

中国省际电力流动空间格局及其演变特征

马丽^{1,2}, 张博¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 基于国家电力市场交易年报和中国能源统计年鉴等资料, 核算建立解释度在 95% 以上的 2006 年和 2015 年省际电力 O-D 流表, 并运用影响力、外向度、汇聚力和依赖度等指标, 对中国省际电力流动的源点与汇点及流场特征进行分析, 比较 2006-2015 年电力流动格局的变化。然后运用网络分析方法, 分析了省际电力联系网络的空间结构特征及其变化, 解析了网络变化对流场格局变化的影响方式。研究发现: 2006-2015 年中国的电力源点体系逐步由中部地区向西部地区推移, 重点向西南地区集聚; 电力产销格局的空间差异加大, 源点电力输出量和汇点电力输入量呈现增加趋势, 省际电力流动的规模和网络联系密度都呈现加强趋势; 电力输送的西电东输格局并没有打破, 但随着特高压技术的发展与应用, 远距离电力输送成为可能, 一些大的电力汇点采取了多源点供应, 电力联系网络逐步趋于均衡化, 省际电力流场在保持既有三大通道的同时, 网络化增强。

关键词: 电力流动; 流场分析; 网络特征; 演变

中国煤炭、水力、风能和光伏等电力资源禀赋主要集中在中西部地区, 而电力消费主要集中在东部沿海地区, 电力生产地与消费地存在较大的空间错位, 由此需要跨区调配来实现电力产品在稀缺与富足地区间的空间均衡。2015 年, 中国省际间电力市场交易电量达到 7221.4 亿 kWh, 其中跨区交易电量 (跨不同电网) 3519.9 亿 kWh, 分别占到当年电力生产量的 12.4% 和 6.1%。电力短缺的上海、广东等省市, 其从区外输入的电力占到当年地区电力消费总量的 29% 和 17%; 而中西部电力资源丰富的内蒙古、山西等地, 电力输出量占到当年地区电力产量的 40% 和 30%。

能源的空间流动主要是由于能源供需的空间不平衡所致, 因此其研究最初主要是从交通运输的角度探讨如何保障能源的供给^[1-5]。后期部分经济地理学者注重流背后的区域经济因素, 讨论了煤炭流流量与地区煤炭产销差异、距离和价格的相关关系^[6-9], 分析了省际石油流的源—汇系统、流场和节点结构以及背后的驱动机制^[10-15]。总体来看, 现有能源流空间特征的研究主要依据交通运输或贸易数据, 或者省区能源生产与消费差距数据对能源流的空间格局特征进行分析^[16], 且对能源跨区域流动的研究主要以煤炭流和石油流为主, 对区际电力流的研究相对甚少。

能源的空间联系格局是区域社会经济空间联系的重要反映。不同区域之间的能源生产和供应不仅仅是资源开发与消费问题, 也是不同区域之间经济、政治、文化、技术、生态、社会等关系的反映^[17]。因此有学者通过国家之间的能源贸易联系来研究不同国家

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371142)

作者简介: 马丽 (1975-), 女, 山西祁县人, 博士, 副研究员, 研究方向为能源、产业地理与区域发展。

E-mail: mali@igsnrr.ac.cn

和地区在能源技术和创新知识方面的空间格局变化与扩散机制^[18]。能源联系网络不仅反映了联系、依赖和控制的空间格局,同时也有助于理解空间之间的地理联系和相互作用^[19]。由此,区际之间的电力联系网络不仅仅是一个网络化基础设施,也是中国不同区域之间在电力生产与消费关系、国家对区域能源平衡与安全保障战略思考的综合反映。新世纪以来随着中国电力产销规模的扩大以及输电技术的进步,省际电力流动的规模和格局都发生显著变化。鉴于此,本文以省际电力流动为对象,通过运用省际间的电力交易量和各省电力平衡表,计算出2006-2015年的省际电力O-D流表,对其源汇及流场的空间格局及其时空变化特征进行分析,并运用网络分析方法对省际电力联系网络的特征变化进行分析,探讨电力联系网络变化对省际电力流场的影响,以期对省际电力流动格局及演变进行解析和阐释。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 省际电力O-D流表的建立

设区域*i*流向区域*j*的电力流量为 O_{ij} ,区域*i*承接区域*j*的电力流量为 D_{ji} ,研究区域总数为*n*,则某*i*省的电力输出总量 $O_i = \sum_{j=1}^n O_{ij}$,电力输入总量 $D_i = \sum_{j=1}^n D_{ji}$ 。根据电量守恒原则,每年省际间的电力流量 $E_i = \sum O_i = \sum D_i$ 。

