

跨国电网互联情景下的碳流及碳减排效益研究 ——以非洲能源互联网为例

谭新¹, 刘昌义¹, 陈星¹, 张士宁¹, 杨方¹, 魏超²

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031; 2. 国家气候中心, 北京市 海淀区 100081)

Carbon Flow and Emission Reduction Benefits Based on Grid Interconnection: A Case Study on Africa Energy Interconnection

TAN Xin¹, LIU Changyi¹, CHEN Xing¹, ZHANG Shining¹, YANG Fang¹, WEI Chao²

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. National Climate Center, Haidian District, Beijing 100081, China)

Abstract: The global energy system is undergoing transition. The future energy system is characterized by clean energy and electricity. Therefore, it is necessary to study on the carbon emission reduction accounting methods aiming at the scenarios with large proportion of clean electricity. Based on the traditional concept of carbon flow, this paper defines the “negative carbon flow” for clean power and puts forward the concept of the generalized carbon flow. The carbon emission accounting method is developed for power systems with multiple energy sources from the perspective of consumption side. Based on carbon flow tools, the emission reduction benefits of the clean power transmission under interconnection of power grids can be accurately assessed from the consumer side. Taking the interconnection scenario of African power grids as an example, Africa promotes clean power transmission through interconnection of intra-continental power grids. By 2030, the total amount of “negative carbon flow” will be 27 million tons of CO₂/year, and 87 million tons of CO₂/year by 2050. By 2030 and 2050, it can achieve the benefits of 1.4 billion USD/year and 11.9 billion USD/year respectively, to promote low carbon and sustainable development of Africa.

Keywords: grids interconnection; clean power; carbon flow; emission reduction

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602602); 全球能源互联网集团有限公司科技项目(52450018000Q); 中国气象局气候变化专项(CCSF201738)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFA0602602); GEIGC Science and Technology Project (52450018000Q); CMA Climate Change Special Fund (CCSF201738).

摘要: 全球能源系统正在经历转型, 未来的能源体系中将以清洁能源和电力为主导, 因此有必要研究一套针对清洁能源电力的碳减排核算方法。在传统“碳流”概念的基础上, 针对清洁能源电力提出了广义碳流概念, 以此引申定义了电网互联情景下的负碳流, 并提出了消费侧视角下包含多种能源的电力系统碳排放核算方法。基于碳流工具, 能够从消费侧精确评估电网互联下的清洁电力输送的减排效益。以非洲跨国电网互联情景为例, 非洲通过洲内电网互联促进清洁电力输送, 至2030年总的“负碳流”为2700万t CO₂/年; 至2050年“负碳流”可达8700万t CO₂/年。到2030年和2050年分别可以实现14亿美元/年和119亿美元/年的资金流, 支持非洲低碳可持续发展。

关键词: 电网互联; 清洁电力; 碳流; 减排

0 引言

全球能源系统正在经历低碳转型, 化石能源导致的气候变化和环境问题日益严峻, 以风能、太阳能为代表的可再生能源迅速发展。未来的能源体系中, 一次能源体系将从以化石能源为主导逐步转向以清洁能源为主导^[1-3], 终端能源体系则随着再电气化、信息化和智能化进程加快, 终端电气化率将逐步提升^[4]。同时电网尤其是特高压技术的发展, 使得在国家之间甚至洲际之间传输电力、实现互联互通成为可能, 会大大加快清洁能源开发和电气化进程^[5]。因此有必要研究一套针对未来高比例清洁电力的碳减排核算方法。

本文的目的是研究电网互联互通情景下清洁电力的“负碳流”及减排效益核算方法。本文的研究内容

安排如下：第1章为研究背景。第2章介绍负碳流的概念及定义。第3章介绍多区域间的碳流及减排效益核算方法。第4章以非洲为例，根据洲内各区域的发电结构与电网互联，测算非洲电网互联互通情景下的电力流、碳流及减排资金流。第5章是结论。

