

# 基于 DEA 的长江经济带省际水电能源效率 评价及提升方向

田 泽, 潘晶晶, 任芳容

( 河海大学商学院, 江苏 南京 210098 )

**摘要:** 聚焦于长江流域水电能源效率评价及提升问题, 综合社会、经济、环境因素, 构建投入产出指标体系, 选取 2008—2017 年长江经济带沿线省市的水电相关面板数据, 采用 DEA 法对各地区的水电能源效率进行评价研究。结果显示: 长江经济带水电能源效率整体水平较高, 其中江苏省和湖北省为“标杆”地区; 中上游城市群各指标水电能源效率得分总体较高; 不同省市水电能源效率的提升方向不同, 如江苏省和浙江省应降低人力投入成本, 安徽省和江西省需提高水电装机设备利用小时数; 重庆市和贵州省需优先、优质发展地区经济并提高固定资产投资回报率等。最后提出长江经济带各地区应开发优质水电、以水资源为刚性约束, 建立绿色水电认证机制, 完善投资补助制度, 优化供需平衡调节, 培养高水平水电人才等建议。

**关键词:** 长江经济带; 数据包络分析; 水电能源效率; 节能减排

**中图分类号:** F426      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-9511(2020)04-0001-07

能源问题已成为全球可持续发展的聚焦点, 同时也是中国所面临的巨大挑战之一。如何提高能源效率、促进中国低碳经济的快速发展是当前面临的重大问题和挑战。2015 年我国水电装机容量突破 3 亿 kW, 位居世界第一, 成为节能减排的主力军。目前, 我国电力行业装机容量占比最多的火力发电是以燃烧煤炭为动力, 污染排放无效率是主要问题, 且相比节能, 火电行业更应着重考虑碳减排目标<sup>[1]</sup>; 排名第二的水力发电<sup>[2]</sup>是一种经济性较好的清洁能源, 主要将水能转换为势能, 成本低、污染小, 可以通过减少污染排放来促进能源环境效率的提升, 从而很好地替代火力发电作用<sup>[3]</sup>。

在长江大保护的背景下, 推动长江经济带发展必须从长远利益考虑, 走生态优先、绿色发展之路, 使青山绿水产生巨大的生态效益、经济效益和社会效益, 全方位开发清洁能源, 有效利用水资源。本文提出水电能源效率这一概念, 是指单位水电能源所带来的经济效益和环境效益, 具体来说即水电能源的开发利用所带来的经济效益和碳减排效益与实际

消耗或投入的资源之比, 进而通过衡量一个地区的水电能源效率促进该地区水力发电优化规模结构、清洁生产与技术升级<sup>[4]</sup>。

长江流域水能资源十分丰富, 但有效利用率却不高, 近几十年才进行了大规模的开发与利用, 借由其天然优势和人文环境的有利条件, 修建了大量水电站。在总水电装机容量不断扩大的过程中, 一方面开发难度逐步加大、成本攀升, 导致水电能源开发利用的经济效益不增反减; 另一方存在地区发展不均衡、资源浪费, 且部分地区发电能源结构不协调, 对二氧化碳的减排目标贡献不足等问题。因此, 对长江经济带水电能源效率进行评价分析有利于把握和衡量该流域水电发展情况及其碳减排效益, 从而进一步发现各地区存在的问题及提升方向, 更好地发挥水电这一清洁能源的经济和环境双重效用。

## 1 文献综述

目前, 国内外大量文献分析了整个电力行业的效率及其影响因素, 其中关于行业效率的研究, 一些

基金项目: 2019 年度江苏高校社科研究重大基金(2019SJJZDA055); 中央高校基本科研业务专项(2019B35814); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX20\_0512)

作者简介: 田泽(1964—), 男, 教授, 主要从事低碳经济理论与政策研究。E-mail: tianze21@126.com

学者采用数据包络分析法,如王金祥等<sup>[5]</sup>运用超效率 DEA 模型对我国主要电力企业进行了效率评价与分析;Tao 等<sup>[6]</sup>应用 DEA 法构建了包含两个不良产出的 DEA 模型,并将其应用于 2000—2010 年长江三角洲地区电力行业环境效率的测度。在电力行业环境效率影响因素研究方面,白雪洁等<sup>[7-10]</sup>通过研究得出经济基础、资源禀赋等会对电力行业效率产生一定作用的结论;张各兴等<sup>[11-13]</sup>认为环境规制强度大小会对电力行业环境效率产生不同的影响。

