经济损失。

需要强调的是,虽然大部分文献将SCC译为“碳排放社会成本”,但由于SCC本质上是被动的社会损失,而并非为实现某一价值而付出的经济成本。因此,在本文中,为明晰SCC与MAC在评估机理上差异,统一将SCC译为“碳排放社会损失”。

### 1.1 方法原理

#### 1)MAC

MAC是指额外减少单位二氧化碳排放所需付出的经济成本。为评估MAC,首先需要根据不同措施的减排潜力和MAC来绘制边际碳减排成本曲线(marginal abatement cost curve, MACC)<sup>[3]</sup>。最著名且广泛使用的MACC由麦肯锡公司于2007年在国家层面编制<sup>[6]</sup>。麦肯锡公司2013年给出的全球MACC如附录A图A1所示<sup>[7]</sup>。

MACC中每个区块对应一项或一类碳减排措施。横坐标对应碳减排潜力,每个区块的宽度对应其潜在碳减排量;纵坐标对应碳减排成本,不同措施对应区块的高度即为其平均减排成本,按平均减排成本从低到高排序,累加成的MACC能够刻画不同减排目标所对应的MAC。所有区块宽度总和对应总碳减排潜力,区块面积表示给定碳减排目标对应的总减排成本。MACC可采用两种方法构建:一种是依靠专家知识评估各种减排措施的成本与减排潜力;另一种则是通过能源模型计算来获得MACC。

#### 2)SCC

美国环境保护署对SCC的定义是:新增单位二氧化碳排放所带来损失在某年的货币价值<sup>[8]</sup>。更准确地说,SCC是在 $t$ 时刻每增加1t的CO<sub>2</sub>排放,所造成全球气候变化带来的损失在 $t$ 时刻的净现值。这种损失包括气候变化对经济增长带来的直接损害以及对环境、生态、人类健康的非直接经济损失<sup>[9]</sup>。

### 1.2 时空特性

#### 1)时间特性

MAC评估模型主要描述不同措施的减排潜力和减排成本。目前MAC的评估十分依赖专家对技术进步的主观判断,一般以年为评估的时间步长,时间跨度从数年到数十年不等。

SCC评估模型描述的是社会经济、排放活动与气候系统的交互过程,因此其模型的时间尺度一般与气候系统中碳循环的时间尺度相近,一般以年为评估的时间步长,评估的时间跨度从数十年到上百年不等。

#### 2)空间特性

可从排放源头、排放控制者、排放受害者三方面讨论2种评估方法的空间特性。

在排放源头方面,由于气候变化是全球性现象,原则上无论何处产生的碳排放对气候变化的影响是同质的,因此SCC对排放源头不敏感。而MAC旨在评估减排成本,因此不涉及排放源头的选取问题。

在排放控制者方面,由于SCC主要评估增量碳排放的影响,目前模型中并未对碳排放控制进行细致的考虑,因此对排放控制者不敏感;而由于MAC是评估主动控制措施,因此对排放控制者十分敏感,涉及可实施措施的成本和减排潜力。

在排放受害者方面,由于不同区域、不同发展水平国家受气候变化的影响程度显著不同,因此SCC评估结果对排放受害者敏感,而MAC本身不涉及损失评估,因此对排放受害者不敏感。

根据其计算原理,MAC和SCC只适用于对边际碳排放/碳减排量的评估,不适用于对存量碳排放的评估。此外,对MAC而言,基于专家知识的MACC制定方法仍存在较多问题,一是过于依赖专家自身偏好与主观判断;二是单纯的技术累加不能体现技术对转型路径的依赖性与技术锁定效应。因此,基于仿真模型对MACC进行评估,已经成为学术界的新趋势<sup>[10]</sup>。

低碳能源转型实质上就是一系列碳减排措施的结果,不同转型目标对应着不同的碳减排量,也对应着不同能源转型成本。因此,为实现不同碳减排目标所需付出的能源转型成本,实质上就是MAC在能源转型范畴的具体体现,SCC更适合用来评估碳减排效益。

