

引用格式: 张宏, 王礼茂, 张英卓, 等. 低碳经济背景下中国风力发电跨区并网研究[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2377-2388.
[Zhang H, Wang L M, Zhang Y Z, et al. Analysis of cross-regional grid integration of wind power under a low carbon economy[J].
Resources Science, 2017, 39(12): 2377-2388.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.16

低碳经济背景下中国风力发电跨区并网研究

张宏^{1,2}, 王礼茂^{2,3}, 张英卓⁴, 牟初夫^{2,3}, 方叶兵⁵, 杨慧敏⁶

(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450002; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 西雅图城市大学管理学院, 西雅图 98121;
5. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003; 6. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 低碳经济背景下, 风能在能源结构中的比例不断提高。中国风力发电建设迅猛发展, 风电装机新增装机容量和累计装机容量持续保持世界第一。“三北”地区“弃风”现象严重。而跨区并网风电外输是目前解决“弃风”问题的重要手段。本文尝试从地理学视角, 基于复杂网络分析方法, 通过“弃风”省份的“弃风率”、“弃风”电量和风电负荷省份“十三五”能耗强度降低目标和能耗增量控制目标, 以及空间距离为变量对万有引力定律进行改进, 进而探讨在“弃风”区域风电溢出效应作用下全国风电跨区并网的复杂网络特征。发现: “弃风率”和“碳排放量”是风电跨区并网的主要驱动力; 风电跨区并网的“弃风”消纳的核心为西北和华北电网, 风电负荷核心为华中电网; 跨区并网的区块划分具有地理倾向性特点, 且呈现以负荷地区为核心, “弃风”地区为边缘的“核心-边缘”结构。最后, 基于电网传输损耗对电价的限制, 进一步为风电跨区并网的区块划分提出合理性建议。

关键词: 低碳经济; 风力发电; 弃风; 跨区并网; 复杂网络分析; 西北电网; 华北电网; 华中电网; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.16

1 引言

全球变暖引发的极端气候问题不仅影响世界经济发展, 甚至威胁到人类的生存。有效控制碳排放成为当今国际社会的共同诉求。2003年, “低碳经济”的概念首次在英国能源白皮书《我们能源的未来-创造低碳经济》提出^[1]。2009年哥本哈根气候变化会议后, 以低能耗、低污染、低排放为基础的“低碳经济”模式逐渐成为世界各国追求的发展模式^[2]。2015年巴黎气候大会上, 中国为改善国际环境问题做出了承诺: 2030年非化石能源在能源结构中的比重将提升到20%左右, 单位GDP的CO₂排放量比2005年下降60%~65%, 且CO₂排放达到峰值^[3]。

在低碳经济背景下, 发展清洁能源成为全球各

国的共识。风能作为一种清洁的可再生能源, 已成为世界公认除水电之外, 最具有大规模商业开发价值的可再生能源^[4]。据全球风电发展统计数据显示: 2016年全球风电新增装机容量约54.6GW, 累计装机容量达到486.7GW^[5], 其中中国风电新增装机和累计装机量仍名列全球第一, 累计装机量约是第二名美国的2倍, 新增装机量约是美国的4倍^[6]。风电已成为中国控制碳排放的首选新能源, 且风电产业规模的扩大对于缓解中国当前面临的环境与能源双重压力、应对全球气候变暖具有重要意义。然而, 中国风能资源丰富地区普遍距离负荷中心较远, 大规模的风电无法就地消纳, 需要通过输电网远距离、高电压、大容量输送到负荷中心^[7]。因此, 针对大型风电场建设进行电网规划^[8], 大力突破风

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-10-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFA0602800; 2016YFB0502300); 国家自然科学基金项目(41690145; 41171110; 41301127)。

作者简介: 张宏, 女, 河南漯河人, 博士生, 主要研究方向为能源地缘、经济地理和区域产业规划。E-mail: zhanghong@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王礼茂, E-mail: lmwang@igsrr.ac.cn

电并网技术^[9],提高风电并网性能^[10],建设电网区域互联输电通道的大容量跨区送电工程^[11],以及构建坚强智能电网^[12]等成为改善风电跨区消纳的重要技术措施。

除了对风电并网技术的研究外,还有一些学者对风电并网模型进行了探讨。如金晶亮等提出了风电并网背景下的低碳电力调度模型,模型将“碳排放”作为衡量环境污染的重要指标,同时利用“碳价格”将各类成本的量纲统一起来,寻求一种协调环境成本与经济成本的调度策略^[13]。刘新东等提出利用负荷需求响应提高大规模风电并网能力的多目标优化方法,为调度规划决策人员提供理论依据^[14]。袁铁江等提出了基于区域间功率交换及区域主导特征指标,以提高风电消纳为目标的区域平衡电网范围划分方法,并进行了仿真模拟^[15]。申永涛对风电并网前后、不同的风电并网点以及同一并网点不同风速下,对电力系统节点脆弱性进行了计算分析^[16]。

风电并网是一个复杂的系统,而复杂网络分析是对复杂系统及其属性加以分析的规范和方法,被广泛应用于自然科学、社会科学、管理科学和工程技术等领域的相互关联的复杂模型^[17-19]。采用复杂的网络分析技术和方法,研究电网和电力基础设施方面的相关文献主要有:Sun K.基于复杂网络理论视角,衡量了全球和区域电网的稳定性^[20];Fenu G等利用复杂网络分析的概念和参数,提出了萨迪尼亚地区的区域电网模型^[21];Pagani G A等采用复杂的网络分析技术和方法,对不同电网基础设施的性能进行了相关性研究^[22];王靖飞基于复杂网络分析对电力网络中的网络能效稳定、机组节点出力、风电预测等方面进行约束,改进了风电消纳能力评估模型^[23]。

目前的文献关于电力并网的研究多集中在电力学范畴的电力系统和电网技术的研究。本文尝试从地理学的视角,基于复杂网络分析方法,研究区域电网间、省域间风电跨区并网的主要影响因素,试探讨“弃风”区域产生的风电溢出效应和电力负荷区域的降耗压力作用,对风电跨区并网模型产生的影响。通过“弃风”地区风电价格、电能传输损耗、负荷地区电力销售价格,对风电跨区传输落地价格进行控制,进而划分出更合理、经济的风电跨