还有一些学者对电力行业与碳减排的关系进行了研究,表明 CO<sub>2</sub> 排放是电力生产行业环境效率评价的一个重要指标。Zhao 等<sup>[14]</sup>认为,由于 2006—2012 年开发西藏水力发电,当地空气污染物和温室气体减排效果总体呈下降趋势;Woo 等<sup>[15]</sup>构建了爱尔兰发电企业 CO<sub>2</sub> 排放模型,Winters<sup>[16]</sup>提出了二氧化碳交易模型,均表明将 CO<sub>2</sub> 排放相关变量纳入约束体系有助于节能减排目标的实现。

还有部分学者对电力生产消费与国家经济增长之间的关系进行了研究。林伯强<sup>[17]</sup>认为中国电力消费与经济增长之间具有内生性;Rehman 等<sup>[18]</sup>探讨了城乡电力供应及其对巴基斯坦经济增长的影响,揭示了各变量之间的长期关系,得出城乡居民用电消费明显促进经济增长的结论;Ohler 等<sup>[19]</sup>以 1990—2008 年 20 个经济合作与发展组织国家为考察对象,得出在短期内可再生能源和水力发电量有利于 GDP 增长的结论。周睿萌等<sup>[20]</sup>研究认为水电建设对城镇居民可支配收入增长有显著的推动作用。小巴桑等<sup>[21]</sup>提出水电开发能加快产业结构的合理化,并引导其可持续发展。

综合国内外的相关文献,国外研究多停留在宏观层面上,国内则多运用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)法来测评电力行业效率,特别是生产效率和技术效率<sup>[22]</sup>等问题,但研究对象主要为行业或企业、项目等,以省际为对比依据的较少;另外关于水力发电的文献中,目前还没有以水电能源效率为主体的研究,多数从其他方面切入,不够具体和深入。本文以长江经济带沿线省市的水力发电能源效率为研究对象,应用 DEA 法进行水电能源效率评价,通过分析经济带区域和省域水电能源效率水平,探究长江经济带省际水电能源效率的差异情况,从而针对各区优势与差距提出相应的对策建议,促进长江经济带水力发电事业的可持续发展。

## 2 研究方法 及 评价指标

### 2.1 研究方法 及 模型

DEA 法是一种以相对效率为指标的效益评价

方法,用来测算各个生产决策单元(DMU)在统一的产出指标体系中的相对有效性,通过构建生产前沿面来判断和衡量决策单元的有效性。该生产前沿面是基于各投入产出指标及其权重而确定的一条数据包络线,将所有决策单元包络在内,只有位于生产前沿面上才是有效 DMU,其他前沿面内侧分布的为非有效 DMU,与生产前沿面的距离为该非有效 DMU 的改进空间,由此可以将抽象复杂的对比排序问题量化到每个单位综合效率的数量指标<sup>[23]</sup>。

DEA 模型的第一个版本被称为 CCR 模型,假定规模收益不变(CRS),从生产函数的角度看产出,其有效性的定义包含了技术有效性和规模有效性,得出的效率为综合技术效率。相对于其他效率评价方法,DEA 法的优点为:①投入产出指标的权重不是由评价者主观设定,而是根据其具体数据运行求得的最优解,客观性较强;②可以得出每个指标的目标值或冗余及不足情况,非有效单元可据此明确改进方向。因此,认为 DEA 法在水电能源效率的评价与提升问题的研究中适用性较强,且操作简单,清晰明了。具体模型如下。

设有  $n$  个决策单元,假设第  $j$  个 DMU ( $1 \leq j \leq n$ ) 有  $m$  种投入,记为  $x_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),投入的权重表示为  $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $q$  种产出,记为  $y_{rj}$  ( $r = 1, 2, \dots, q$ ),产出的权重表示为  $u_r$  ( $r = 1, 2, \dots, q$ )。则第  $j$  个 DMU 的效率值可表示为

$$h_j = \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_q y_{qj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} = \frac{\sum_{r=1}^q u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (v \geq 0, u \geq 0) \quad (1)$$

则转化为一个极大化问题:

$$\begin{cases} \max h_j = \frac{\sum_{r=1}^q u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \\ \text{s. t. } \frac{\sum_{r=1}^q u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ v \geq 0, u \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

可知式(2)是一个分式规划问题,将其转化为线性规划问题。

令

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad \mu = tu \quad w = tv$$

则

$$\begin{cases} \max h_j = \sum_{r=1}^q \mu_r y_{rj} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m w_i x_{ij} - \sum_{r=1}^q \mu_r y_{rj} \geq 0 \\ (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^m w_i x_{ij} = 1 \\ w \geq 0, \mu \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