根据《电力市场交易年报》《国家电网统计资料汇编》和《中国南方电网公司年鉴》中的省际之间的电力交易量计算每个省流向其他省的电力流量 O_{ij} 。由于省际之间的电力流动要依靠省级电网之间的联络线通道进行,而一些省之间的联络线不止一条,因此每一个省际之间的电力总流量 O_{ij} 都是数条联络线电力交易量之和。最后,将全部计算好的点对点电力流量数据 O_{ij} 列入O-D矩阵,获得省际之间的电力O-D流表。

1.2 电力源汇点强度刻画

源点强度的刻画借用物流场强度指标^[20],采用影响力 RO_i 和外向度 IO_i 指标。其中影响力定义为源点的电力输出量 O_i 占全国省际间电力流总量 E_i 的比例,表明源点在全国电力输出市场的重要程度。当 RO_i 较高时,可视区域*i*为重要源点。计算公式为:

$$RO_i = O_i / E_i \quad (1)$$

外向度 IO_i 定义为区域*i*电力输出量 O_i 占其电力生产量 P_i 的比例,表示区域电力外送量在其生产量中的份额。计算公式为:

$$IO_i = O_i / P_i \quad (2)$$

对于汇点强度的刻画,本文提出了汇聚力 RD_i 和依赖度 ID_i 指标。其中汇聚力定义为汇点的电力输入量 D_i 占全国省际间电力流总量 E_i 的比例,表明汇点在全国电力输入市场的重要程度。当 RD_i 较高时,可视区域*i*为重要汇点。计算公式为:

$$RD_i = D_i / E_i \quad (3)$$

依赖度 ID_i 定义为区域*i*电力输入量 D_i 占其电力消费量 C_i 比例,表示区域接受外来电力输入量在其生产量中的份额。当 ID_i 较高时,表明区域电力消费的对外依赖程度较高。计算公式为:

$$ID_i = D_i / C_i \quad (4)$$

1.3 电力联系网络结构分析

省际间的电力流动均依赖具体的省际间电力传输线路完成,多省之间的输电线路构成省际间电力联系网络。将各省视作节点,电力输送的线路视作边,借用网络分析中节点中心度和网络密度指标进行分析,以刻画省际间电力联系网络的特征。

度中心性(Degree Centrality)是网络分析中刻画节点中心性(Centrality)的最直接度量指标。一个节点的度中心性越高,该节点在网络中就越重要。节点*i*的度中心性 $C_D(N_i)$ 是其与其他 $g-1$ 个节点联系总数的比值,其计算公式^[21]为:

$$C_D(N_i) = \sum_{j=1}^g x_{ij} / (g-1) \quad (5)$$

网络密度是刻画网络中节点间相互连边的密集程度,定义为网络中实际存在的边数与可容纳的边数上限的比值。一个具有 g 个节点和 L 条实际连边的网络,其网络密度 $d(G)$ 为:

$$d(G) = \frac{2L}{g(g-1)} \quad (6)$$

1.4 研究的基本单元和数据来源

由于数据的可得性与可比较性,本文以中国除港澳台外的31个省级行政单元为基础,综合考虑电力传输系统中电网划分方式进行调整。在华北电网中,京津冀地区电网的划分与省级行政区划不尽重合,其主要分为京津唐电网和河北南网,故将其合并为一个整体研究单元;江浙沪之间电力联系紧密,且多条高压和特高压传输电路都是以供应江浙沪地区为名,电力传输落地点对于三省差异不大,因此也将江浙沪视作一个整体的研究单元。故本文的O-D电力流矩阵共包含27个研究单元。

省际间流量数据主要来自2007-2016年《国家电网公司统计资料汇编》中的“国家电力市场交易量”数据和2007-2016年《中国南方电网公司年鉴》中的“南方电网概况”数据。同时参考了2007-2016年《中国能源统计年鉴》中各省能源平衡表中的电力省外调入量和本省调出量数据作为各省电力调入调出总量参考数据。

1.5 数据可信度分析

由于统计来源的不同,根据《国家电网公司统计资料汇编》建立的O-D表的中国省际间电力流总量与《中国能源统计年鉴》各省电力输出量总和之间有一定差距。2006年O-D流表数据电力流量总和2817亿kWh,《中国能源统计年鉴》各省电力输出量总和2980亿kWh,有近164亿kWh流量未能分配解释,占到当年各省电力输出量总和的5.5%;2015年O-D流表数据电力流量总和8769亿kWh,《中国能源统计年鉴》各省电力输出量总和8912亿kWh,有近144亿kWh流量未能分配解释,占到当年各省电力输出量总和的1.6%,俱在合理范围之内,表明O-D流表可以对省际电力流动格局进行分析。

2 结果分析

2.1 2006-2015年中国省际电力流动格局特征及演变

2006-2015年中国省际间电力流量从2817亿kWh增加到8769亿kWh,增长幅度超过了该时期电力消费规模的增长倍数。同期电力源点、汇点以及流场都随着电力资源的开发和电力传输通道的建设而有所变化。基于已建立的2006-2015年的省际电力O-D流表,对这两个时段的电力源地、汇地体系及其流场格局进行分析,以考察中国省际电力