一般而言,所实现碳减排量越高,MAC取值则越高,而对应碳排放水平下的SCC取值则越低。原则上,可以找到某一碳排放水平,此时MAC与SCC的取值相等,对应着全社会福利最大化,其取值可以作为碳定价设定的依据。

## 2 基于综合评估模型评估SCC

目前,SCC的评估主要采用Nordhaus所倡导的综合评估模型(integrated assessment model, IAM)<sup>[11]</sup>,Nordhaus也因其其在气候变化研究中的杰出贡献获得了2018年诺贝尔经济学奖。IAM是环境科学和环境政策分析常用的一种建模方法,旨在将相关的多领域知识在统一的框架下进行整合,包括但不限于:气候模型、生物地球化学模型、经济模型、人口模型。IAM的优势就在于它可以计算不同外部假设条件下以及多个因素同时相互作用时的结果<sup>[12]</sup>。仍处于早期发展阶段的IAM仍有很大的完善空间,但依然是目前进行碳排放货币价值化可

实施性最强的方法之一,在自洽性、完备性和可行性几方面较为均衡。本节将以文献[13]提出的IAM为例,对典型的SCC评估框架进行详细介绍。

## 2.1 典型评估框架

IAM一般包含4个功能模块,具体如下。

1)社会经济模块,用以确定社会经济发展与碳排放量的响应曲线。

2)气候模块,用以评估碳排放量对气候系统的影响,表现为全球气温的响应曲线。

3)损失模块,用以评估气候变化所造成的社会经济损失。

4)折现模块,用以将多年度损失值折现至目标年份的净现值。

附录B图B1描述了基于IAM评估SCC的基本原理与步骤<sup>[13]</sup>。评估SCC将涉及2个关键场景的对比分析:①基准场景评估,根据基准人均国内生产总值(GDP)发展情景以及与其对应的全球CO<sub>2</sub>排放情景,评估气温响应轨迹及其对社会经济的影响;②摄动场景评估,通过在某年摄动(例如图B1中2020年)单位全球CO<sub>2</sub>排放(例如1 Gt的CO<sub>2</sub>当量),评估摄动后的气温响应轨迹及其对社会经济的影响。通过对基准场景和摄动场景评估结果的对比分析,可以计算出增量CO<sub>2</sub>排放对社会经济的影响,进一步通过折现模块评估社会经济影响在某年的净现值,可得出SCC的评估结果。图中的绿色阴影区为计算中采取不同模型集组合导致的计算结果不确定性。

## 2.2 社会经济模块

在该模块中,采用共享社会经济路径(shared socio-economic pathway, SSP)来刻画社会经济未来发展情景<sup>[14]</sup>。SSP目前内置了5种社会经济发展情景,不同SSP之间的主要差异体现在人口增长、受教育机会、城市化、经济增长、可用资源、技术发展和需求驱动因素(如生活方式变化)的不同假设(如图1所示)之上,用以描述社会经济的不同基线发展情景<sup>[15]</sup>。

## 2.3 气候变化模块

采用代表性浓度路径(representative concentration pathway, RCP)来刻画不同气候变化情景<sup>[16]</sup>。RCP情景由全球不同的气候研究所建模开发,旨在作为气候和大气化学模型的输入参数<sup>[17]</sup>。4种RCP情景如表1所示。

SSP情景与RCP情景共同决定了SCC评估的情景输入。一般而言,SSP情景与RCP情景的排列组合可以构成不同的输入情景,但由于SSP与RCP在关键参数上存在耦合关系,因此,需要进一步提升情景组合的合理性。

文献[13]通过评估每个SSP情景对应的辐射

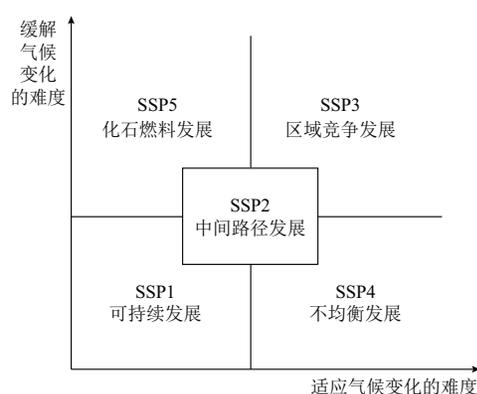


图1 不同SSP情景适应/缓解气候变化的差异  
Fig.1 Climate change adaptation/mitigation differences with different SSPs