求出最优解  $w^*$ 、 $\mu^*$ ，若仅满足  $h_j = 1$ ，则该决策单元为弱有效，否则为无效，若同时满足  $w^* > 0, \mu^* > 0$ ，则为强有效。

## 2.2 投入产出指标的选择

为了探究长江经济带省际水电能源效率及其差异情况，选取长江经济带沿线 10 个省市（由于上海市水力发电量历年显示为零，故未包括在内）作为独立的决策单元，包括江苏省、浙江省、安徽省、江西省、湖北省、湖南省、重庆市、贵州省、四川省、云南省，时间跨度选取 2008—2017 的面板数据，同时考虑数据的可得性，参考吴琦等<sup>[24]</sup>研究中建立的能效测度指标，产出指标为①地区生产总值（亿元），②CO<sub>2</sub> 减排量（Mt），③发电量的加权总和（亿 kW·h），投入指标为①就业人员数（万人），②装机容量（万 kW），③固定资产投资（亿元）的加权总和之比作为测算水电能源效率的指标。

投入指标方面：由于电力行业没有相关统计，故采用电力、燃气、水的生产和供应业城镇单位就业人员以及电力、蒸汽、热水生产和供应业投资分别代替作为劳动力投入和固定资产投资；装机容量直接反映了各省市水力发电能力的高低，也间接反映了一定的固定资产投资量。产出指标方面：以地区生产总值作为经济产出；发电量是衡量发电效率的重要指标，反映了水力发电的直接成效；在环境约束下，采用 CO<sub>2</sub> 减排量作为一项理想产出，水力发电是一种替代性清洁能源，其大力发展的主要意义在于大大减少了火力发电的碳排放。

计算思路及方法为：基于同样发电量火力发电产生的 CO<sub>2</sub>，将发电量转化为标煤，1 度电消耗 360 g 标准煤；1t 原煤等于 0.714t 标准煤；原煤的平均低位发热量为 20908 kJ/kg，CO<sub>2</sub> 排放系数为 94600 kg/TJ，故 CO<sub>2</sub> 减排量等于发电量与 0.36/0.714 及 20908 × 946 × 10<sup>-10</sup> 的乘积。

## 3 实证分析

### 3.1 各省市水利水电发展现状

长江流域不仅是我国的黄金水道，其三峡大坝等一些国家重大项目更是成为中国水利水电工程的样板。近年来，长江流域水利水电开发和应用对温室气体排放减少的贡献显著。水利水电开发和应用的 高质量发展，构建了清洁低碳、安全高效的能源体系，促进了生态文明建设，但在实践中也存在一些问题。如长江流域沿线 10 个省市装机容量与发电总量较大，但省际差异显著，部分地区发展不均衡、不充分，甚至存在小水电过度开发的问题；另外近 10 年来各省市水利水电开发应用增速各异、步调不一，导致长江流域水利水电发展出现两极分化。

由表 1 可知，各省市水力发电容量即装机容量逐年上升，增速各异，其中四川省和云南省的增速最为迅猛，2017 年装机容量分别为 2008 年的 3.9 倍和 3.5 倍，其次是贵州省和江苏省，均增长了 1 倍多，再次是安徽省、重庆市和江西省，相比 2008 年，其 2017 年装机容量分别增长了 94%、74% 和 65%，最后是湖南省、浙江省和湖北省，分别增长了 47%、32% 和 26%。

由图 1 可知，长江经济带水力发电量主要来源于四川、云南和湖北 3 省，其次是湖南省和贵州省，但与前三省差距较大，这些省市均分布在长江中上游，而长江下游的江苏省、浙江省、安徽省和江西省则总占比不足 10%。另外重庆市虽处于长江上游，但其水力发电量较低，与周边地区相差甚远。从时间维度来说，长江经济带沿线省市中，四川省和云南

表 1 长江经济带 10 个省市水力发电装机容量

单位：万 kW

DMU	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
江苏	114	114	114	114	114	114	114	114	115	265
浙江	896	956	969	971	984	986	995	1002	1154	1185
安徽	156	162	169	200	278	282	288	291	295	303
江西	371	377	404	407	418	458	484	490	613	615
湖北	2905	3001	3085	3386	3595	3616	3627	3652	3663	3671
湖南	1065	1146	1299	1337	1372	1401	1510	1534	1553	1570
重庆	406	453	488	598	611	642	652	676	688	707
贵州	947	1361	1655	1866	1728	1908	1955	2056	2089	2145
四川	2224	2581	3070	3342	3964	5266	6239	6939	7246	7714
云南	1574	2090	2435	2842	3306	4409	5361	5782	6088	6186