1 研究背景

目前无论是联合国气候变化谈判还是各国自主贡献目标实施，传统意义上的温室气体尤其是二氧化碳排放主要是从生产侧来统计核算，能源系统的碳排放主要是通过化石能源消费量和排放因子法来核算^[6]。例如，从排放部门来看，电力是全球排放最大的部门，2014年其二氧化碳排放量占全球排放总量的42%；从排放国别来看，中国超过美国和欧盟成为最大的排放国^[7]。但这类基于生产侧核算排放的方法存在诸多缺陷，如数据收集受限、不确定性大^[8]、忽视消费责任与公平伦理，因而受到各种批评。后来学界进一步将碳排放核算从生产侧扩展到消费侧，提出“隐含能源”（embedded energy）^[9]和“隐含碳”（virtual carbon）^[10]概念，即产品在上游加工、制造和运输等全过程的总能源消耗和总碳排放。在国际贸易的背景下，美国、欧盟等发达国家既是货物净进口国，同时也是隐含能源、隐含碳的净进口国；制造和出口型国家如中国，则是货物、隐含能源和隐含碳的净出口国^[11]。

在电力领域，这种基于生产侧的核算方法将火力发电厂视为点排放源，排放责任都计为发电厂及其所在国家和地区，而实际上电力负荷才是真正的电力消费者和碳排放的责任承担者，因此需要从电力消费侧来核算排放责任，并根据电力系统潮流分析来核算碳排放。针对这一情况，康重庆等创造性地提出了电力系统中“碳排放流”（carbon emission flow，简称碳流）的概念^[12-13]，将电力系统碳排放流定义为依附于电力潮流存在且用于表征电力系统中维持任一支路潮流的碳排放所形成的虚拟网络流^[14]。本质上，碳流是一种从消费侧来衡量电力系统碳排放的方法。从消费侧的角度来看，在一个化石能源发电的电网系统中，发电和电网输送的电力流同时伴随着碳排放的流动，二者方向和排放量完全一致（不考虑网损），即电流从化石能源发电方流向用电方时，碳排放也由发电方流向用电方（如图1所示）。从全系统来看，碳排放总量没有变化，但排放责任发生了转移，从生产方转移

到消费方。在碳流概念的基础上，周天睿等^[15]研究了碳排放流在电力网络中的分布特性与机理，讨论了电力系统碳排放流的计算方法^[16]，康重庆等^[17]应用递推算法来核算实际电力系统中的碳排放流。程耀华等^[18]运用碳流分析方法进一步发展了多种能源系统和网络中碳排放和隐含碳的核算方法。然而，传统碳流概念仅针对化石能源电力，没有考虑清洁能源电力带来的减排效应，也没有考虑电网互联互通带来的清洁能源和电气化的“加速”效应^[19-20]。



图1 消费侧视角的化石能源发电潮流与对应的正碳流

Fig. 1 The carbon flow with fossil fuel power flow from consumption perspective

2 负碳流的概念及定义

针对基于清洁电力输送碳流的研究缺失，本文扩展了碳流的概念和方法体系，针对清洁能源电力系统引入“负碳流”的概念和核算方法。

从发电侧来看，化石能源发电和输电存在正的碳排放；而清洁能源发电没有碳排放。但从消费侧来看，消费清洁电力相对于消费化石电力能带来相应的碳减排，具有“负排放”效益。如果我们将化石能源发电形成的碳流定义为正的碳流方向，那么清洁能源电流形成的碳流可以定义为“负碳流”（如图2所示）。需要注意的是这里的“负碳流”也是虚拟的概念和虚拟的网络流，这里的“负”一方面表示与清洁电力方向一致的“负”碳流，相对于化石能源电流的正的碳流流向；另一方面，从消费侧来看，用电方消费的清洁电力替代了潜在化石电力和对应的碳排放量，全系统的潜在碳排放减少，因此还可以表示总碳排放“减少”的含义。



图2 消费侧视角的清洁能源发电潮流与对应的负碳流

Fig. 2 The negative carbon flow with clean power flow from consumption perspective

负碳流概念和方法具有较强的现实应用场景和价值。一方面,可以利用负碳流方法研究电网互联对清洁能源和电气化的直接促进作用和对碳减排、碳金融发展的间接带动作用。另一方面,碳流核算工具有助于促进碳市场和可再生能源市场的发展和融合。目前已有超过40个国家和地区建立了碳市场,许多国家为促进可再生能源发展建立了可再生能源电力“绿色证书”配额交易市场^[21],但这两个市场往往是独立运行的。本文提供的清洁电力“负碳流”核算机制,可以促进未来碳市场和绿证市场的发展^[22],为电—碳市场融合奠定基础。本节将逐步推导,通过定义广义碳流引申出负碳流的数学定义及其物理意义。