强迫水平,并与每个RCP情景对应的辐射强迫水平进行比较,将辐射强迫水平相近(根据轨迹的欧式距离测算,如附录C图C1所示)的SSP情景与RCP情景进行组合<sup>[14]</sup>。最终获得的5个组合情景分别是SSP1-RCP6.0, SSP2-RCP6.0, SSP3-RCP8.5, SSP4-RCP6.0, SSP5-RCP8.5。这5个情景共同组成了基准场景。

表1 不同RCP情景的关键特征  
Table 1 Key features of different RCP scenarios

情景	2010—2100年辐射强迫	温室气体排放
RCP2.6 (缓解)	2100年前达辐射强迫峰值3 W/m <sup>2</sup> , 随后减少,至2100年为2.6 W/m <sup>2</sup>	很低
RCP4.5 (中等)	2100年后辐射强迫稳定在4.5 W/m <sup>2</sup>	很低
RCP6.0 (中等)	2100年后辐射强迫稳定在6 W/m <sup>2</sup>	中等
RCP8.5 (严重)	2100年辐射强迫稳定增长 至8.5 W/m <sup>2</sup> 并继续增长	高

该模块将计算出不同基准场景下的CO<sub>2</sub>排放水平演化轨迹,在此基础上,可基于内置的碳循环模型给出不同摄动场景下的CO<sub>2</sub>排放水平演化轨迹。

## 2.4 损失评估模块

在本模块中,需要刻画气候变化对社会经济的定量影响。一般基于历史宏观数据拟合定量关系的计量经济模型。

### 1) DJO 损失函数

文献[18]基于国家层面历史数据发现气温变化与经济增长之间存在线性关系,并且气温变化对贫穷国家的负面影响要高于富裕国家(对富裕国家的影响接近于零)。据此提出的DJO(Dell-Jones-Olken)损失函数采用一次函数拟合了全球各国气温变化和经济增长之间的定量关系,如式(1)所示。

$$G_{i,t} = G_{i,t-1} [1 + \eta_{i,t} + \delta_{i,1} (T_{i,t} - T_i)] \quad (1)$$

式中: $G_{i,t}$ 为第*i*国在第*t*年的GDP绝对值; $\eta_{i,t}$ 为不考虑气温变化影响下,第*i*国在第*t*年的GDP增长率; $T_i$ 为第*i*国的气温起始值; $T_{i,t}$ 为第*i*国在第*t*年的气温; $\delta_{i,1}$ 为气温增量影响的一次项系数(富裕国家取值为0,贫穷国家取值为-1.394 202)。

## 2) BHM 损失函数

文献[19]指出温度增长与经济增长之间的非线性关系更为显著,据此提出的BHM(Burke-Hsiang-Miguel)损失函数采用非线性二次函数拟合了全球各国气温变化和经济增长之间的定量关系,如式(2)所示。

$$G_{i,t} = G_{i,t-1} [1 + \eta_{i,t} + \delta_{i,1}(T_{i,t} - T_i) + \delta_{i,2}(T_{i,t}^2 - T_i^2)] \quad (2)$$

式中: $\delta_{i,2}$ 为气温增量影响的二次项系数,按国家富裕与否、是否存在影响时滞,分别取不同的经验值。在BHM方法中,区分贫穷与富裕国家的收入门槛为1980年使用的世界发展指标(world development indicators, WDI)数据集的人均GDP中值(20 715美元)。

## 2.5 结果折现模块

折现的目的是将损失评估模块输出的多年度损失评估结果,折算至给定年度的净现值。其中,折现方法和参数选择,是SCC评估结果的主要决定因素之一。

目前普遍采用2种方式进行折现,一种是采用固定折现率(常用取值有2.5%,3%,5%);另一种是采用可变折现率,模拟折现率受其他因素的影响,例如国家平均经济增长率,如式(3)所示。

$$D = \rho + \mu g \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为纯时间偏好率; $\mu$ 为边际效用弹性; $g$ 为国家平均经济增长率; $D$ 为可变折现率。