区并网区域。

2 中国风力发电概况

2.1 中国风力发电的历程

随着中国风电技术进步及国家相关产业扶持政策的不完善,中国的风力发电建设迅猛发展。风电累计装机容量从2005年的127万kW发展到2015年的14 536万kW^[24]。2009年前,中国风力发电装机容量在全球总量的占比不足1%,到2015年底,中国发展成为世界风电装机第一大国,风电装机容量占全球风力发电的22.4%,累计风电装机容量达4473.3万kW。此后,中国风电装机新增装机容量和累计装机容量持续保持世界第一水平,图1为2005—2015年11年间中国和世界风力发电装机容量变化情况。

2.2 中国风力发电的布局特征

中国风能资源丰富,主要分布在“三北”(西北、东北、华北)和东南沿海地区。图2为2005—2015年中国六大区域风力发电累计装机容量变化情况,以及各区域的占比。2015年,西北地区和华北地区风能装机容量分别占全国总风能装机容量的38.7%和21.9%^[24]。从省域空间来看,中国风电装机容量主要集中在新疆、甘肃、内蒙古、山西、宁夏、河北、山东和云南8个省(自治区),8省(自治区)装机容量占全国风电总装机容量的68.9%左右,并逐渐形成大规模的风电发电基地。

2.3 中国风电产业存在的问题

2010年是中国风电产业的转折点。风电产业发展的主要矛盾已从争取高速发展大规模的风电装机量,转向跨区并网建设速度与“弃风”区域风电外送消纳的之间矛盾。当前,具体表现为:

一是中国风电产业分布不均衡,风力发电主要集中在“三北”地区高风速区域。其中,全国总装机容量的60%集中在西北和华北地区,近70%分布在8个省份^[24]。

二是“弃风”现象严重。目前,中国电力市场需求放缓,且装机地区分布不协调。2015年,全国风力发电的平均利用1728h,同比下降172h。全年弃风量为339亿kW·h,平均“弃风率”为15%^[24]。其中,甘肃、新疆、吉林和黑龙江4省“弃风”现象最为严重,且“弃风率”均超过了20%的警戒线。图3为

2017年12月

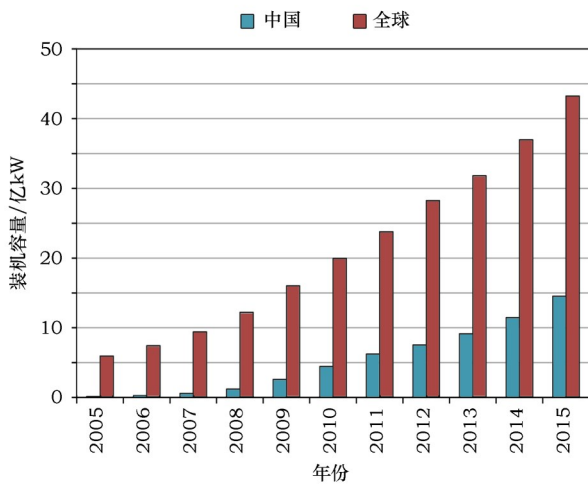


图1 2005—2015年中国及全球风力发电累计装机容量

Figure 1 The wind power generation capacity of China and global from 2005 to 2015

数据来源:中国风能协会(CWEA)。

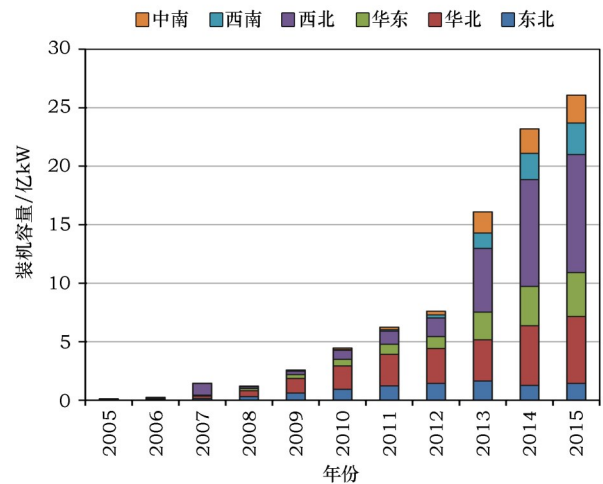


图2 2005—2015年中国六大区域风力装机容量情况

Figure 2 The wind capacity of the 6 regions of China from 2005 to 2015

数据来源:中国风能协会(CWEA)。

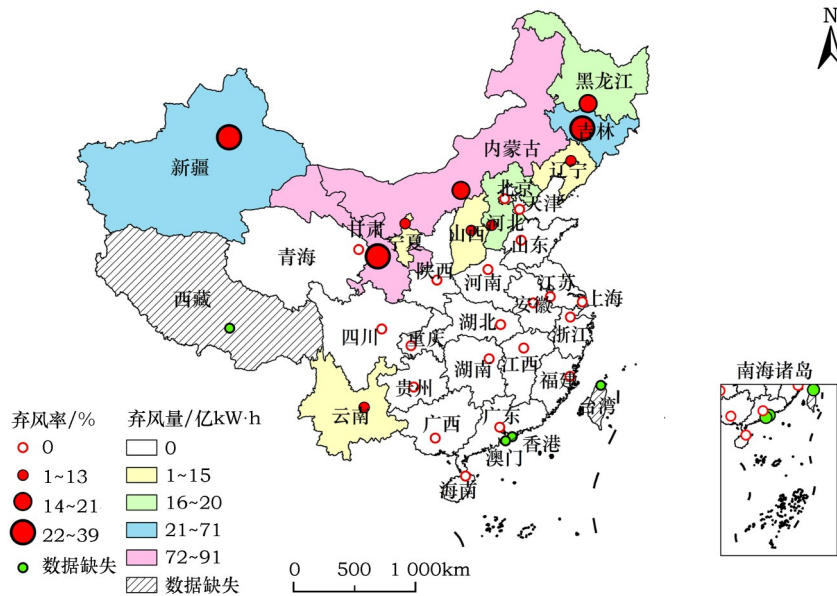


图3 2015年中国各省(市、自治区)的“弃风”情况

Figure 3 The "abandon wind" of China's provinces (cities and autonomous regions) in 2015

注:若省(市、自治区)弃风量为0或数据缺失,即其“弃风率”也为0或数据缺失。

2015年中国省(市、自治区)“弃风”情况。

三是风电并网率有待提高。由于风力发电项目与电网项目建设不同步、风电与其他常规电源不协调等原因,造成中国风电并网率与国外风电发达国家相比有很大差距^[25]。以北欧电力市场为例,丹麦、瑞典、挪威、芬兰四国之间建立跨区电网,电力输送互通有无,有效促进丹麦将富余风电输送到其他国家^[26]。而中国风电并网外输存在着装机负荷不