如图3所示,将A、B两个节点视为地理位置互异的电力生产或消费区域,根据研究细化程度的不同,该区域可以视为特定的城市、省份、国家或洲。

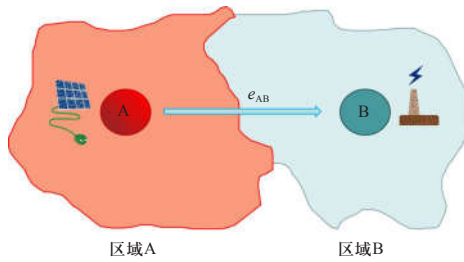


图3 两地电力输送形成的“碳流”

Fig. 3 The carbon flow generated by the electricity transmission

两点通过电网互联实现电力的流通,其中A、B两地的发电结构分别为:

$$\begin{aligned} S_A &= [s_{A1} \quad s_{A2} \quad \dots \quad s_{AM}] \\ S_B &= [s_{B1} \quad s_{B2} \quad \dots \quad s_{BM}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: s_{im} 表示在节点*i*的发电结构中,第*m*种能源的发电量占总发电量的比重; M 为发电能源种类数量。对于任意节点*i*,满足

$$\sum_{m=1}^M s_{im} = 1, \quad s_{im} \in [0,1] \quad (2)$$

设单位时间内从A点生产并输送到B点的电量为 e_{AB} ,则可以得到 e_{AB} 中包含的来自每种发电能源的电量,即

$$\begin{aligned} P_{AB,A} &= e_{AB} S_A \\ &= [e_{AB} s_{A1} \quad e_{AB} s_{A2} \quad \dots \quad e_{AB} s_{AM}] \end{aligned} \quad (3)$$

假设A地各能源发电效率倒数的矩阵为

$$H_A = [\eta_{A1}^{-1} \quad \eta_{A2}^{-1} \quad \dots \quad \eta_{AM}^{-1}] \quad (4)$$

式中, η_{AM} 表示在A地第*m*种能源的发电效率。通过式(3)和式(4)可以计算出在A地生产电量 e_{AB} 所需的

能源消耗,即

$$\begin{aligned} E_{AB,A} &= P_{AB,A} \text{diag}(H_A) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{e_{AB} s_{A1}}{\eta_{A1}} & \frac{e_{AB} s_{A2}}{\eta_{A2}} & \dots & \frac{e_{AB} s_{AM}}{\eta_{AM}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

则在A地生产电量 e_{AB} 所造成的碳排放量 $EM_{AB,A}$ 为

$$EM_{AB,A} = \Lambda E_{AB,A}^T \quad (6)$$

其中

$$\Lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_M] \quad (7)$$

式中: λ_m 为第*m*种能源发电的碳排放因子。

考虑在无电网互联的情景下,电力的生产和消纳需要自给自足,即电量 e_{AB} 需由B点当地生产。同理,假设B地的发电效率倒数矩阵为

$$H_B = [\eta_{B1}^{-1} \quad \eta_{B2}^{-1} \quad \dots \quad \eta_{BM}^{-1}] \quad (8)$$

则在B地生产电量 e_{AB} 所造成的碳排放量 $EM_{AB,B}$ 可以写作

$$EM_{AB,B} = \Lambda e_{AB} [S_B \text{diag}(H_B)]^T \quad (9)$$

定义从A到B的广义碳流为电力生产所造成的碳排放量之差,即

$$F_{AB} = EM_{AB,A} - EM_{AB,B} \quad (10)$$

根据式(10)可以看出,广义碳流通过将受电端的碳排放纳入考量,从而引申出碳流“正”与“负”的概念。当 $F_{AB} > 0$ 时,从A点到B点的碳流为正,即在互联状态下从A点到B点进行电力输送造成的碳排放量大于B点当地生产相同电量的碳排放量,此时从A点到B点的电力输送不利于减排;当 $F_{AB} = 0$ 时,从A点到B点进行电力输送产生零碳流,即从A点到B点的电力输送对减排无影响;当 $F_{AB} < 0$ 时,产生负碳流,即从A点到B点进行电力输送造成的碳排放量小于B点当地生产相同电量的碳排放量,此时将产生减排效益。显然,在电网互联互通的情景下,正碳流将造成更多的碳排放,零碳流对碳排放量无影响,只有产生负碳流的电力输送才使系统整体的碳排放量减少。