流动格局及其演变特征。

2.1.1 电力源地体系

运用式(1)、式(2)计算出不同省区的影响力和外向度,对源点及其强度,以及电力的主要源地体系进行分析(表1)。

表1 2006年和2015年各省电力源点和汇点强度变化

Table 1 Main indicators of source and destination of electricity flow in 2006 and 2015 (%)

地区	2006年				2015年			
	影响力	外向度	汇聚力	依赖度	影响力	外向度	汇聚力	依赖度
京津冀	0.26	0.36	27.53	27.70	2.48	6.13	20.51	36.13
山西	15.34	28.32	0	0	8.18	29.30	0.22	1.10
内蒙古	19.67	39.23	0.35	0.81	15.38	34.33	0	0
辽宁	1.17	3.26	8.90	20.41	2.43	12.80	6.81	30.07
吉林	1.53	9.74	0	0	2.27	27.24	1.72	23.19
黑龙江	4.23	18.44	2.32	10.93	1.59	15.99	0.99	10.00
江浙沪	0.81	0.45	17.25	8.88	0.07	0.08	22.14	19.27
安徽	2.99	11.46	0.43	1.84	4.87	20.69	0.05	0.28
福建	1.34	4.18	0.01	0.04	0.34	1.55	0.02	0.10
江西	0.13	0.83	0.51	3.14	0	0	1.20	9.68
山东	0	0	0.02	0.03	0	0	5.85	9.90
河南	3.40	5.98	1.50	2.76	0.66	2.20	5.46	14.75
湖北	19.52	42.07	5.52	17.38	9.34	34.98	1.82	8.57
湖南	1.09	4.06	1.83	5.65	0.99	6.63	1.46	8.35
广东	0	0	20.46	19.19	0.12	0.26	22.38	36.96
广西	0.76	4.09	2.75	13.38	1.38	9.29	1.55	10.20
海南	0	0	0	0	0	0	0.12	3.78
重庆	1.26	12.23	4.86	33.75	0.17	2.23	2.06	20.68
四川	3.62	8.30	0.92	2.45	14.44	40.45	0.54	2.33
贵州	12.26	35.01	0	0	8.39	40.56	0	0
云南	3.86	14.43	0	0	12.55	43.43	0	0
西藏	0	0	0	0	0	0	0.07	0
陕西	1.72	8.30	1.40	6.81	4.24	22.88	2.04	14.64
甘肃	2.32	12.30	2.50	13.12	2.67	18.86	1.18	9.42
青海	1.75	17.52	0.49	5.63	0.33	5.08	1.26	16.81
宁夏	0.97	7.01	0.43	3.23	3.81	28.95	0.53	5.31
新疆	0	0	0	0	3.30	11.66	0	0

(1) 山西、内蒙古、湖北、贵州、四川和云南六省区是重要的电力源点。2006年山西、内蒙古、湖北和贵州四省区影响力均在10%以上,电力输出量之和占到全国省际间电力流量的66.8%。由于当时中国实施分层分级电网系统,全国被分成几个大电网区,在区内基本实现平衡,因此在不同的电网内还有一些小规模源点。如东北电网主要以黑龙江为主要源点,华东电网以安徽为主要源点,而华中电网除湖北外,河南也是重要源点;西南地区除贵州外,四川和云南也是重要的源点,这5个源点的影响力均在3%以上。2015年,影响力在10%以上的源点只有内蒙古、四川和云南三省区,山西、湖北和

贵州的影响力均降到10%以下,且内蒙古影响力还有所下降,但四川和云南却有所上升。而在各电网内部,黑龙江、河南不再成为主要的电力源点,东北华北地区电网依然以内蒙古和山西为主要源点,华东电网依然以安徽为电力源点,华中电网也只余湖北为电力源点。西部省区的电力输出量增加,除云南、贵州外,西北的陕西、甘肃、宁夏也成为新的电力源点,表明电力源点向西部地区转移趋势明显。

(2) 几大源点也是外向度最高的省份,即地区外输电力在本地发电量中占据较高比例的区域。2006年外向度最高的地区是湖北省,外输电量占到其本地发电量的42%;其次是内蒙古、贵州和山西,外向度均在25%以上;再次是黑龙江、青海、云南、甘肃、重庆和安徽,外向度均在10%以上。但是到2015年,云南取代湖北成为电力外向度最高的省份,且四川、贵州的外向度也大幅度提升,三省的外向度均在40%以上,由此导致西南地区成为电力输出集中的区域;其次是内蒙古、吉林、山西、安徽、湖北、山西、宁夏、陕西等区域电网的源点,其电力外向度也在20%以上。比较不同省区2006年和2015年的外向度变化,发现除内蒙古、湖北和黑龙江外,许多源点省区的电力外向度都有显著增加,表明电力生产的区域相互依赖度在逐渐加强。