匹配、电源电网不够协调、本地火电之争等问题,“三北”地区盈余风电无法实现跨区消纳。

“十三五”期间,中国风电仍将加快发展,“三北”地区是风电开发的重点,如何实现大规模风电跨区消纳已成为未来风电发展的主要问题。建立经济合理的跨“省区”和跨“区域电网”的风电并网网络,有效实现“弃风”区域风电的跨区外输,成为中国风力发电发展的主要方向。

3 研究对象、研究方法与数据来源

3.1 研究对象

本文研究对象为全国30个省(市、自治区),西藏自治区、港澳台地区数据缺失。尝试探讨“弃风”区域风电溢出效应和负荷区域需求强度共同作用下,全国风电跨省区、跨六大区域电网的并网结构。其中,中国六大区域电网根据边界分为:东北区域电网、西北区域电网、华北区域电网、华东区域电网、华中区域电网和南方区域电网。六大区域电网的区域覆盖范围如表1。其中,华北区域电网并与东北电网、华中电网相连,河南电网与西北电网、华北电网相连,湖北电网与华东电网、南方电网相连。

3.2 研究方法

3.2.1 复杂网络分析

所谓“网络”实际上就是节点与边的集合。如果节点对 (i,j) 与 (j,i) 对应为同一条边,那么该网络为无向网络,否则为有向网络。如果边无权值,该网络就是无权网络,赋予每条边对应的权值,则为加权网络。网络中节点按照某种(自)组织原则的方式建立关联关系,将演化成各种不同的网络,称为“复杂网络”。复杂网络是研究复杂系统的一种方法,它关注系统中个体间的拓扑关系,是理解分析复杂系统特征和功能的有效手段。

复杂网络重点分析的是复杂系统的结构以及系统结构与系统功能之间的关系,而要研究这些系统的结构和功能上的特点,一般通过复杂网络理论中的网络图进行描述^[27]。电网自身就是一个复杂的网络。利用复杂网络分析的拓扑性,分析风电并网网络中“弃风”省份与电力负荷省份之间的关系,依据复杂网络分析的参数,衡量网络中“弃风”省份风电的溢出效应和电力负荷省份的需求强度,是符合

风电并网网络基本思想的。解决“弃风”现象,需增加风电并网装机容量,提高跨区外送消纳能力。风电跨区并网网络是探究省际间风电输送的相互关系。网络中的“点”为各省份,网络中的“线”为“弃风”省份与电力负荷省份间的输送关系。

3.2.2 变量选择

(1)“弃风率”和“弃风”电量。“弃风率”和“弃风”电量作为“弃风”省份风电“空间溢出”动力和区域间风能网络关联关系的主要参数和度量指标,对衡量“弃风”省份跨区输送潜力有着重要的意义。本文的“弃风率”和“弃风”电量数据来源于《国家能源局关于2015年度全国可再生能源电力发展检测评价的通报》^[28]。其中甘肃、新疆、吉林、黑龙江等10个地区存在风能盈余浪费现象(如表2)。区域内大规模未消纳的风电势必产生“空间溢出”效应。且区域“弃风率”和“弃风”电量越大,该区域风电的空间溢出效应越明显。

(2)“十三五”能耗“双控”目标。根据《“十三五”节能减排综合工作方案》^[29]要求,以提高能源利

表2 2015年全国主要弃风省(市、自治区)弃风情况

Table 2 The "abandon wind" situation of main China's provinces (cities and autonomous regions) in 2015

地区名称	弃风率/%	弃风量/亿 kW·h
甘肃	39	82
新疆	32	71
吉林	32	27
黑龙江	21	19
内蒙古	18	91
宁夏	13	13
辽宁	10	12
河北	10	19
云南	3	3
山西	2	3

表1 六大区域电网覆盖范围

Table 1 The coverage of 6 regional power grids

电网名称	电网覆盖区域
东北区域电网	辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古东部(赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市和兴安盟)
西北区域电网	陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、西藏
华北区域电网	蒙西、京津唐、河北南部、山西、山东
华东区域电网	上海、江苏、浙江、安徽、福建
华中区域电网	河南、四川、重庆、湖北、江西、湖南
南方区域电网	广东、广西、云南、贵州、海南

2017年12月

用效率和改善生态环境质量为目标,明确了“十三五”各地区能耗总量和强度的“双控”目标。本文引入30个省(市、自治区)“十三五”能耗强度降低目标和能耗增量控制目标为参考变量,衡量风电负荷省份对风电等新能源需求强度。风电输入省份的能耗强度降低目标值越大,即降低负荷省份碳排放强度越大,对风电清洁能源需求量引力越大;反之亦然。同理,各省份能量增量控制目标值与对风电的需求强度亦为正相关。

(3)空间距离。空间距离是风力发电并网传输的主要参数和度量指标。跨省及区域电网长距离输电不仅对电网建设技术和升降电压有很强的技术要求,同时,远距离输电势必会造成电能损耗。目前,中国的昌吉-古泉±1100kV特高压直流输电线路工程沿线途径新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽6省(自治区),线路全长3319.2km,已打破了长距离跨省电网建设的技术局限。但远距离输电的损耗直接影响电力输入的落地价格。

本文结合万有引力定律,将省域间空间距离作为衡量风电负荷省份碳排放强度空间溢出效应的一个变量,参考其他研究中的地理距离度量方法^[30],本文将两个省(市、自治区)的空间距离定义为省会(城市)之间的球面距离。

3.2.3 相关算法

(1)网络中心性算法。在复杂网络分析中,中心性是用来表示网络中节点的重要性和整个网络集中程度的指标,其计算依赖于网络中各个节点的中心性。其中,一级中心性描述网络中节点本身与其它节点关系的紧密程度,常用节点的度指标表示。二级中心性描述网络中与节点相连的其它节点之间的紧密程度,常用中心聚类等方法。