碳流绝对量的大小取决于两地发电结构中清洁比例的对比,若输送端发电清洁比例高于受电端,则将产生负碳流,这种情况下的电力输送事实上间接为受电端的减排做出贡献。因此,可以将负碳流作为指标,核算电网互联互通的实际减排效果。作为负碳流应用的一个特例,在全球电力互联互通的情景下,假定送电端的电力生产都是基于大规模清洁能源基地,在核算过程中,可以视为零排放发电,即 $EM_{AB,A} = 0$,而受电端当地的发电结构通常不是零排放,因此将产生大量负碳流。跨区电力互联互通的碳流算例将在第4章中具体介绍。

3 多区域间的碳流及减排效益

在全球电力互联互通的情景下，清洁能源发电在未来发电结构中占主导地位^[23]。基于化石能源发电的狭义碳流难以准确描述基于高比例清洁能源发电的电力输送情况，从而无法评估多区域间互联互通的减排效益。因此，本章基于广义碳流定义，从系统整体的角度评估全球或区域的碳减排，以碳流为工具，形成一套完整的减排和资金核算方法。

3.1 多节点的碳流及其性质

通常某区域的电网互联涉及多个节点、不同电量的电力输送，可以按照以下方法核算该区域内的总碳流。

如图4所示，在电网大规模互联的情景下，电力输送涉及多个输、受电节点，其中A点为纯输电节点，B、C、F为纯受电节点，D、E既是输电节点也是受电节点。

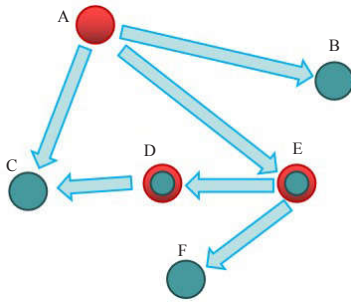


图4 多节点的碳流

Fig. 4 The multi-node carbon flow

对于电网互联互通下的多个输、受电节点，其总碳流即电力输送的总体减排效果，可以表示为

$$F_{\text{total}} = \sum_{i \neq j} F_{ij} \quad (11)$$

式中， F_{ij} 为从*i*点到*j*点的碳流。

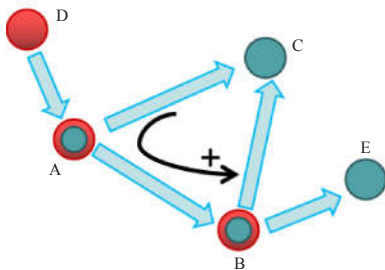


图5 闭环碳流

Fig. 5 The close-loop carbon flow

多节点的碳流具有闭环守恒性质。如图5所示，A、B、C三个节点形成闭环碳流，定义逆时针碳流方向

为正，则三个节点间的闭环总碳流为

$$F_{\text{total}}^{\text{close}} = \sum_{i,j \in \{A,B,C\}, i \neq j} a_{ij} (EM_{ij,i} - EM_{ij,j}) \quad (12)$$

式中， $EM_{ij,i}$ 和 $EM_{ij,j}$ 分别为在*i*地生产并输送电力到*j*地和直接在*j*地生产相同电量造成的碳排放量。 a_{ij} 为符号系数，若碳流方向与定义方向一致，则有 $a_{ij}=1$ ，相反则有 $a_{ij}=-1$ 。考虑输送电量一定即 $e_{AB}=e_{BC}=e_{CA}$ 时，可得总碳流

$$F_{\text{total}}^{\text{close}} = 0 \quad (13)$$

即当输送电量一定的条件下，闭环总碳流为零。

3.2 基于负碳流的资金流

电网互联互通使得清洁能源得以更大规模地开发和消纳，电力生产和利用方式由原来的本地化石能源发电转变为基于清洁能源的电力进口。跨区电力输送形成电流，清洁电力带来的减排形成负碳流，碳流和碳价结合在碳市场形成资金流。这部分由于电网互联下清洁电力输送而形成的资金流等于整个区域减少的总减排成本。

对于发电端A点，由于外送电量 e_{AB} 至B点，增加排放 $EM_{AB,B}$ ，其减排成本增加

$$C_{AB,A} = P_{\text{carbon}} EM_{AB,A} \quad (14)$$

式中， P_{carbon} 为全球统一碳价。对于受电端B点，由于当地减少排放 $EM_{AB,B}$ ，其减排成本相应减少

$$C_{AB,B} = P_{\text{carbon}} EM_{AB,B} \quad (15)$$

则A、B两地系统整体减排成本变化量为

$$\begin{aligned} \Delta C_{AB} &= C_{AB,B} - C_{AB,A} \\ &= P_{\text{carbon}} F_{AB} \end{aligned} \quad (16)$$