注：数据来源于中国电力年鉴。

省的水电占比在稳步提升,而湖北省的水电占比则明显下降,其余省市变化不大。

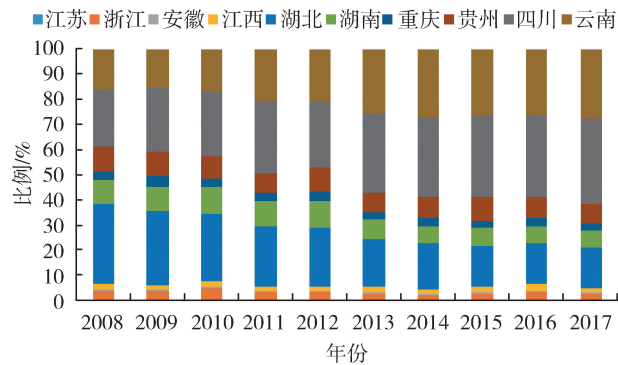


图1 长江经济带10个省市历年水电发电量占比

### 3.2 效率值分析

#### 3.2.1 总效率得分

根据模型的测算原理,采用产出导向的CCR模型进行分析。所谓产出导向,即在不增加投入的条件下,使产出最大化进而达到最优。运用MaxDEA 7 Basic对所取样本的数据进行分析,进而得到2008—2017年长江经济带省际能源效率值,见表2。

总体而言,平均水电能源效率分别为1.00、0.90~1.00、0.80~0.90、0.80以下的省市个数比为2:4:2:2,其中江苏省和湖北省水电能源效率值最高,为1.00;安徽省最低,为0.57,且与第一名江西省的效率值0.75相差较多。

就省际历年趋势变化而言,江苏省和湖北省的水电能源效率得分始终保持在1.00的水平,说明相对于其他地区的表现,这两个省的相对水电能源效率值最优,即在同样的投入水平下,江苏省和湖北省实现了能源的最大化产出,构成了效率的最佳生产前沿面。其他地区水电能源效率值与该地区到最佳生产前沿面的距离有关,距离越远,效率越低。表2中被参考次数是指各省市历年作为参考标杆的总次数,即作为有效决策单元被其他非有效单元参考的总次数。由相应数据可以明显看出,江苏省和湖北省是其他省市的主要参考标杆,原因在于江苏省是经济大省,地区GDP作为产出指标,对江苏省综合

效率的贡献较大;而湖北省拥有水电装机容量及发电量遥遥领先的三峡大坝,且经济发展水平也较高,故这两个省的水电能源效率表现最佳。

四川省历年相对效率值均在0.90以上,与生产前沿面十分靠近,其平均效率值达到了0.99,且在2009—2016年效率值均为1.00,只有2008—2017年略低。云南省的发展趋势与四川省类似,2009年效率值较低,为0.78,其他均高于0.90。分析其原因,一方面,四川省和云南省经济发展水平略落后于江苏省和湖北省,而从整个水利水电发展现状来看,水利水电工程建设一般远离居民区,主要在一些地势偏远、条件恶劣的地区,尤其在水利水电基地区域的西部地区,工程的勘察与施工难度更大,建设成本不断攀升,加之征地、移民安置、补贴等难题,严重制约了西部水利水电的优质开发。且四川和云南两个水电大省存在严重的“弃水”现象,造成清洁电力的高度浪费。由于电价政策制度不完善,居民用电成本较高,导致市场交易规模小,电力消费不足,加之外送通道建设落后,因此水电调度力差、消纳受阻,无法得到理想的经济回报。另一方面因其水力发电量与装机容量之比,即利用小时数相对湖北省较低,导致在产出导向下的效率评价中,四川省和云南省的发电量相对不足,故而其水电能源效率整体略落后于江苏省和湖北省。

安徽省历年水电能源效率值最高为0.63,说明安徽省的效率水平一直较低,虽然总体趋势略有上升,但尚有较大的提升空间。江西省历年水电能源效率值浮动区间较大,为0.60~0.98,且趋势不稳定。安徽省和江西省水电能源效率最低,原因在于这两个地区的水电站多为抽水蓄能式,建设成本高,缺乏天然地势优势和高技术人才,特别是安徽省,水电设备利用小时数不足,加上经济发展相对落后,导致其水电能源效率水平较低。浙江省、湖南省、重庆市、贵州省的情况类似,水电能源效率表现均较好,历年效率水平发展也较稳定,都有能源效率值为1.00、DEA有效的年份。