2.1.2 电力汇地体系

电力输入量反映了区域在电力资源供不应求状态下从其他地区调入电力资源的情况。运用式(3)、式(4)计算各省的汇聚力和依赖度,对电力汇点及其特征进行分析(表1)。

(1) 京津冀、江浙沪和广东省是主要汇点。2006年三大地区的汇聚力均在20%左右;其次是辽宁、重庆、湖北等地,汇聚力在5%以上。2015年该格局基本保持不变,三大地区汇聚力保持在20%左右,其中江浙沪和广东有所提高,而京津冀则有所下降,表明江浙沪和广东在全国电力受端市场的份额增强。在三大地区之外,占据重要比例的省份依次是辽宁、山东和河南等省,汇聚力在5%左右。重庆和湖北的汇聚力较2006年显著降低。

(2) 从汇点的依赖度看,三大地区作为全国重要的电力输入地区,其对外部电力的需求规模逐步扩大,对外电力依赖度逐步加强。2015年江浙沪地区输入电量是2006年的5.0倍,电力依赖度也由8.9%增加到17.3%;广东省和京津冀地区的输入电量也分别比2006年增大3.4倍和2.3倍,电力依赖度分别增加17.8个百分点和8.7个百分点。此外,山东、辽宁等沿海省份以及吉林、河南、陕西、青海等中西部省份的电力依赖度也有所增强。其中山东和辽宁由于产业发展的重型化加大了本地的电力需求,电力依赖度分别增加了9.9个百分点和9.7个百分点。而吉林、河南、陕西、青海等省电力依赖度的增强则与其成为区际电力网络中的重要中转节点相关。

2.1.3 电力流场格局与通道

电力流场反映了电力产品在生产地和消费地之间的流动方向和规模,具有反映流动规律和供需格局的空间属性。通过对中国省际电力流动的重要源点和汇点的流场格局进行分析发现,受地理位置和从属大区电网影响,省际电力流场自北到南呈现显著的“西电东输”三大通道格局。

(1) 北部通道以山西和内蒙古为主要源点,以京津冀地区为主要汇点。2006年山西通过大同地区的火电厂点对点网和中部的网对网形式向京津冀地区送电320.7亿kWh,占其

电力输出量的74.2%;内蒙古通过丰镇—万全、托克托电厂—浑源、岱海电厂—万全、上都电厂—姜家营输电线路向京津冀地区输出电力407亿kWh,占其电力输出量的73.4%。由此山西和内蒙古共向京津冀输入电力727.7亿kWh,占到了当年京津冀总输入电量的93.9%,是京津冀的主要外输电力源,并在华北电网内部形成山西和内蒙古向京津冀地区送电的“两源—汇点”的电力输送格局。此外,山西还通过阳城电厂电力直送江苏111.5亿kWh,占到其电力输出总量的25.8%;内蒙古蒙东电网通过伊敏电厂—冯屯、元宝山电厂—董家向东北电网送电106.6亿kWh,其中78.1%送向辽宁省。

2015年山西和内蒙古两省区的电力外输格局基本不变,但是随着晋东南—荆州特高压线路的开通,山西开始向华中电网输电;山东电网完全纳入华北电网后由于其电力需求增大,京津冀地区部分电力输入山东省。同时京津冀的外输电力源在继续以山西和内蒙古为主体外,接收东北电网和陕西的电力供应量也有所增加,该年陕西省输往京津冀的电量达到230.8亿kWh,占到京津冀电力净流入量的14.6%。

(2) 中部通道主要呈现以湖北、安徽、四川为源点,向江浙沪地区输电的格局。湖北是中国中部电力输出的重要源点。2006年湖北电力输出量551.3亿kWh,占到全国电力调出总量的18.5%,其输出的电力主要来自葛洲坝和三峡电站。根据三峡电站的供电协议,三峡电站供电区域除华中四省外,还专门建设了从宜昌到江苏和上海的500 kV直流线路、从荆州到广东惠州的500 kV直流线路向江浙沪和广东地区输电。2006年,湖北向这两个区域输电235.7亿kWh和196.9亿kWh,分别占到当年全国省际间电力流量的8.3%和7.0%。但到2015年由于华中地区自身电力不足,湖北向南方电网和华东电网的输电量增加幅度较小,而自身留存比例增加,导致该年其向江浙沪和广东电力输送量占全国省际间电力流量的比例已分别下降到3.4%和1.6%。