①一级中心性:节点的度。无向网络中点*i*的度 k_i 表示为点*i*与网络中其他点的连线数目。度 k_i 值越大说明点*i*在网络中的地位越重要,若:网络中 $k_i = \text{Max} k_i, i \in (1 \sim n)$ 最大的点*i*为网络的核心。风电跨区并网网络模型中无向网络中节点度 k_i 指:与节点*i*有风电输送关系的省份数量。 k_i 越大,证明省*i*与其他各省间风电输送关系越频繁,在跨区并网中的地位越重要。

$$k_i = \sum_{j=1}^{N(i)} a_{ij} \quad (1)$$

对于有向网络,节点的度包括节点的出度(Out-degree)和入度(In-degree)。节点*i*的出度 k_i^{out} 表示*i*省输送风电的数量,入度 k_i^{in} 则表示向*i*省输送风电的省份数量。本文只考虑“弃风”区域风电的“溢出效应”,即“弃风”省份只向外输送盈余风电,非“弃风”省份只接收风电,因此可将网电并网网络作为一个无向网络。“弃风”省份的节点度为其出度;非“弃风”省份的节点度为其入度。

②二级中心性:中心聚类。拓扑图中的k-core是指“在图中反复去掉度小于等于*k*的节点及其连线所余下的子图”。如果一个节点存在于k-core,但在(*k*+1)核中被移除,则此节点的核数为*k*,即对于 $v \in V(G)$,如果 $v \in \text{core} k - \text{core}(k+1)$, $\text{Coreness}_v = k$ 。核数表示的是节点在核中的深度,*k*取最大值时,节点集合具有高核聚类特征,在整体拓扑网络中处于最核心地位。

k-core是建立在点度数基础上的凝聚子群算法。如果一个子图中的全部点都至少与该子图中的其他*k*个点邻接,则称这样子的子图为k-core。在聚类的基础上,选择符合所要求的节点及连线,以得到核心网络。

(2)Louvain区块划分算法。Louvain算法是一种基于模块度(modularity *Q*)优化的快速(fast unfolding)算法。模块度是一个范围在0~1之间的值,越接近1代表区块结构越明显^[31]。对于加权网络,模块度的定义为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (2)$$

式中 A_{ij} 为节点*i*与*j*之间关联关系的权值; k_i 为与节点*i*相连接的边的权重之和; $m = \frac{1}{2} \sum_{ij} A_{ij}$ 为整个网络中边的权重之和; $\delta(c_i, c_j)$ 为节点*i*与*j*所属区块关系,若节点*i*和*j*同属一个区块,则 $\delta(c_i, c_j) = 1$,否则 $\delta(c_i, c_j) = 0$ 。

Louvain算法主要有三个步骤:

①将网络中各个节点划分成一个独立的区块,即网络区块的个数为网络中节点数。

②将网络中每一个节点从原来的区块中取出,并计算节点加入新区块后的模块度增量,直到将该

节点加入到模块度增量最大的区块。重复上述步骤,直到模块性不再增加。其中模块度增量的计算公式为:

$$\Delta Q = \left[\frac{\sum in + 2k_{i, in}}{2m} - \left(\frac{\sum tot + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\sum in}{2m} - \left(\frac{\sum tot}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中节点*i*是网络中的节点;*C*是节点*i*加入的新区块; $\sum in$ 为区块*C*中所有边的权重之和; $\sum tot$ 为社区*C*内部节点与整个网络中节点连接边的权重和; k_i 为节点*i*与整个网络中所有节点相连接边的权重之和; $k_{i, in}$ 为节点*i*与区块*C*内部节点相连接边的权重之和。

③将第二步骤中生成的区块进一步折叠为节点,形成一个新的网络。其中,新的网络中节点之间连接边的权重为连接两个不同的源区块中所有节点连接边的权重之和,同一源区块内部的节点形成一个自环(self-loops),移动节点至新区块,直到其模块度不再增加,算法结束。

3.2.4 模型建立

(1)风电并网网络的模型构建。基于复杂网络模型,设 $V_i (i=1,2,\dots,n)$ 为风电输出区域, $W_j (j=1,2,\dots,m)$ 为风电输入区域;输出地区与输入地区间的关联关系用邻接矩阵 $A=[a_{ij}] (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$ 表示,分别构建了无权有向网络和加权有向网络。其中,无权有向网络中 a_{ij} 取1或0,分别代表两地区之间存在或不存在风电的输入与输出;加权有向网络中节点间关联强度由两地区之间的输入和输出风电的权重来表示,即 a_{ij} 赋予 r_{ij} 风电流量, $R=[r_{ij}] (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$ 为权重矩阵。

省际间风电并网网络是探究区域间风电输入和输出的集合。网络中的节点为各省(市、自治区),节点间的连线为存在风电输入输出的关联关系,节点间的关联强度通过对万有引力模型的改进进行定义。综合风电溢出区域“弃风率”和“弃风”电量、风电输入区域的能耗强度降低目标值和能量增量控制目标值,以及省份间的空间距离刻画地区间的关联强度。

$$f_{ij} = a_i \frac{C_i \times D_j}{r^2} \quad (4)$$

式中 f_{ij} 为*i*省份向*j*省份输出风电的量; a_i 为*i*省的风电外送消纳系数(%),用*i*省的“弃风率”表示; C_i 为“弃风”省份*i*省的风电“溢出强度”,用*i*省的弃风量表示(kgec);其中1亿kW·h≈12 284.2tec; D_j 为负荷省份*j*省的风电并网需求指标;风电输入地区*j*省的并网需求指标用 D_j^1 和 D_j^2 衡量,其中 D_j^1 为十三五能耗强度降低目标(%) and D_j^2 为“十三五”能耗增量控制目标(kgec); r 为两省城市间的球面距离。

(2)风电传输强度量化。根据中国六大区域电网的划分和区域内各省“弃风”情况,进一步对10个“弃风”省份关于区域电网内和跨区域电网风电溢出强度进行量化。 X 区域电网为仅包括“弃风”省份的区域电网, Y 区域电网为既包括“弃风”省份又包括“非弃风”省份的区域电网。则:

$$F_{ij} = \begin{cases} f_{ij} & i \in X \text{ 或 } i \in Y, j \in Y \\ \frac{1}{2} f_{ij} & i \in Y, j \notin Y \\ 0 & i \in Y, j \notin Y \text{ 且 } a_i \leq 10\% \end{cases} \quad (5)$$

东北区域电网覆盖的辽宁、吉林、黑龙江三省均为“弃风”省份,华北区域电网既包括“弃风”省份,又包括“非弃风”省份,蒙西、蒙东为“弃风”区域。根据并网的基本原则,本文将内蒙古自治区划为华北区域电网。