可以看出，整个系统减排成本是否下降取决于碳流 F_{AB} 的正负，即正碳流使减排成本增加；零碳流不影响减排成本；负碳流使减排成本降低。 F_{AB} 的正负又取决于A、B两地的电源结构。由式（11）可以直接核算多节点电力输送的资金流，即

$$\Delta C_{\text{total}} = P_{\text{carbon}} F_{\text{total}} \quad (17)$$

由此可以看出，在碳价一定的情况下，资金流取决于负碳流的大小。

4 算例分析

本文以非洲电网互联情景作为测算负碳流的一个特例，核算在非洲区域内电力输送的碳流，从而评估电网互联互通条件下的电流、碳流与碳市场中的资金流。

根据《非洲能源互联网规划研究报告》^[24],未来非洲能源需求增长迅速。2015~2050年,非洲一次能源需求将从11.2亿t标煤增长到24.1亿t标煤,年均增长率2.2%,占全球比重从5.8%增长到9.3%。从终端能源来看,电能占比将从9.5%提高到28%。

在清洁发展的情景下,为满足非洲未来日益增长的能源需求,需要开发大规模清洁能源,并利用电网互联进行跨区域电力输送。非洲清洁能源资源丰富,其中刚果河、尼罗河分别为中非和东非的水电发展提供充足条件。由于未来洲内电网互联的逐渐发展与完善,中非和东非将实现水电外送,为北非、西非和南部非洲提供清洁电力。加上北非大型太阳能基地与各处风力发电基地,非洲未来发电将逐步实现清洁化。预计至2030年,清洁能源装机占比超过50%;至2050年,其占比提升至78%。

本节的算例将基于以上情景,核算非洲2030年和2050年两个时间节点洲内的跨区域电力输送、碳流和资金流。由于非洲洲内的电力跨区输送主要基于中非和东非的大规模水电外送,因此在核算过程中,可以视为送端地区零排放发电,而受端地区电源结构逐步清洁化,通过接受“负”排放从而实现减排效果。

4.1 非洲跨区电力流与发电结构

为在区域层面核算非洲未来碳流并以此评估电网互联的减排效果,本文基于非洲未来电网互联建设规划^[24],绘制了非洲未来跨区电力流(如图6所示)。至2030年,非洲电网互联将形成东非—南部非洲、中非—西非和中非—南部非洲三大电力输送通道,平均每年分别输送电量16 TWh、48 TWh和4 TWh。至2050年,电力输送量分别提升至32 TWh、154 TWh和40 TWh,并新增中非—东非、中非—北非和东非—北非电力输送通道,年均输送电量分别为54 TWh、60 TWh和48 TWh。

基于非洲未来电力发展规划^[24],非洲电力输送中各节点的发电结构如表1所示。至2030年,东非、西非、南部非洲、北非和中非的清洁能源发电量分别占总发电量的76.6%、55.6%、41.7%、27.0%和93.1%,至2050年,该比例分别增至84.4%、70.2%、69.7%、56.4%和97.7%。考虑未来电力输送的实际情况,作为输电端的东非与中非外送电力均来自清洁的水力发电,因此本算例中东非与中非的外送电力发电排放为零。