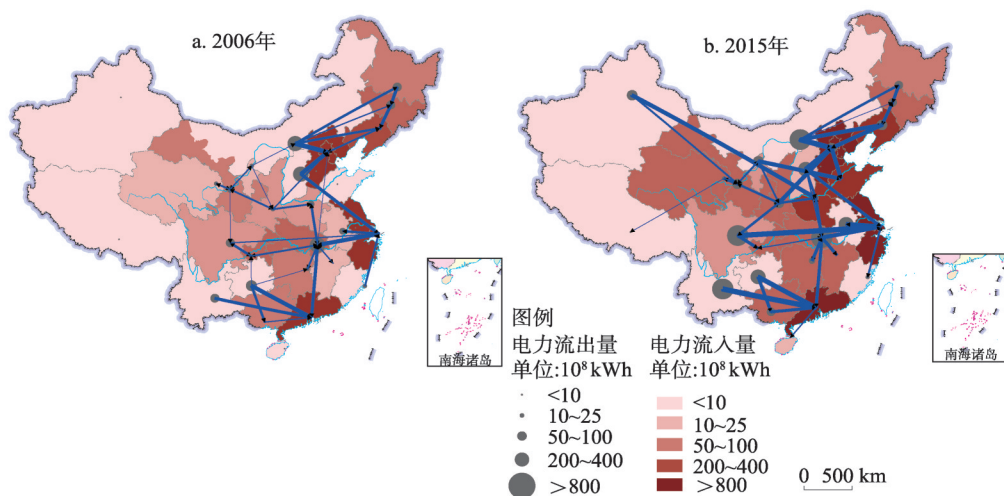
作为江浙沪地区最近的电力源点,2006年安徽向江浙沪地区输电84.2亿kWh,之后随着安徽煤电基地的建设,以及2013年淮南—浙北—上海1000 kV特高压输电通道竣工,皖电外送规模进一步扩大,2015年为483.8亿kWh,占到当年该省发电量的23.5%。

除湖北和安徽外,江浙沪地区还从山西、四川接收电力。但是2006-2015年不同省区在江浙沪汇场格局中的地位有所变化。2006年江浙沪输入电力主要来自湖北、山西两省,分占电力输入量的48.5%和23.0%,但是到2015年,四川和安徽取而代之成为主要电力输入源,分占当年电力输入量的51.0%和24.2%,湖北和山西的比例则分别降到了15.2%和8.1%。四川省在2013年之前受输出通道限制,只能通过川渝电网向重庆送电再接送湖北,川电外送规模较小。但随着溪洛渡和向家坝水电站的开发以及复奉、锦苏、宾金等特高压线路的修建,2015年川电外送规模已达到1266亿kWh,是2006年的70多倍,成为电力外送第二大省区。其外送电力的80%输送到江浙沪地区,少量输送到重庆,还有部分电力通过省际互联输向陕西和甘肃。

(3) 南部通道主要是由云南、贵州、广西向广东输电。2006年贵州和云南分别向广东输入电力250亿kWh和108亿kWh,占到当年广东电力输入总量的64.5%;2015年随着云南水电开发力度加强,云南向广东电力输出量达到1100亿kWh,是2006年的4.4倍;云贵两省向广东省的电力输入总量已达1700亿kWh,占到当年广东电力输入总量的86.6%。相对而言,湖北外送广东电力规模占广东电力总输入量的比例从34.2%降至7.2%,基本与广西持平。

2.2 电力流动的网络结构特征及变化

电网是电力流动的重要基础设施,省际之间如果有输电线路连接,电力流动才会发生。如果输电线路的等级较高,且有多条线路存在,则电力传输规模就较高。因此省际电力流动网络的变化是驱动电力联系格局变化的重要因素。根据省际间的联系线路及其流量,绘制出2006年和2015年省际间电力流动网络图(图1)。



注:本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为GS(2016)1579标准地图制作,底图无修改。

图1 2006年和2015年省际电力流动网络及格局

Fig. 1 Spatial pattern of Chinese inter-provincial electricity flow in 2006 and 2015

2.2.1 网络节点

2006年省际电力联系网络中节点中心度最高的地区是湖北省。其由于地理位置的特殊性,是西南地区与华东地区电力输送的重要中转点,也是连接华北电网与华中电网的重要节点,且与南方电网也有连接。其省际联系线路有10条,中心度为38.5%。其次是内蒙古,中心度为30.8%,省际联系线路共有8条;再次为京津冀、辽宁、江浙沪等汇点区和作为西北地区电力中转点的甘肃,省际联系线路均为7条,中心度为26.9%。中心度最低的是海南、西藏和新疆三个边疆省区,中心度皆为0,即该省电力独立成网,与其他地区没有电力交换。