## 2.6 不确定性来源

文献[20]从模型与参数、观点、行为几方面对不确定性来源进行了详细分类,本文将聚焦模型与参数,对SCC评估不确定性来源进行分析。

### 1) 模型边界

SCC评估涉及气候系统与社会经济系统之间的复杂交互效应,在当前的认知和技术水平下,为确保评估的可行性,必须将复杂大问题解耦为若干子模块间相对简单的交互,如前文所述的社会经济、气候变化、损失评估、结果折现等子模块。不同子模块所采用的模型取自不同学科的研究成果。而不同子模块对边界条件处理方式的不一,将为SCC评估引入不确定性。

外部因素的扰动(经济、政治、社会、技术环境等)也会对模型边界的确定造成影响。例如人类活动干预是影响碳排放变化轨迹一个不可忽略的因素。人类活动可能会造成大范围的碳排放波动,如

引发大型山林火灾等;也可能因未来人类技术水平的进步,有了更为成熟的能源使用与温室气体处理技术,使得碳排放得到缓解。此种外部影响因素将使得原先设定的边界条件的合理性存疑。

### 2) 模型结构

在对气候变化机理认知仍存在不足的客观情况下,对模型结构的简化处理也会引入不确定性。例如,损失评估模块虽然已经计及了气候变化对农林业、水资源、能源消耗、人类健康的损害,但该清单仍不完整,所采用的一次函数和二次函数拟合处理,与实际情况仍有较大差距。

为规避模型结构不确定性带来的影响,美国政府使用3种IAM模型评估SCC:FUND<sup>[21]</sup>, DICE<sup>[22]</sup>, PAGE<sup>[23]</sup>。FUND对排放路径的差异很敏感,但对GDP路径差异相对不敏感,DICE和PAGE模型则相反<sup>[24]</sup>。

### 3) 模型参数

模型中参数的选取对评估结果有着显著影响。而折现率可能是SCC评估中最重要的影响参数之一。折现率的差异源于人们对时间的偏好率,人均消费增长率和消费边际效用弹性的不同假设都会导致不同的折现率出现。在损失评估模块中,2种损失函数中的系数与折现模块中采取的3种固定折现率、可变折现率中纯时间偏好率与边际效用弹性的取值均可能引入不确定性。

## 3 中国SCC试算

已有文献大都针对全球范围SCC开展评估工作,而目前国家和地区才是碳减排政策措施的具体实施主体,需要更为细致的国家层面SCC评估工作,支撑国家层面碳减排决策。文献[13]认为全球层面SCC(global SCC, GSCC)评估掩盖了国家层面SCC(country SCC, CSCC)的异质性,并通过在损失模块中区分不同国家受气候变化影响的社会经济响应,实现了对CSCC取值的评估,并基于CSCC评估结果求取了GSCC。

2020年CSCC的评估结果显示:印度尼西亚的CSCC最高,其次是美国和沙特阿拉伯。由于北欧、加拿大、前苏联地区目前的气温低于经济最佳值,这些国家的CSCC评估结果为负值。

### 3.1 情景设置与仿真结果

基于文献[13]所提供的R语言源码,本文以5年为间隔,计算了2020—2050年期间的中国CSCC。设置固定折现率2.5%,3%,5%与可变折现率,多情景下的评估结果如附录D表D1至表D4所示。

### 3.2 关键参数灵敏度分析

在2.6节中提到,折现率参数是影响SCC评估

结果的关键因素。本节选取 SSP1-RCP6.0 情景,分析折现率  $D$  不同取值对 SCC 评估结果的影响。

对比附录 E 图 E1 至图 E3 可以发现,在同一情景下,随着固定折现率的增加,SCC 评估结果逐步下降,折现率的增加意味着未来的货币价值相较于目前更加“值钱”,当折算到现值后会越低。

若采用式(3)所述的可变折现率,SCC 评估结果将受到国家增长率的影响(如附录 E 图 E4 所示)。可变折现率图中的 SCC 增长率受国家自身经济增长率的影响逐渐增加,在不同时期呈现出不同的增长速率。