表2 2008—2017年长江经济带省际能源效率值

DMU	能源效率值										被参考次数	均值	排名
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年			
江苏	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	46	1.00	1
浙江	0.80	0.76	0.78	0.74	0.74	0.90	0.87	1.00	0.96	0.90	0	0.84	7
安徽	0.42	0.55	0.46	0.58	0.60	0.58	0.59	0.63	0.60	0.62	0	0.57	10
江西	0.72	0.60	0.76	0.61	0.80	0.84	0.74	0.98	0.82	0.64	0	0.75	9
湖北	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	43	1.00	1
湖南	0.83	0.91	0.96	0.93	1.00	1.00	0.92	1.00	1.00	0.96	8	0.95	5
重庆	0.85	0.92	0.88	0.82	0.92	0.75	0.95	0.91	0.97	1.00	2	0.90	6
贵州	0.97	0.73	0.61	0.58	0.86	0.71	0.88	1.00	1.00	0.92	1	0.82	8
四川	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	19	0.99	3
云南	0.95	0.78	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	11	0.96	4

### 3.2.2 各指标效率得分

由图2分析可得,首先从指标的角度出发,地区生产总值、CO<sub>2</sub> 减排量与发电量历年效率均值的省际差异情况,都是浙江省、安徽省、江西省及贵州省较低,其中安徽省3个产出指标的效率得分最低,均低于0.60;就业人员数效率得分最低为江西省0.58,其余省市均高于0.80;装机容量效率得分最低为浙江省0.69,其次为安徽省0.85,其余省市该指标均接近生产前沿面,效率得分接近1.00;固定资产投资效率得分省际差异较小,不存在其他指标较突出的低峰值,各省市该指标效率得分均高于0.80,云南省最低。

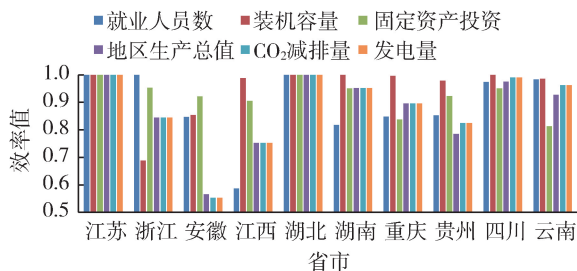


图2 长江经济带省际历年各指标效率均值指标

其次从省际角度出发,江苏省和湖北省各效率值均为1.00的点,四川省也基本类似。云南省除固定资产投资效率得分较低外,其余指标效率得分基本接近于1.00。浙江省、安徽省、江西省各指标效率得分差异较大,其中安徽省各指标效率水平均不高,特别是产出指标方面,而湖南省、重庆市和贵州省则略有差异。

由图3可以看出,长江经济带省际3个产出指标效率得分的曲线基本吻合,浙江省、安徽省、江西省较低,即离生产前沿面较远,贵州省也略低;而3个投入指标效率得分则差异相对较大,特别是浙江省和江西省,分别为装机容量效率和就业人员数效率得分最低。