2015年中心度最高的地区是陕西省。随着西北地区火电和风、光清洁能源的开发,陕西作为最靠近东部沿海消费地区的西部省区,成为西北电网与华北电网、华中电网联系的重要中转节点。其中心度为46.2%,对外连接线路有12条;其次是湖北和青海,中心度都为38.5%,其中青海成为西北电网与西藏电网连接的重要节点;再次是四川、宁夏和新疆,中心度皆为34.6%,其中四川作为江浙沪电力主要源点,还与西藏、西北电网、南方电网进行连接;宁夏和新疆则随着其电力资源开发,分别通过特高压与山东、河南连接。平均而言,2015年27个研究区节点的中心度均值为20.5%,相较2006年15.4%的平均水平有较大程度提升,且充分表明省际电力联系频度的加强。电力联系网络

高中心度节点逐步向西部转移,也表明西部地区在中国电力省际流场格局中的地位提高。西部地区受经济规模限制,本地电力消费能力有限,其电力开发强度和外送规模在很大程度上取决于外送电力通道的建设与能力。2015年,陕西、青海、四川、宁夏、新疆等西部省区节点中心度大大提高,由此促进其建成为电力输出的重要源点。

2.2.2 网络密度

电力的交流对是电力空间调拨覆盖面和联系密度的重要指针。2006年27个研究区实际形成了54个电力交流对,到2015年增长到72对,网络密度由15.48%增加到20.5%。同时,线路等级也不断提高。2006年输电线路等级多为500 kv,但到2015年,则出现了800 kv和1000 kv的特高压线路。电网线路的增多和密度增强以及高等级输电线路的建设促进了省际电力流动规模的增高以及电力流动的空间跨度加大。

2008年晋东南—南阳—荆门中国第一条特高压交流试验示范工程通道建成之前,省际间的电力交流主要集中在区域电网内部,跨电网的交流对较少。2006年,跨区的电力联系线路只有东北与华北电网连接的高姜线、葛洲坝和三峡电力外送的龙政直流、葛南直流、宜华直流,以及阳城电厂送江苏、联系华中电网和华北电网的辛嘉线,连接华中与西北电网的灵宝线等7条线路。但随着中国特高压技术的发展,中国可以实现远距离的电力安全运输,由此促进了跨电网电力联系线路的增加。2015年跨电网的电力联系线路增加至15条,即在2006年基础上增加了晋东南—南阳—荆州的特高压示范工程、锦苏直流、哈郑直流、德宝直流、宁东直流等。同时,省际间电力传输的规模也逐步增高。2006年,省际间电力输送规模最高的是内蒙古—京津冀,输送电量407亿kWh;但到2015年,省际间电力输送规模最高的为云南—广东,输送规模达到1100亿kWh。

2.2.3 网络均衡性

从电力联系网络的首位度看,网络均衡性有所提高。2006年,输电规模在300亿kWh以上线路一共有两条,分为山西—京津冀和内蒙古—京津冀,首位度是16.86%;2015年输电规模在300亿kWh以上的线路达到了8条,主要集中在云南—广东、四川—江浙沪、贵州—广东、内蒙古—京津冀、山西—京津冀、安徽—江浙沪、内蒙古—辽宁、湖北—江浙沪,首位度降到14.23%,表明省际间的电力联系网络逐步趋于均衡。

省际电力联系网络的均衡性增强也促进了省际电力流动的网络化。2006年,省际电力流动呈现以“西电东输”三大通道为主的流场格局,三大通道之间联系薄弱。2015年的省际电力流动虽然依然呈现三大通道格局,但随着华北—华中特高压线路建设和山东电网纳入华北电网,新疆、西藏与西北电网的联网,使三大通道之间的纵向联系增强,部分省区的源场和汇场范围进一步扩大,促进了全国省际电力流场的网络化。如四川的汇场范围从2006年的江浙沪和重庆逐步扩展到江西、湖北、河南、西藏、陕西;陕西电力输出的汇场范围也从2006年的京津冀、河南、四川、甘肃扩展到青海、宁夏和新疆;新疆电力也开始输出,其汇场范围为甘肃和河南。京津冀不仅是山西、内蒙古的电力汇点,也是山东的电力源点。一些大的电力汇点不再只依赖一个单独的源点,而是采取了多源点供应,由此保证了供电网络的稳定性。

3 结论

本文运用国家电网的电力交易数据,制定了对省际间电力流动解释率在95%以上电

力的O-D流表,对2006年和2015年省际间电力流动格局及其网络的特征与变化进行了分析。研究发现:

(1) 2006年的电力源点主要集中在中部的内蒙古、山西、湖北地区,但到2015年电源点逐步向西推移,西南地区的四川、云南以及西北地区部分省份都成为重要的电力源点。这种推移主要归因于三点:首先,快速的经济增长和2006年之后钢铁、石化、有色、建材等高能耗产业的规模扩大导致部分源点的电力可外送能力减弱;而山西、内蒙、安徽、贵州等以煤电为主的省份由于煤炭资源的开发带来的生态环境压力和约束越来越强,煤电扩张规模相对有限;其次是西部大开发促进了西部地区的经济开发和投资集聚,水电和煤炭资源可以得到大规模开发;第三是远距离输电技术的进步,使西部地区电力输送到东部沿海地区成为可能。