3.3 数据来源

本文风力发电数据主要来自《2016年风电行业研究报告》^[32];中国主要省份的“弃风率”和“弃风”电量数据来自《国家能源局关于2015年度全国可再生能源电力发展检测评价的通报》^[28];各省“十三五”能耗总量和强度的“双控”目标数据和中国各省能源消费总值数据来自《“十三五”节能减排综合工作方案》^[29],根据公式:碳排放量(万吨)=能源消耗量(万tec)×2.7725tCO₂/t当量,计算出2015年全国各省碳排放量值。由于数据获取困难,本次研究不包括香港、台湾、澳门和西藏,因此只考虑中国其他30个省(市、自治区)。

4 结果及分析

4.1 风电跨区并网网络的聚类分析

基于复杂网络中心性特征,利用k-core算法对

2017年12月

2015年风电跨区并网网络进行聚类分析,挖掘出风电跨区并网网络中的核心省份,如图4。网络中“弃风”核心为主要风电输出省份,分别为甘肃、内蒙古、宁夏和新疆。这4个省(自治区)归属于西北和华北区域电网,且为西北和华北区域内“弃风率”最大的4个地区。从表3中甘肃、内蒙古和宁夏的统计数据看出:在风电输出省份到网络中各个输入省份平均距离相近的情况下,“弃风”省份风电输出强度与区域“弃风率”呈正相关关系,与区域“弃风”电量无相关性。新疆地区的统计数据较其他3省分析:空间距离衰减因素对“弃风”区域风电输出度的影响大,“弃风”区到风电输入省份的平均距离与该省的风电外输强度呈负相关关系。

风电跨区并网输入省份分别为:山东、江苏、广东、河南、四川和陕西。风电输入的核心省份分布

在除东北区域电网(覆盖省份均为“弃风”区)外的五大区域电网。根据公式:碳排放量(万t)=能源消耗量(万tec) \times 2.7725tCO₂/t当量,采用《“十三五”节能减排综合工作方案》^[29]中2015年全国各省能源消费总量值,计算出2015年全国各省碳排放量值。由计算结果可知,2015年全国碳排放前7个省份为:山东(105亿t)、江苏(84亿t)、广东(84亿t)、河北(81亿t)、河南(64亿t)、辽宁(60亿t)和四川(55亿t)。其中,河北和辽宁为“弃风”省份。陕西2015年的碳排放量32 483万t,为西北区域电网中碳排放量最大的省份。全国风电并网网络中,西北、东北、华东和南方区域电网分别覆盖一个“核心”风电输入省份,而华中区域电网包含河南和四川两个“核心”输入省份。从区域来看,华中区域电网是全国主要的风电负荷核心。

4.2 风电跨区并网网络的区块结构特征

论文引入空间距离参数对Louvain算法进行改进,将“弃风”省份的“弃风率”、“弃风”电量和非“弃风”省份“十三五”能耗强度降低目标和能耗增量控制目标区域碳排放作为参数对跨区域风电并网网络中的区块结构进行探测。旨在分析“弃风”区域风电溢出效应和距离衰减规律,对风电输入区域能耗“双控”目标作用的强弱。获取风电并网网络中

表3 核心“弃风”省份特征值

Table 3 The characteristic value of the core "abandon wind" provinces

“弃风”省份	弃风率/%	弃风量/亿kW·h	到核心消纳省份的平均距离/km	风电输出度/个
甘肃	39	82	1 057.2	18
新疆	32	71	2 586.0	7
内蒙古	18	91	1 094.5	12
宁夏	13	13	1 046.2	8

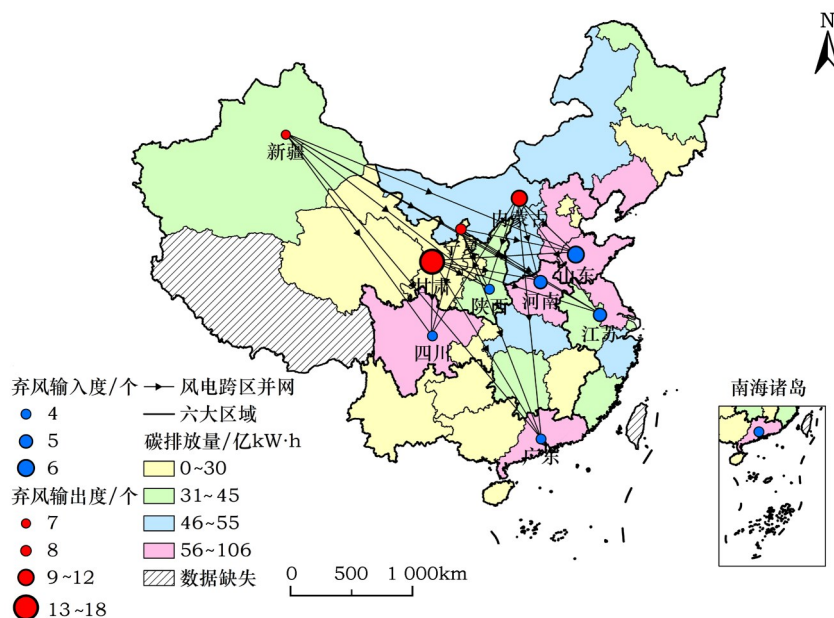


图4 基于k-core算法的风电跨区并网的聚类分析

Figure 4 Cluster analysis based on k-core algorithm for wind power cross-zone parallel network

各省份间关联关系强度最大的区块结构,为跨省区和跨区域电网的风电并网提出合理性建议。

基于 Louvain 算法对 2015 年风电跨区并网网络进行 Geo layout 分布,如图 5 可视化显示:全国风力发电跨区并网网络总分为两个区块,区块内省份易实现风力发电并网,如表 4。区块 1 主要包括东北、华北和华东区域电网(除福建);区块 2 为西北、华中、南方区域电网(加福建)。图 5 显示,区块划分在空间上呈现出了明显的空间集聚特征,进一步对区块之间的平均地理距离矩阵进行统计,如表 5。从地理近似性来看,区块内部的平均地理距离都要小于区块间的平均地理距离。

表 4 基于 Louvain 算法的区块划分

Table 4 Block division based on Louvain algorithm	
区块名称	地区
区块 1	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、北京、天津、山西、山东、安徽、上海、江苏、浙江
区块 2	新疆、宁夏、青海、甘肃、陕西、河南、湖北、湖南、四川、重庆、贵州、江西、广东、广西、云南、福建、海南