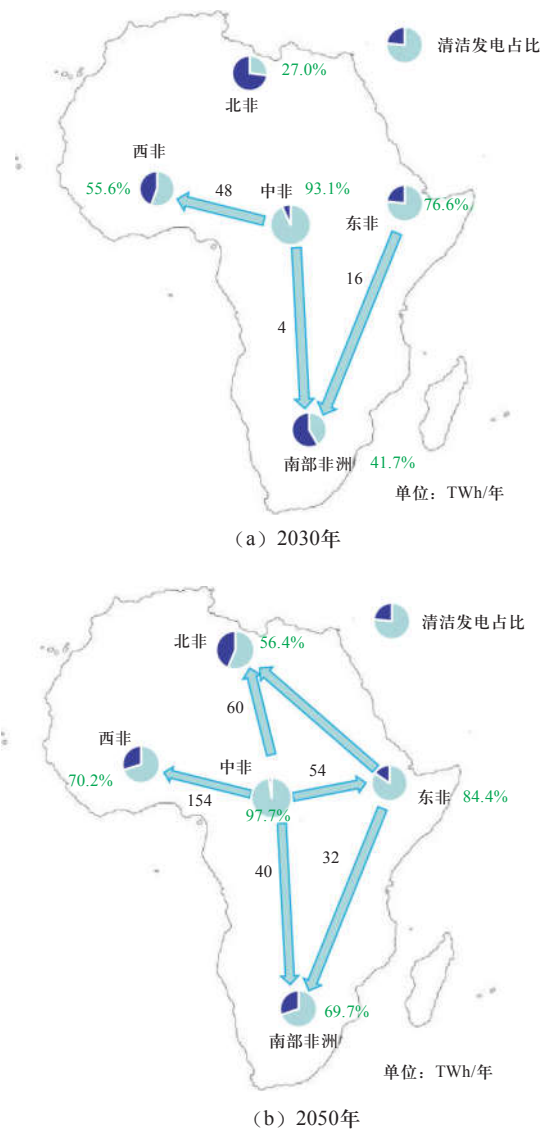


图6 非洲未来电力流

Fig. 6 The topology of electricity trade in Africa

表1 非洲分区域发电结构

Table 1 Regional power generation structure of Africa

2030年	煤	石油	天然气	清洁能源
东非	0%	8.2%	15.2%	76.6%
西非	0%	19.4%	25.0%	55.6%
南部非洲	48.2%	1.8%	8.3%	41.7%
北非	3.9%	15.2%	53.9%	27.0%
中非	0%	3.1%	3.8%	93.1%
2050年	煤	石油	天然气	清洁能源
东非	0%	1.4%	14.2%	84.4%
西非	0%	5.7%	24.1%	70.2%
南部非洲	20.2%	1.2%	8.9%	69.7%
北非	2.1%	11.4%	30.1%	56.4%
中非	0%	0.2%	2.1%	97.7%

4.2 非洲电网互联互通情景下的碳流与资金流

基于非洲未来的电网互联规划、电力输送量、发电结构与排放因子，可以计算该情景下非洲实际电流对应的负碳流情况。本算例根据IPCC温室气体排放清单，将煤电、油电、气电的排放因子分别换算为2.69、2.23和1.57，清洁能源发电排放因子为0^[6]。如图7所示，至2030年，东非—南部非洲、中非—西非和中非—南部非洲三大电力输送产生大量负碳流（表2），其绝对量分别为980万t CO₂/年、1480万t CO₂/年和250万t CO₂/年。至2050年，负碳流绝对量分别增至1020万t CO₂/年、2840万t CO₂/年和1170万t CO₂/年，新增中非—东非、中非—北非和东非—北非负碳流，其绝对量分别为490万t CO₂/年、1740万t CO₂/年和1390万t CO₂/年。

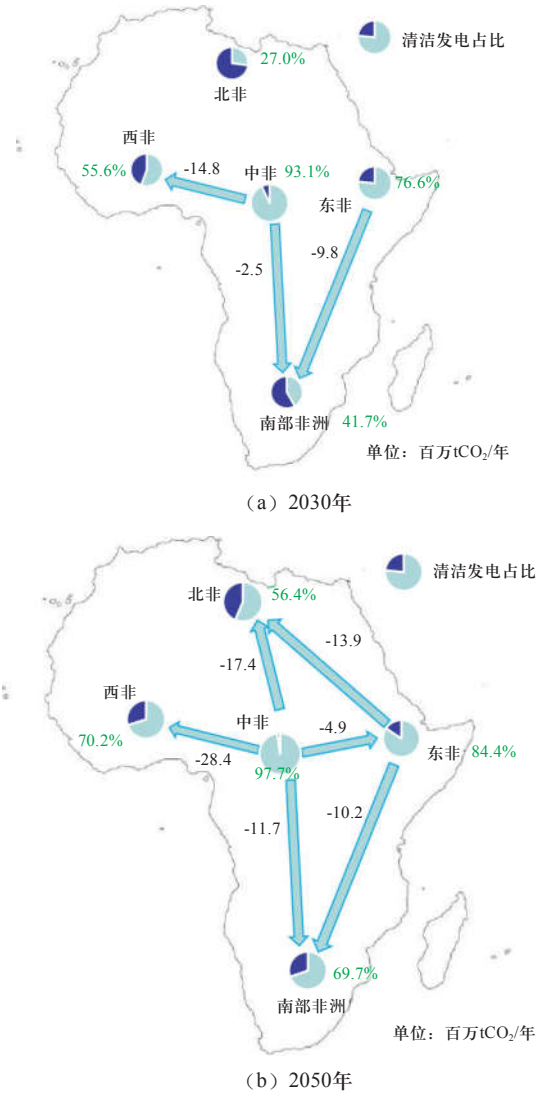


图7 非洲未来碳流拓扑结构

Fig. 7 The topology of carbon flow in Africa

表2 非洲电网互联减排效果

Table 2 The emission reduction potential of Africa by grids interconnection

输电/碳流方向	负碳流绝对量/ (百万t CO ₂ /年)	
	2030年	2050年
东非—南部非洲	9.8	10.2
中非—西非	14.8	28.4
中非—南部非洲	2.5	11.7
中非—东非	0	4.9
中非—北非	0	17.4
东非—北非	0	13.9
总计	27	87