#### 4 结语

本文对国际主流的碳排放货币价值化评估方法进行了回顾,从方法原理、时空特性两方面对 MAC 和 SCC 的评估机理和模型进行了详细分析。进一步,分析了国际上主流的 SCC 评估框架,对其中包含的社会经济、气候变化、损失评估、结果折现模块进行了详细介绍,并对其评估结果的不确定性来源进行了细致梳理。

低碳能源转型的具体实施主体是国家和地区,而客观上气候变化对各国的影响也存在差异。据此,本文跟踪了国家层面 SCC 评估的最新动态,并结合已有模型算法对中国 SCC 进行了试算,并选取折现率这一关键参数进行了灵敏度评估。

低碳能源转型路径优化过程中,需要对不同转型方案的成本效益进行全面评估,实现方案的优选。碳减排量是低碳能源转型的主要效益之一,若不能实现物理减排量的货币价值化评估,则无法进行全面的成本效益评估。在相关气候变化机理模型仍不完备的情况下,虽然仍存在争议,但基于 IAM 的 SCC 评估依然是目前进行碳排放货币价值化可实施性最强的方法之一,在自洽性、完备性和可行性几方面较为均衡,可为能源转型方案碳减排效益货币价值化提供有效评估思路。

本文受到智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放课题“电力市场交易行为分析与市场力辨识”和国电南瑞科技股份有限公司科技项目“综合能源系统仿真评估关键技术研究”资助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

#### 参考文献

[1] 段居琦,徐新武,高清竹. IPCC 第五次评估报告关于适应气候变化与可持续发展的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3):

197-202.

DUAN Juqi, XU Xinwu, GAO Qingzhu. Understanding of climate change adaptation and sustainable development for IPCC fifth assessment [J]. Progress in Climate Change Research, 2014, 10(3): 197-202.

[2] Intergovernment Panel on Climate Change (IPCC). Global warming of 1.5 °C [EB/OL]. [2018-10-08]. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15\\_SPM\\_version\\_stand\\_alone\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf).

[3] 黄杰,薛禹胜,蒋超,等. 碳市场风险的分析与控制:(一)框架设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 11-18. DOI: 10.7500/AEPS20180214002.

HUANG Jie, XUE Yusheng, JIANG Chao, et al. Carbon market risk analysis and control: Part I framework design [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 11-18. DOI: 10.7500/AEPS20180214002.

[4] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等. 关于能源转型分析的评述:(一)转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 1-15. DOI: 10.7500/AEPS20180417008.

SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis: Part one elements and paradigms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15. DOI: 10.7500/AEPS20180417008.

[5] 国家发展和改革委员会,国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030) [EB/OL]. [2016-12-29]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/W020170425509386101355.pdf>.

National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Energy production and consumer revolution strategy (2016—2030) [EB/OL]. [2016-12-29]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/W020170425509386101355.pdf>.

[6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Using marginal abatement cost curves to realize the economic appraisal of climate smart agriculture policy options [EB/OL]. [2012-03-08]. <http://www.fao.org/3/a-bq866e.pdf>.

[7] McKinsey & Company. Pathways to a low carbon economy: version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve [EB/OL]. [2013-09-21]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>.

[8] Electric Power Research Institute (EPRI). EPRI social cost of carbon webcast series-applying the social cost of carbon: technical considerations [EB/OL]. [2017-09-05]. <https://ee.epri.com/pdf/integrated-assessment/SCC%20Application%20Analysis%20-%20EPRI%20Webcast%20final.pdf>.

[9] Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government. Technical support document: social cost of carbon for regulatory impact analysis-under executive order 12866 [EB/OL]. [2010-02-15]. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/scc\\_tsd\\_2010.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/scc_tsd_2010.pdf).

[10] UCL Energy Institute. Marginal abatement cost curves for policy making-model-derived versus expert-based curves [EB/OL]. [2010-06-09]. [http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ueft347/Kesicki\\_MACC.pdf](http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ueft347/Kesicki_MACC.pdf).

[11] WILLIAM N. Estimates of the social cost of carbon: concepts and results from the DICE-2013R model and alternative approaches [J]. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 2014(1/2): 273-312.