表 5 区块之间的平均地理距离矩阵

Table 5 The average geographic distance matrix between blocks (km)		
区块名称	区块 1	区块 2
区块 1	1 109	1 823
区块 2	1 823	1 586

根据基于 Louvain 算法的区块结构划分,进一步将 2015 年全国 10 个“弃风”省份的风电输出区域进行细化,分别用大庆、白城、沈阳、张家口、朔州、灵武、酒泉、乌鲁木齐、大理、扎鲁特和乌兰察布 11 个城市的地理位置作为“弃风”区域的风电输出节点。其中,内蒙古自治区分为蒙东和蒙西地区,进而建立 31×31 的有向矩阵。

结合西电东输,云南输电送至广东工程,线路全长 1959km。据测算,云南向广东输电的配电和损耗成本为 0.2 元/(kw·h)。根据 2015 年全国陆上风力发电上网标杆电价(见表 6)和 2015 年非“弃电”省份电网企业平均销售电价(见表 7),进一步对矩阵中的有效风电输送关系进行筛选。

通过 Gephi9.1 进行 Geo layout 分布,如图 6(见 2386 页)。其中由于数据获取困难,研究不包括西藏、香港、澳门和台湾。全国风电跨区并网网络共划分为 5 个区块:

- (1)黑龙江、吉林、辽宁、北京和天津;
- (2)蒙东地区、河北、山东、山西、江苏、安徽、上海和浙江;
- (3)蒙西地区、宁夏、陕西、河南、湖北、江西、湖南和福建;
- (4)甘肃、重庆和贵州;

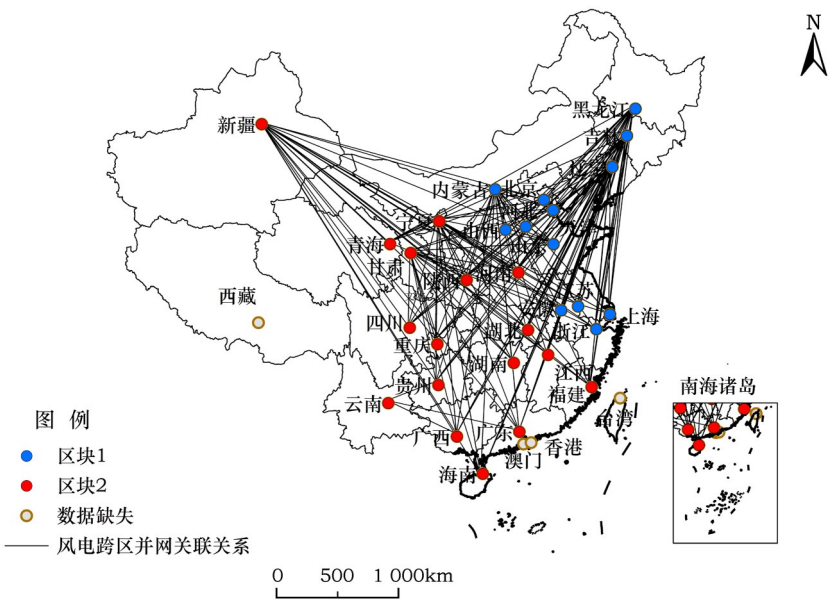


图 5 基于 Louvain 算法的中国风电跨区并网网络

Figure 5 China's wind power interconnection network based on Louvain's algorithm

2017年12月

表6 2015年全国陆上风力发电上网标杆电价

Table 6 The electricity price of the national onshore wind power grid in 2015

资源区	陆上风电标杆上网 电价/(元/(kW·h))	各资源区所包括的地区
I类资源区	0.51	内蒙古呼和浩特市、包头市、乌海市、鄂尔多斯市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、锡林郭勒盟、阿拉善盟;新疆乌鲁木齐市、伊犁哈萨克族自治州、克拉玛依市、石河子市
II类资源区	0.54	河北张家口市、承德市;内蒙古赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市;甘肃嘉峪关市、酒泉市
III类资源区	0.58	吉林白城市、松原市;黑龙江鸡西市、双鸭市、七台河市、绥化市、伊春市,大兴安岭地区;甘肃兰州市、金昌市、白银市、天水市、武威市、张掖市、平凉市、庆阳市、定西市、陇南市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州;新疆吐鲁番市、哈密市,阿克苏地区、喀什地区、和田地区、昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州、巴音郭楞蒙古自治州、塔城地区、阿勒泰地区、阿拉尔市、图木舒克市、五家渠市、北屯市、铁门关市、双河市、可克达拉市、昆玉市;宁夏
IV类资源区	0.61	除I类、II类、III类资源区以外的其他地区

数据来源:《关于适当调整陆上风电标杆上网电价的通知》^[33](发改委价格[2014]3008号)。

表7 非“弃电”省份电网企业平均销售电价和居民用电平均电价

Table 7 The average selling price of power grid enterprises and residents in not "abandoned" provinces

地区	平均销售电价 /(元/(kW·h))	居民用电平均电价 /(元/(kW·h))
北京	0.78	0.50
天津	0.73	0.50
山东	0.70	0.54
陕西	0.55	0.51
青海	0.38	0.41
上海	0.76	0.57
浙江	0.75	0.56
江苏	0.69	0.52
安徽	0.68	0.57
福建	0.64	0.57
湖北	0.67	0.58
河南	0.61	0.56
湖南	0.68	0.61
江西	0.71	0.62
四川	0.53	0.53
重庆	0.65	0.54
广东	0.70	0.67
广西	0.56	0.56
贵州	0.49	0.49
海南	0.73	0.63

(5)新疆、青海和四川。

且5个区块均为以负荷地区为核心,以“弃风”地区为边缘的“核心-边缘”结构。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于复杂网络分析方法,建立了全国风电

跨区并网网络模型,对“弃风”区域风电“溢出效应”进行了分析。通过“弃风”省份的“弃风率”和“弃风”电量,风电负荷省份“十三五”的能耗“双控”指标,以及“弃风”省份跨区外输的空间距离等变量,作为衡量“弃风”省与负荷省份间并网强弱的衡量指标。并根据复杂网络的中心性和小世界等特征,利用k-core聚类算法对风电跨区并网网络中“核心”省份的挖掘。并基于Louvain社团算法对网络中关联度大的地区进行了区块划分。研究的主要结论如下。