非洲未来电力输送的实际减排效果（总碳流绝对量）增长趋势如图8所示。至2030年，非洲由于电力输送产生的总碳流绝对量为2700万t CO₂/年，以此表征东非—南部非洲、中非—西非和中非—南部非洲三大电力输送形成的实际减排效果。至2050年，在新增电力输送的作用下，实际减排效果达到8700万t CO₂/年，较2030年增长222%。

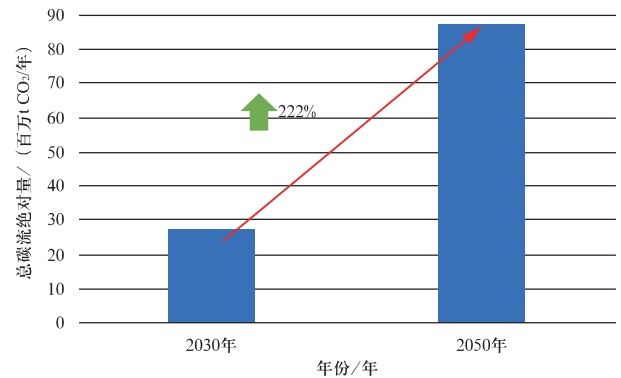


图8 基于非洲电力输送的总碳流绝对量

Fig. 8 The total carbon flow and emission reduction potential based on the electricity transmission in Africa

根据奥地利国际应用系统分析研究所（international institute for applied systems analysis, IIASA）整理的未来全球升温2℃情景^[25]，本研究选取全球能源互联网2℃情景^[19]对应的碳价，估算非洲能源互联网各子区域输送清洁电力对应的资金流。根据情景结果，全球平均碳价在2030年和2050年分别为51美元/t CO₂和136美元/t CO₂（2010年价格，未贴现）。非洲各区域间通过电网互联促进清洁电力输送，根据上文核算的负碳流量，到2030年和2050年分别可以实现14亿美元/年和119亿美元/年的资金流和年收益（如表3所示）。电网

互联互通将极大地促进非洲可再生能源开发, 清洁电力本身的售电收入和减排效益所得的稳定资金流将支撑非洲地区的低碳转型和可持续发展。

表3 非洲电网互联资金流

Table 3 The economic potential of Africa's emission reduction by grids interconnection

输电/碳流方向	资金流/(亿美元/年)	
	2030年	2050年
东非—南部非洲	5	14
中非—西非	8	39
中非—南部非洲	1	16
中非—东非	0	7
中非—北非	0	24
东非—北非	0	19
总计	14	119

5 结论与讨论

全球能源系统正在经历低碳转型, 未来的能源体系中, 一次能源将从以化石能源为主导逐步转向以清洁能源为主导, 终端能源以电为中心, 因此有必要研究一套针对清洁能源电力的碳减排核算方法。本文在传统碳流概念的基础上, 针对清洁能源电力提出了“负碳流”概念, 定义了电力输送过程中的广义碳流, 并提出了消费侧视角下包含多种能源的电力系统碳排放核算方法。基于碳流工具, 能够从消费侧精确评估电网互联情景下清洁电力输送形成的减排效益。

以非洲未来电网互联情景为例, 计算了清洁电力输送的减排效益。非洲通过六大子区域的清洁电力输送, 至2030年总负碳流为2700万t CO₂/年; 至2050年达到8700万t CO₂/年。到2030年和2050年可以分别实现14亿美元/年和119亿美元/年的资金流。非洲能源互联网可以极大促进非洲可再生能源开发, 同时能获得较大的减排效益。

本文主要基于长时间尺度和特定情景下非洲电网互联对清洁电力跨国输送的负碳流及减排效益开展研究。在现实条件下, 如何针对短时间尺度的电力系统运行, 考虑多种本地和外送电源结构、送端或受端火电调峰等条件下的碳流和碳减排机理, 有待进一步研究。此外, 如何通过“负碳流”机制与碳价、碳金融市场联动, 促进碳市场和可再生能源配额市场的融合, 需要开展更多深入研究。