由图2和图3可以得出:长江上游成渝经济区和中游城市群各指标总体效率得分较高,而下游长江三角洲地区除江苏省以外,均需要提升各指标效

率得分。

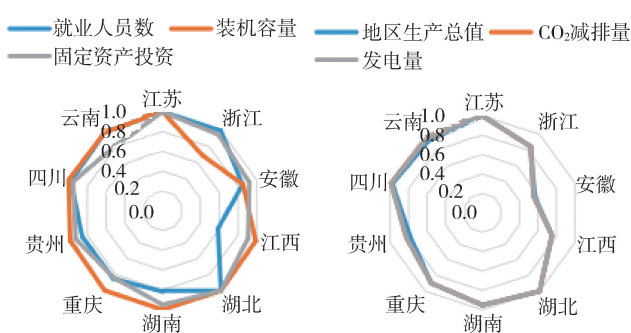


图3 投入与产出指标效率得分对比雷达图

### 3.3 评价指标对偶价格与效率改进方向分析

DEA模型可以根据对偶价格分析来发现不同地区未来提高水电能源效率的改进重点与方向,限于篇幅,仅以2017年数据为例进行分析,见表3。

由表3可知,2017年①江苏省、浙江省投入指标就业人员数对偶价格绝对值远远超过其他省市,表明这两个省要提升水电能源效率,首先要解决电力行业人力资本投入冗余问题,适当精简水电行业人力资源。②安徽省和江西省投入指标装机容量绝对值较大,适当缩小生产规模、降低装机设备投入成本有助于有效提高其水电能源效率。③重庆市和贵州省的投入指标固定资产投资绝对值较大,说明这两个地区大量的固定资产投入产出无效,投资回报率有待提高,需缩减相应的固定资产投资;且贵州省的产出指标地区生产总值对偶价格也略高于其他省市,这也与其经济发展水平较为落后的实际情况吻合,故贵州省应优先发展地区经济,缩小其与其他省市的经济差距。④安徽省和江西省的产出指标CO<sub>2</sub> 减排量与其他地区差距较大,说明其水电行业对火电行业的环境污染缓冲力较小,或是水电行业在该地区电力行业中所占比例较小。因此,安徽省和江西省需降低装机设备成本,提高CO<sub>2</sub> 减排量,即提升水力发电量,高质量发展水电行业,在有限的人力物力资源条件下,实现清洁能源的二次利用及效益最大化。⑤其余省市,包括湖北省、湖南省、四川省

表3 2017年长江经济带沿线省际效率值及各投入产出指标的对偶价格

DMU	总效率值	投入产出指标的对偶价格/10 <sup>-5</sup>					
		就业人员数	装机容量	固定资产投资	地区生产总值	CO <sub>2</sub> 减排量	发电量
江苏	1.00	-6761.33	0	0	1.16	0	0
浙江	0.90	-1227.73	0	-89.57	1.68	132.82	0
安徽	0.62	0	-330.07	0	0.75	8251.30	0
江西	0.64	0	-162.58	0	0.37	4064.41	0
湖北	1.00	0	-27.24	0	0	696.18	0
湖南	0.96	0	-45.80	-40.65	0.77	1221.86	0
重庆	1.00	0	-88.91	-119.31	2.16	2414.27	0
贵州	0.92	0	0	-331.75	4.84	390.52	0
四川	0.97	-65.32	-12.78	0	0	333.69	0
云南	1.00	-81.94	-16.03	0	0	418.64	0

和云南省,均位于长江中上游,水电开发利用经验丰富,各项投入冗余较小,改进空间不大,故其主要提升方向在于提高 CO<sub>2</sub> 减排量,更加有效地发挥清洁能源的优势。

### 3.4 聚类分析

系统聚类是常用的多要素样本分类方法,基于各样本的数据按其相似度和趋同性进行分组归类。在长江经济带省际水电能源效率方面,各个地区存在一定的异同。以表 3 为对象进行系统聚类及分析,结果见图 4。

根据聚类分析分类结果可知,第一类,即长江经济带水电能源效率第一梯队,包含江苏省、湖北省、四川省、湖南省、云南省、重庆市 6 个地区,数量最多,且这 6 个省市除江苏省外均来自长江中上游。这一梯队代表了长江经济带水电能源效率得分的基本水平,是其他梯队成员的标杆,但这仅仅是长江经济带省际的相对效率排名,并非绝对优势,因此第一梯队成员也要不断提高自身的水电能源效率,发挥对其他地区的影响和带头作用。第二梯队包括浙江省、贵州省,在长江流域中一上一下,这两个省水电能源效率得分中等,但与第一梯队相差不大。第三梯队和第四梯队分别为江西省和安徽省,其水电能源效率的优化是重中之重,需大力改善和重点提高。

## 4 结论和对策建议

### 4.1 结论

本文选取 2008—2017 年长江经济带沿线 10 个省市的水力发电面板数据,用 DEA 方法测算了各地区的水电能源效率,并从不同角度进行了差异分析与聚类分析,得出以下结论。

a. 2008—2017 年长江经济带省际能源效率值呈现四大梯队:第一梯队为江苏省、湖北省、四川省、湖南省、云南省、重庆市;第二梯队为浙江省和贵州省;第三梯队为江西省;第四梯队为安徽省。长江水电能源效率的标杆地区为江苏和湖北省,四川省和云南省虽为水力发电的主力军,但综合多投入—多产