(1)全国风电跨区并网遵循“地理邻近”原则。从“弃风”省份空间溢出效应来看,网络输出核心省份为甘肃、宁夏、内蒙古和新疆地区。从区域电网归属角度来看,全国风电输出的核心区域电网为:西北电网和华北电网。结合风电并网区块划分,作为中国主要的“弃风”区域,东北电网应积极并网输送至邻近华北电网,为华北和华东电网覆盖省份消纳。

(2)风电跨区并网的“弃风”消纳的核心为西北和华北电网;风电负荷核心为华中电网。负荷“核心”相对分散,分别隶属于华北、华东、南方、华中、西北五大区域电网。网络中负荷“核心”为各区域电网碳排放量最大的地区。

(3)本文的风电跨区并网的区块划分不同于传统区域电网络局,划分依据除具有地域倾向性以外,探究了低碳经济背景下,减排“双控”目标以及风电传输损耗对风电并网的影响。区块结构均呈现以负荷地区为核心,“弃风”地区为边缘的“核心-边缘”结构。

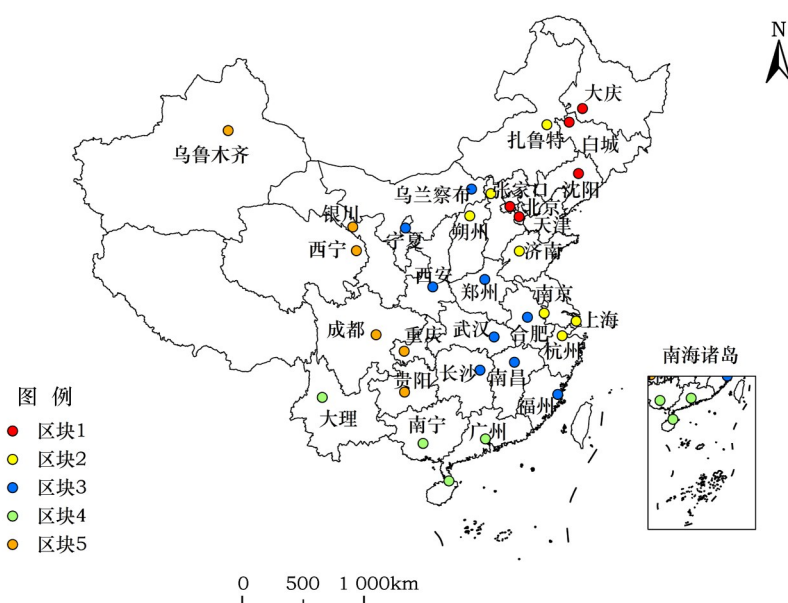


图6 中国风电跨区并网网络的区块结构划分

Figure 6 The block structure of Chinese wind power cross-zone network

5.2 讨论

本文只尝试分析了“弃风”区域跨区外输的并网网络结构,由于中国“弃风”区域集中在“三北”地区,全国并网网络的电能输出区域相对集中,区块划分尚缺乏一定合理性。在低碳经济背景下,应打破传统区域电网的藩篱和省域壁垒,使得清洁能源得到更大的消纳,实现资源更大范围的优化配置。积极推进跨省输配电价的核定工作,制定跨省跨区配电价动态调整机制,适当降低增量电价的省内输配电价,提高可再生能源竞争力,促进跨省跨区电力市场交易,有效缓解弃风、弃光、弃水严重的问题。

参考文献 (References):

- [1] Papers H O C. Our energy future: creating a low carbon economy [J]. *ENB on the Side-IISD Reporting Services*, 2003, 13 (10): 1-1.
- [2] York N. World investment report 2010: Investing in a low-carbon economy[J]. *Environmental Policy Collection*, 2010, 291 (6489): 193-193.
- [3] Regeringskansliet R O. Strategy for a successful climate conference in Paris 2015[J]. *Ministry of the Environment and Energy*, 2015, (3): 1-8.
- [4] 邢万里. 2030年我国新能源发展优先序列研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015. [Xing W L. The Priority Sequence of New Energy Development[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.]
- [5] 全球风能理事会. 2015年全球风电发展展望报告[J]. *电器工业*, 2016, (11): 34-35. [Global Wind Energy Council. Global wind power development outlook report in 2015[J]. *Electrical Appliance Industry*, 2016, (11): 34-35.]
- [6] 全球风能理事会. 2016年全球风电装机统计[J]. *风能*, 2017, (2): 52-57. [Global Wind Energy Council. China's wind power capacity statistics in 2016[J]. *Wind Energy*, 2017, (2): 52-57.]
- [7] 戚庆茹, 刘建琴, 王智冬. 适应我国大规模风电接入的合理电网结构构建原则的思考[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(6): 83-96. [Qi Q R, Liu J Q, Wang Z D. Designing principles for reasonable power grid structure to accommodate integration of large-scaled wind farms[J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(6): 83-96.]
- [8] 魏晓霞. 我国大规模风电接入电网面临的挑战[J]. *中国能源*, 2010, 32(2): 19-21. [Wei X X. The challenge of wind power has great potential for exploitation in our country[J]. *Research and Approach*, 2010, 32(2): 19-21.]
- [9] 曹卫琴. 我国风电消纳问题研究[J]. *电气工程学报*, 2014, (6): 42-45. [Cao W Q. Consumption of wind power in China[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, (6): 42-45.]
- [10] 云天吉, 翁莎莎. 风电并网技术的发展现状[J]. *农村电气化*, 2007, (5): 47-49. [Yun T J, Weng S S. Current situation of wind power integration technology[J]. *Rural Electrification*, 2007, (5):