参考文献

- [1] IEA. World energy outlook 2017[R]. Paris, France: OECD/IEA, 2017.
- [2] BP. BP energy outlook 2019[R]. BP: 2019.
- [3] IRENA. Global energy transformation: a roadmap to 2050[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018.
- [4] SGCC, IRENA. Electrification with renewables: driving the transformation of energy services[R]. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2019.
- [5] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [6] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南第二卷能源[M]. 日本全球环境战略研究所, IPCC, 2006.
- [7] IEA. CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2013[R]. Paris, France: OECD/IEA, 2014.
- [8] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
Liu Mingda, Meng Jijun, Liu Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258(in Chinese).
- [9] 陈迎, 潘家华, 谢来辉. 中国外贸进出口商品中的内涵能源及其政策含义[J]. 经济研究, 2008, (7): 11-25.
Chen Ying, Pan Jiahua, Xie Laihui. Energy embodied in goods of international trade in China: calculation and policy implications[J]. Economic Research Journal, 2008, (7): 11-25(in Chinese).
- [10] Atkinson G., Hamilton K., Ruta G., et al. Trade in 'virtual carbon': empirical results and implications for policy[J]. Global Environmental Change, 2011, 21(2): 563-574.
- [11] Le Quere C., Andrew R. M., Friedlingstein P., et al. Global carbon budget 2018[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(4): 2141-2194.
- [12] Kang C., Zhou T., Chen Q., et al. Carbon emission flow in networks[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1):1-7.
- [13] Kang C., Zhou T., Chen Q., et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [14] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43+85.
Zhou Tianrui, Kang Chongqing, Xu Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43+85(in Chinese).
- [15] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.
Zhou Tianrui, Kang Chongqing, Xu Qian Yao, et al. Wu Y. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44(in Chinese).
- [16] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算

- 方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
- Zhou Tianrui, Kang Chongqing, Xu Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49(in Chinese).
- [17] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 10-16.
- Kang Chongqing, Cheng Yaohua, Sun Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16(in Chinese).
- [18] Cheng Y., Zhang N., Wang Y., et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 1-10.
- [19] Zhou Y., Chen X., Tan X., et al. Mechanism of CO₂ emission reduction by global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 409-419.
- [20] 全球能源互联网发展合作组织, 联合国气候变化框架公约秘书处. 全球能源互联网促进《巴黎协定》实施行动计划[R]. 卡托维兹: GEIDCO UNFCCC, 2018.
- [21] 任东明, 谢旭轩. 构建可再生能源绿色证书交易系统的国际经验[J]. 中国能源, 2013, 35(9): 12-15+21.
- [22] 刘昌义, 朱蓉, 王阳. 我国风能发展的经济与政策分析[J]. 阅江学刊, 2018, 10(1): 118-130+148.
- Liu Changyi, Zhu Rong, Wang Yang. Economic and policy analysis on China's wind development [J]. Yuejiang Journal, 2018, 10(1):118-130+148(in Chinese).
- [23] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网骨干网架研究[R]. 北京: GEIDCO, 2018.
- [24] 全球能源互联网发展合作组织. 非洲能源互联网规划研究报告[R]. 北京: GEIDCO, 2018.
- [25] McCollum DL., Zhou W., Bertram C., et al. Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals[J]. Nature Energy, 2018, 3: 588-599.

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-03-28。



谭新

作者简介:

谭新 (1988), 男, 博士, 研究方向为能源与气候变化、智能电网通讯、物联网技术等, E-mail: xin-tan@geidco.org。

刘昌义 (1985), 男, 高级工程师, 研究方向为气候变化、可持续发展经济学等, E-mail: changyi-liu@geidco.org。

陈星 (1988), 女, 博士, 研究方向为气候变化、环境系统分析、能源规划等, E-mail: xing-chen@geidco.org。

张士宁 (1987), 男, 博士, 研究方向为全球能源发展战略规划、综合评价、能源经济与能源供需、可再生能源发电技术等, E-mail: shining-zhang@geidco.org。

杨方 (1981), 女, 高级工程师, 研究方向为气候变化、电力系统、能源与环境等, E-mail: fang-yang1@geidco.org。

魏超 (1985), 男, 工程师, 研究方向为气候变化经济学等, E-mail: weichao@cma.gov.cn。

(责任编辑 张宇)