(2) 2005-2016年电力产销格局差异逐步扩大,源点的电力输出量和汇点的电力输入量规模都呈现增加趋势。同时,源点的外向度和汇点的对外依赖度逐步增强,省际电力流动的规模和网络联系密度也呈现加强趋势。由此表明电力生产与消费的区域分工将更为明显,省际间的电力依赖性将进一步加强。

(3) 综合分析源场与汇场的电力流动对应关系,从北到南基本形成了内蒙古和山西向东北三省和京津冀地区供电,中部湖北、安徽、四川向江浙沪地区供电,南部云南、贵州向广东供电的“西电东输”三大通道格局。2006-2015年,三大通道格局依然存在,但由于特高压技术的进步和采用,省际电力输送从立足于区域电网为主逐步转向以跨区电力输送为主。新疆、宁夏、四川、陕西等省区可以直接向东部地区输电。电力联系网络的首位度下降,表明省际间的电力联系网络逐步趋于均衡。一些大的电力汇点不再只依赖一个单独的源点,而是采取了多源点供应。因此,未来省际电力网络将更为完善和均衡化。

参考文献(References):

- [1] TODD D, JIN F J. Interregional coal flows in China and the problem of transport bottlenecks: Upholding the rail option. *Applied Geography*, 1997, 17(3): 215-230.
- [2] 赵媛, 于鹏. 我国煤炭资源空间流动的基本格局与流输通道. *经济地理*, 2007, 27(2): 196-200. [ZHAO Y, YU P. The spatial pattern of coal flow and flowing channel in China. *Economic Geography*, 2007, 27(2): 196-200.]
- [3] 王成金, 莫辉辉, 王姣娥. 中国煤炭资源的流动格局及流场规律研究. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1402-1411. [WANG C J, MO H H, WANG J E. Regularity and pattern of Chinese coal resource flow field. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8): 1402-1411.]
- [4] 汪应宏, 郭达志, 张海荣, 等. 我国煤炭资源势的空间分布及其应用. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 225-230. [WANG Y H, GUO D Z, ZHANG H R, et al. Spatial distribution and applications of coals resource potential in China. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 225-230.]
- [5] 吕涛, 曹永荣. 区域间煤炭调运网络结构的实证分析. *铁道运输与经济*, 2009, (11): 1-7. [LYU T, CAO Y R. Empirical analysis on network structure of the inter-regional coal transportation. *Railway Transport and Economy*, 2009, (11): 1-7.]
- [6] 徐增让, 成升魁, 谷树忠, 等. 资源区域流动的驱动因子分析与流动潜力测度: 以晋煤输出为例. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 773-780. [XU Z R, CHENG S K, GU S Z, et al. Driving forces of resource flow among regions and measurement of resource flow potential: Taking coal flow from Shanxi to other provinces as a case. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 773-780.]
- [7] 成升魁, 徐增让, 沈镭. 中国省际煤炭资源流动的时空演变及驱动力. *地理学报*, 2008, 63(6): 603-612. [CHENG S K, XU Z R, SHEN L. Spatial-temporal process and driving force of interprovincial coal flowing in China. *Acta Geographi-*