2017年12月

- 47-49.]
- [11] 白顺明,杨东俊,盛尧,等. 区外直流特高压送大区电网电能消纳方式分析[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 84-91. [Bai S M, Yang D J, Sheng Y, *et al.* Electric power consumption mode analysis of UHVDC outside sending to large area of power grid[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(1): 84-91.]
- [12] 程路,白建华,贾德香,等. 国外风电并网特点及对我国的启示[J]. 中外能源, 2011, 16(6): 30-34. [Chen L, Bai J H, Jia D X, *et al.* Characteristics of wind power integration in foreign countries and lessons for China[J]. *Sino-Global Energy*, 2011, 16(6): 30-34.]
- [13] 金晶亮,李晨宇,彭超华,等. 风电并网背景下的低碳电力调度策略[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2017, 19(2): 10-17. [Jin J L, Li C Y, Peng C H, *et al.* Low-carbon power dispatch with wind power[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences)*, 2017, 19(2): 10-17.]
- [14] 刘新东,陈焕远,方科. 利用负荷需求响应提高大规模风电并网能力[J]. 中国电力, 2012, 45(4): 10-14. [Liu X D, Chen H Y, Fang K. Research on demand response for wind power integration into smart grid[J]. *Electric Power*, 2012, 45(4): 10-14.]
- [15] 袁铁江,彭超锋,梅生伟,等. 基于提高消纳能力的风电平衡区域电网划分方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2129-2134. [Yuan T J, Peng C F, Mei S F, *et al.* A partitioning method to enhance accommodation capability of power network with balanced region of wind power[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2129-2134.]
- [16] 申永涛,刘宗歧,刘文霞,等. 风电接入对电力系统节点脆弱性的影响分析[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 1-5. [Shen Y T, Liu Z Q, Liu W X, *et al.* Impact of wind power integration on power system node vulnerability[J]. *Modern Electric Power*, 2013, 30(6): 1-5.]
- [17] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, *et al.* Complex networks: Structure and dynamics[J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4-5): 175-308.
- [18] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, *et al.* Complex networks: Structure and dynamics[J]. *Complex Systems & Complexity Science*, 2007, 424(4-5): 175-308.
- [19] Fagiolo G, Reyes J, Schiavo S. The evolution of the world trade web: a weighted-network analysis[J]. *Journal of Evolutionary Economics*, 2010, 20(4): 479-514.
- [20] Sun K. Complex Networks Theory: A New Method of Research in Power Grid[C]. Dalian: Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005.
- [21] Fenu G, Nitti M, Pau P L. A Complex Network Approach for a Regional Power Grid Analysis[C]. Lithuania: Second International Conference on Digital Information Processing and Communications, 2012.
- [22] Pagani G A, Aiello M. The Power Grid as a complex network: a survey[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2013, 392(11): 2688-2700.
- [23] 王靖飞. 基于复杂网络的风电消纳能力评估模型改进[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 136-139. [Wang J F. Wind power accommodation capacity evaluation model based on complex network[J]. *Electric Power*, 2017, 50(1): 136-139.]
- [24] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2015年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2016, (2): 48-63. [Chinese Wind Energy Association. China's wind power capacity statistics in 2015[J]. *Wind Energy*, 2016, (2): 48-63.]
- [25] 黄天翔. 基于风电消纳能力最大化的博弈分析与机制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012. [Huang T X. The Research on the Game Analysis and Mechanism Based on the Maximization of the Capacity of Wind Power Utilization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.]
- [26] Hagström E, Norheim I, Uhlen K. Large-scale wind power integration in Norway and impact on damping in the Nordic grid[J]. *Wind Energy*, 2005, 8(3): 375-384.
- [27] 孙玺菁,司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. [Sun X J, Si S K. Complex Network Algorithms and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.]
- [28] 国家能源局. 国家能源局关于2016年度全国可再生能源电力发展监测评价的通报[J]. 太阳能, 2017, (5): 5-9. [National Energy Administration. Report of the national energy administration on the assessment of the national renewable energy power development monitoring in 2016[J]. *Solar Energy*, 2017, (5): 5-9.]
- [29] 中华人民共和国国务院. “十三五”节能减排综合工作方案[J]. 建材发展导向, 2017, 15(2): 10-10. [The State Council. Comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction in the 13th five-year plan[J]. *Development of Building Materials*, 2017, 15(2): 10-10.]
- [30] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, *et al.* Fast unfolding of communities in large networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment*, 2008, 30(2): 155-168.
- [31] 吴祖峰,王鹏飞,秦志光,等. 改进的Louvain社团划分算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(1): 105-108. [Wu Z F, Wang P F, Qin Z G, *et al.* Improved algorithm of Louvain communities dipartition[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(1): 105-108.]
- [32] 中研普华风电设备行业. 2016年风电行业研究报告[EB/OL]. (2016- 05- 23) [2017- 11- 01]. <https://wenku.baidu.com/view/cbd3570a50e2524de4187e9b.html>. [China Research and Development of the Wind Power Equipment Industry. Annual

Research and Consultation Report of Panorama Survey on China Industry[EB/OL]. (2016-05-23) [2017-11-01]. <https://wenku.baidu.com/view/cbd3570a50e2524de4187e9b.html>.]

- [33] 国家发展改革委. 关于适当调整陆上风电标杆上网电价的通知 [EB/OL]. (2014-12-31) [2017-01-07]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201501/t20150109_659879.html.]

cn/gzdt/201501/t20150109_659879.html. [National Development and Reform Commission. Notice of Appropriate Adjustment of Onshore Wind Power Benchmarking [EB/OL]. (2014-12-31) [2017-01-07]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201501/t20150109_659879.html.]

Analysis of cross-regional grid integration of wind power under a low carbon economy

ZHANG Hong^{1,2}, WANG Limao^{2,3}, ZHANG Yingzhuo⁴, MOU Chufu^{2,3}, FANG Yebing⁵, YANG Huimin⁶

(1. College of geospatial information, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Management, City University of Seattle, Seattle 98121, America;

5. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

6. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In the context of low-carbon economy, the proportion of wind power in energy structure is increasing rapidly. The installed capacity and accumulated installed capacity of wind power continues to be the largest in the world, but the phenomenon of abandoning wind resources in the Northeast Area, North Area and Northwest Area of China is serious. An important means to solve the problem of abandoning wind resource is by connecting it to the power grid and transporting out. Here we explore network characteristics in abandoned wind resource regions based on the spillover effect and from the perspective of geography based on complex network analysis. The law of gravity as the force improved using variables, such as space distance, electric quantity, abandoned wind rate, energy intensity reduction and incremental energy consumption control target in the 13th Five-Year Plan. The main driving force of wind power generation is the rate of wind rejection and carbon emissions. Northwest and North China Area grids are the export- core of Cross- Regional Grid Integration of Wind Power and Central China Area grid is the import- core. Community division across the grid has the characteristics of geographical orientation presenting a ‘core-edge’ structure of the abandoned wind resources areas is the core and the power consumption area is the edge. Communities in the wind power regional grid are proposed based on the limitation of transmission loss to electricity pricing.

Key words: low carbon economy; wind power generation; abandoned wind resources; inter-regional grid connection; Northwest power grid; North China power grid; Central China power grid; China