出评价体系,其效率得分略低于江苏省和湖北省,其原因在于其经济效益及水电设备利用效益较低。

b. 总体来说,长江上游成渝经济区和中游城市群各指标效率得分较高,而下游长江三角洲地区除江苏省以外,均需提升各指标效率得分,且有较大改善空间。具体来说,浙江省、安徽省、江西省 3 省的产出指标效率得分较低,主要因为水能资源地域分布不平衡,水力资源主要集中在西南地区,东部地势平缓,缺乏天然水能资源,这就需要在这些地区投入大量资金进行抽水蓄能水电站的建设,而这类电站的高成本导致其运行经济效益和生态补偿效益相对较差。

c. 不同省市水电能源效率的提升方向不同,如江苏省和浙江省应精简水电行业从业人员数,降低人力投入成本;安徽省和江西省需要提高水电装机设备的利用小时数;重庆市和贵州省经济发展水平较低,且对于水力发电工程或水电站建设的投资回报率低,特别是贵州省,从单个指标分析,这两个省市的装机容量效率得分均较高,但是发电量和 CO<sub>2</sub> 减排量效率得分不高,可见其在发电过程中存在技术效率低或资源浪费、发电机组利用率低的现象。其余省市同样也要以此为提升着力点,实现帕累托最优。

### 4.2 对策建议

a. 开发优质水电,实现区域共同发展。长江水电开发采用梯级开发战略,发掘沿线各省市的优势与差距。长江上游具有地理优势,水流落差大,支流众多,应从流域整体考虑,各省市之间实施联合调度,利用规模效益,有效增加水电产出;中游各省市应采用区域内一对一拉动性协同发展,做到集中控制、优化运行;长江下游水电能源效率省际差异较大,应以以点带面、逐步完善为原则,依托其经济优势,调节能源结构,实现节能—低碳—循环的高级经济效益,控制中小流域的开发。

b. 以水资源作为刚性约束,建立绿色水电认证机制。树立“以水而定,量水而行”的理念,注重长江流域的水生态保护与治理工作。如可以在水电开发的基础上,对水电的绿色发展提出标准和要求,严

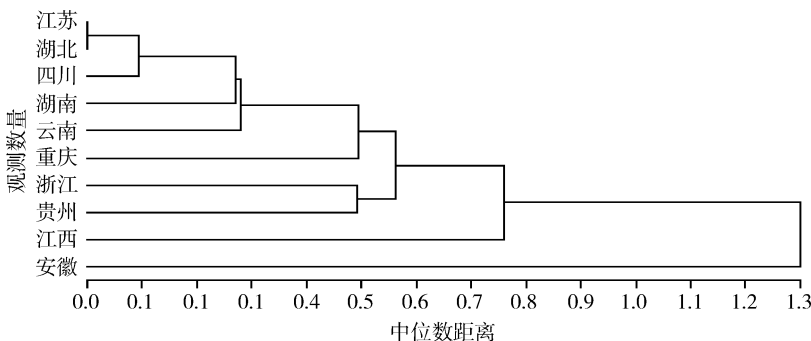


图 4 系统聚类的谱系

格将生态保护目标或水电能源效率纳入评估标准,建立绿色水电认证制度,通过认证的水电工程才予以投入建设,还要进行后续的复查监测,从而有效控制水电工程的滥用和无序开发,以维持优质的水资源、健康水生态和宜居的水环境。

c. 建立并完善投资补助和分摊机制。①积极解决西部地区生态环境脆弱、资源环境矛盾突出且开发难度大等制约性难题。②加大对偏远地区的基础设施建设、交通道路投资建设。③妥善解决移民安置问题,做好水电工程建设征地补偿安置。④健全投融资和分摊机制:一是社会融资体系,调动各方面治理开发和保护长江的积极性,可以建立东中西部或各省市互补性对接,形成东部经济发展能力、中部技术水平和西部水能资源的完美结合;二是长效补偿机制,相比于开发,更应该重视流域生态保护和水电监督工作;三是设立相关基金以获得更多资金投入。

d. 优化供需平衡调节,力促水电消纳。调节供需平衡,加大电力需求侧的管理,刺激电力消费需求,引导电力用户改变消费行为,尤其是转向对清洁能源的消费;加快建设处于“西电东送”战略性地位的水电基地,实现长江经济带乃至全国电力综合均衡,如水电大省四川省、云南省和湖北省,可有效扩大其水电消纳范围,实现从规模引领到规范引领。

e. 加强人才培养,提高水电建设效率。注重培养专业能力领先、实践经验丰富、科技创新能力较强的骨干人才,加强国际国内技术合作与对外交流,提高水电企业的技术效率和管理效率;重视选拔和培养表现较突出、素质水平较高的水电建设人才,特别是主动扎根基层或投身西部边远地区建设的一线人才。

#### 参考文献:

[ 1 ] 王喜平,田丹丹,孟明,等. 环境约束下火电企业全要素能源效率研究[J]. 华东电力,2013,41(6):1317-1323.