- ca Sinica, 2008, 63(6): 603-612.]
- [8] 张雷, 黄园渐. 中国西部地区一次能源供应时空格局变化及其影响. 地理科学进展, 2009, 28(3): 321-328. [ZHANG L, HUANG Y X. Time-spatial coordination of energy supply and its effects in West China. Progress in Geography, 2009, 28(3): 321-328.]
- [9] 唐志鹏, 王亮, 刘卫东, 等. 我国区域闭合性煤炭流的时空分析. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1332-1339. [TANG Z P, WANG L, LIU W D, et al. A temporal and spatial analysis of regional coal transportation of closed loop in China. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1332-1339.]
- [10] 赵媛, 郝丽莎. 20 世纪末期中国石油资源空间流动格局与流场特征. 地理研究, 2006, 25(5): 753-764. [ZHAO Y, HAO L S. The spatial structure of crude oil flow and the characteristic of its flow field in China. Geographical Research, 2006, 25(5): 753-764.]
- [11] 赵媛, 郝丽莎. 我国石油资源空间流动的形成机制. 地理研究, 2008, 27(5): 1027-1036. [ZHAO Y, HAO L S. The forming mechanism of crude oil flow in China. Geographical Research, 2008, 27(5): 1027-1036.]
- [12] 赵媛, 郝丽莎. 我国石油资源空间流动的地域类型分析. 自然资源学报, 2009, 24(1): 93-103. [ZHAO Y, HAO L S. Analysis on the region classification of crude oil flow in China. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 93-103.]
- [13] 杨足膺, 赵媛, 黄克龙. 中国石油资源空间流动的驱动机制分析. 地理研究, 2014, 33(5): 863-875. [YANG Z Y, ZHAO Y, HUANG K L. The driving mechanism analysis of China's crude oil spatial displacement. Geographical Research, 2014, 33(5): 863-875.]
- [14] ZHAO Y, HAO L S, WAN L. Research on the spatial structure of crude oil flow and the characteristics of its flow field in China. Energy Policy, 2007, 35: 5035-5050.
- [15] 赵媛, 牛海玲, 杨足膺. 我国石油资源流流量位序—规模的分布特征变化. 地理研究, 2010, 29(12): 2-12. [ZHAO Y, NIU H L, YANG Z Y. Study on the rank-size distribution and variation of crude oil flow in China. Geographical Research, 2010, 29(12): 2-12.]
- [16] 王宜强, 赵媛, 郝丽莎. 能源资源流动的研究视角、主要内容及其研究展望. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1613-1625. [WANG Y Q, ZHAO Y, HAO L S. Perspectives, main contents and future research of energy resources flow. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1613-1625.]
- [17] CASTÁN BROTO V, BAKER L. Spatial adventures in energy studies: An introduction to the special issue. Energy Research & Social Science, 2018, 36: 1-10.
- [18] YANG Y, POON J P, DONG W. East Asia and solar energy trade network patterns. Geographical Review, 2017, 107(2): 276-295.
- [19] BRIDGE G. The map is not the territory: A sympathetic critique of energy research's spatial turn. Energy Research & Social Science, 2018, 36: 11-20.
- [20] 王志国. 物流场论及其在经济分析中的应用. 地理学报, 1990, 45(1): 90-101. [WANG Z G. The theory of goods and materials flow field and its application in economic analysis. Acta Geographica Sinica, 1990, 45(1): 90-101.]
- [21] 莫辉辉, 金凤君, 刘毅, 等. 机场体系中心性的网络分析方法与实证. 地理科学, 2010, 30(2): 204-212. [MO H H, JIN F J, LIU Y, et al. Network analysis on centrality of airport system. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 204-212.]

The spatial distribution and evolution of interprovincial electricity flow in China

MA Li^{1,2}, ZHANG Bo¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling of the Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is huge spatial disparity between Chinese electricity production and

consumption. Most of coal, hydropower, wind and solar power resource are distributed in western provinces while population and industrial activities are agglomerated in eastern provinces, which lead to a huge amount of inter-provincial electricity flow and trade to realize supply-demand balance. Based on the annual reports of the State Power Market Trading and the China Energy Statistical Yearbook, etc., this paper established the inter-provincial electricity O-D flow matrix for 2006 and 2015 with a degree of interpretation over 95%. Then, taking the influence, extroversion, acceptability and dependence degree as main indicators, this paper analyzed the scale and strength of output and input points of 25 provincial administrative units and 2 regional units in China. The source and sink points of the inter-provincial electricity flow were determined, their field characteristics were studied, and the differences between the two years of 2006 and 2015 were compared. Further, the characteristics and changes of the spatial structure of inter-provincial electricity network were analyzed with the method of network analysis. At last, some conclusion can be drawn as follows.

Firstly, with the development of coal-fired and wind-based clean energy bases in the north-west region and the vigorous development of hydropower resources in the southwest region, the surplus of electricity in the western region has grown rapidly. China's electricity source points gradually shifted from the central to the western region and more concentrated in southwest region. Inner Mongolia, Sichuan and Yunnan became the top three source points of Chinese electricity flow with the proportions of outward electricity to total being more than 10%. Also, their proportions of outward electricity to production were all more than 30%, which means that nearly one-third of electricity was produced for other users. On the other hand, three most prosperous metropolitan regions in China, namely Beijing-Tianjin-Hebei, Shanghai-Jiangsu-Zhejiang and Guangdong, were still the main sink points with their proportions of inward electricity to total being more than 20%. Secondly, the spatial disparities of the electricity production and consumption increased, leading to the increase of sizes of the source output and the sink input. Also, the scale of inter-provincial electricity flow and network contact density showed an increasing trend. During this period, the size of interprovincial electricity flow increased 3.1 times and the inward electricity flow of Jiangsu-Shanghai-Zhejiang, Guangdong and Beijing-Tianjin-Hebei increased 5.0, 3.4 and 2.3 times, respectively. Thirdly, the inter-provincial power flow field presented a significant three-channel pattern of "West-to-East Power Transmission" from north to south, which was affected by geographical location and subordinate regional power grids. From 2006 to 2015, this pattern of three major channels remained unchanged. Further, with the development and application of UHV technology in China, long-distance power transmission became possible so that some large electricity input points can rely on multiple sources of power instead of a single source. Therefore, the inter-provincial electricity network tends to be perfect and balanced in the future.

Keywords: electricity flow; flow-field; network structure; evolution