- [12] 张雪芹, 葛全胜. 气候变化综合评估模型[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 60-67.  
ZHANG Xueqin, GE Quansheng. Integrated assessment models on climatic changes[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 60-67.
- [13] RICKE K, DROUET L, CALDEIRA K, et al. Country-level social cost of carbon [J]. Nature Climate Change, 2018, 8(10): 895-900.
- [14] O' NEILL B C, KRIEGLER E, RIAHI K, et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways [J]. Climatic Change, 2014, 122(3): 387-400.
- [15] The U. S. Environment Protection Agency, The U. S. Department of Energy's Office of Science. RCPs and SSPs: what are they and where are they going[EB/OL]. [2013-10-02]. [http://www.globalchange.umd.edu/data/gtsp/workshops/2013/Day2/Waldhoff\\_RCP\\_SSP\\_2013-10-02.pdf](http://www.globalchange.umd.edu/data/gtsp/workshops/2013/Day2/Waldhoff_RCP_SSP_2013-10-02.pdf).
- [16] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. Nature, 2010, 463: 747-756.
- [17] The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. AR4 synthesis report: climate change 2014 [EB/OL]. [2014-04-12]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [18] DELL M, JONES B F, OLKEN B A. Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century [J]. American Economic Journal: Macroeconomics, 2012, 4(3): 66-95.
- [19] BURKE M, HSIANG S M, MIGUEL E. Global non-linear effect of temperature on economic production [J]. Nature, 2015, 527: 235-239.
- [20] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述:(二)不确定性及其应对[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 1-12. DOI:10.7500/AEPS20180417009.
- SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis: Part two uncertainties and approaches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 1-12. DOI: 10.7500/AEPS20180417009.
- [21] WALDHOFF S, ANTHOFF D, ROSE S, et al. The marginal damage costs of different greenhouse gases: an application of FUND [J/OL]. Economics [2014-09-01]. <https://core.ac.uk/download/pdf/30613301.pdf>.
- [22] NORDHAUS W D. Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases[J]. Resource and Energy Economics, 1993, 15(1): 27-50.
- [23] DIETZ S, HOPE C, PATMORE N. Some economics of 'dangerous' climate change: reflections on the stern review[J]. Global Environmental Change, 2007, 17(3/4): 311-325.
- [24] Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government. Technical support document: social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866 [EB/OL]. [2016-08-19]. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc\\_co2\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf).
- 胡春璇(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向:碳市场与电力市场。E-mail:hcx\_njnuedu@126.com
- 黄杰(1983—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:碳排放及碳市场风险防控。E-mail:huangjie1@sgepri.sgcc.com.cn
- 薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,国网电力科学研究院名誉院长,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail:xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

### Monetary Value Evaluation for Carbon Emission Reduction Benefit of Energy Transition

HU Chunxuan<sup>1,2</sup>, HUANG Jie<sup>2</sup>, XUE Yusheng<sup>2</sup>, LI Tianran<sup>1</sup>, SONG Xiaofang<sup>2</sup>, LAI Yening<sup>2</sup>

(1. School of NARI Electric and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Climate change has become a core challenge for human sustainable development, and low-carbon energy transition has become a key measure to mitigate climate change. Carbon emission reduction is one of the key benefits of energy transition. If the carbon emission reduction benefit can be evaluated monetarily, the cost-benefit analysis of alternative energy transition goals and paths with the unified currency dimension can be realized. This paper analyzes the mainstream monetary value evaluation method of carbon emission in detail, and proposes the social cost of carbon (SCC) as a more suitable method for the long-term energy transition problems. Furthermore, the sub-modules of SCC assessment are elaborated, including social economy, climate change, damage assessment and discounting modules, and the uncertainty sources of evaluation model are discussed. Finally, a typical SCC assessment model is chosen to calculate the country level SCC (CSCC) in China, and the sensitivity analysis of the key parameter (the discount rate) is provided, which can provide an evaluation methodology of carbon emission reduction benefit for the cost benefit analysis of alternative energy transition plans.

This work is supported by State Grid Corporation of China and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX19\_0804).

**Key words:** energy transition; carbon emission; cost benefit; monetary value; integrated evaluation model