[ 2 ] 周兴波,杜效鹤. 2018 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23.

[ 3 ] 金晓雨. 水电替代火电提高能源环境效率了吗? 基于三峡水电工程的实证分析[J]. 经济评论,2017(5):14-27.

[ 4 ] 刘旭红. 区域工业绿色发展水平评价指标体系框架设计[J]. 广西财经学院学报,2017,30(4):50-56.

[ 5 ] 王金祥,吴育华. 基于超效率 DEA 模型的电力公司效率评价[J]. 东北电力学院学报,2004(4):22-25.

[ 6 ] TAO Ye, ZHANG Shilong. Environmental efficiency of electric power industry in the Yangtze River Delta[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013,58(5-6):927-935.

[ 7 ] 白雪洁,宋莹. 中国各省火电行业的技术效率及其提升方向:基于三阶段 DEA 模型的分析[J]. 财经研究,2008(10):15-25.

[ 8 ] 王群伟,周德群. 中国全要素能源效率变动的实证研究[J]. 系统工程,2008(7):74-80.

[ 9 ] 邵留国,何莹莹,张仕璟,等. 基于网络 DEA 的中国火电行业循环经济效益及影响因素研究[J]. 资源科学,2016,38(10):1975-1987.

[ 10 ] 曲茜茜,解百臣,殷可欣. 考虑非理想产出的中国火电行业效率省际差异分析[J]. 资源科学,2012,34(6):1160-1166.

[ 11 ] 张各兴,夏大慰. 所有权结构、环境规制与中国发电行业的效率:基于 2003—2009 年 30 个省级面板数据的分析[J]. 中国工业经济,2011(6):130-140.

[ 12 ] WELCH E, BARNUM D. Joint environmental and cost efficiency analysis of electricity generation[J]. Ecological Economics, 2009,68(8):2336-2443.

[ 13 ] NEMOTO J, GOTO M. Measurement of technical and allocative efficiencies using a CES cost frontier: a benchmarking study of Japanese transmission-distribution electricity[J]. Empirical Economics, 2006,31(1):31-48.

[ 14 ] ZHAO Wei, KONG Fan'e, SHEN Weishou. Co-benefits of local air pollutants and greenhouse gas reduction achieved by hydropower development in Xizang (Tibet) Autonomous Region, China[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(3):304-313.

[ 15 ] WOO C, LLOYD D, TISHLER A. Electricity market reform failures: UK, Norway, Alberta and California[J]. Energy Policy, 2003,31(11):1103-1115.

[ 16 ] WINTERS T. Electric supply options in a world driven by CO<sub>2</sub> emission policies[J]. The Electricity Journal, 2006,20(1):73-81.

[ 17 ] 林伯强. 电力消费与中国经济增长:基于生产函数的研究[J]. 管理世界,2003(11):18-27.

[ 18 ] REHMAN A, ZHANG Deyuan, CHANDIO A A, et al. An empirical analysis of rural and urban populations' access to electricity: evidence from Pakistan[J]. Energy, Sustainability and Society, 2018,8(1):1-9.

[ 19 ] OHLER A, FETTERS I. The causal relationship between renewable electricity generation and GDP growth: a study of energy sources[J]. Energy Economics, 2014,43:125-139.

[ 20 ] 周睿萌,雷振,唐文哲. 水电建设对地方经济发展影响实证研究:以云南省永善县溪洛渡水电站为例[J]. 水利经济,2015,33(5):43-47.

[ 21 ] 小巴桑,戴林军. 浅析西藏水电开发对区域产业结构调整的作用[J]. 水利经济,2011,29(4):25-27.

[ 22 ] 解百臣,徐大鹏,刘明磊,等. 基于投入型 Malmquist 指数的省际发电部门低碳经济评价[J]. 管理评论,2010,22(6):119-128.

[ 23 ] 邓光耀. 基于污水排放量分配的中国水资源利用效率测算[J]. 水资源保护,2019,35(5):28-34.

[ 24 ] 吴琦,武春友. 我国能源效率关键影响因素的实证研究[J]. 科研管理,2010,31(5):164-171.

(收稿日期:2019-10-15 编辑:胡新宇)