云南省绿色能源发电效率测度及对策研究

——基于对抗型交叉评价 DEA 模型

缪彬 程明倩 孙永河[1]

（昆明理工大学 管理与经济学院，云南 昆明 650093）

【摘 要】：基于对抗型交叉评价 DEA 模型，对云南省绿色能源发电效率从纵向时间、横向省际、全球视角进行测度。研究发现：云南省绿色能源发电效率在 2011—2018 年呈“V”型发展，从省份排名情况来看，云南省情况较好，但是在国际排名中比较靠后。科技水平、供需矛盾、体制机制、协同互补效应不足是影响云南省绿色能源发电效率的主要因素。根据研究结果，提出发展储能技术、延长产业链、完善体制机制、建立绿色能源基地等对策建议，为云南省进一步提升绿色能源发电效率、促进绿色能源产业高质量发展提供决策参考。

【关键词】：绿色能源 发电效率 DEA 模型 交叉评价 影响因素

【中图分类号】：F062.2；F427**【文献标识码】**：A**【文章编号】**：1671-4407(2022)07-072-07

能源是人类社会生存与发展的重要基础，长期以来，化石能源的大规模开发利用带来资源紧张、气候变暖、环境污染等突出问题[1]。减少化石能源的使用，发展绿色能源是当前世界的趋势。绿色能源不仅可以节约资源、减少污染物排放，而且在保障能源安全和提升经济竞争力方面都有显著的作用，为此，世界各国积极探索综合性新能源政策。美国在 1978 年就制定了国家能源法，1999 年开始实施可再生能源配额制，并把生物质能、地热能、太阳能、风能等可再生能源作为重点发展，推动能源结构清洁化。日本立足国情，将技术研发作为能源转型的战略手段，把氢能规模化利用作为重要抓手，推动日本社会能源转型[2]。2020 年，英国出台《绿色工业革命十点计划》，旨在支持绿色就业、加速实现净零排放、实现社会和经济更好的发展。还有相当一部分国家也实施了长远的绿色能源发展计划，并在相应的领域取得了比较优势。改革开放以来，中国一直保持着高速的经济增长，能源消费需求迅速上升，中国已经成为世界上第一大能源生产国和消费国[3]，从能源消费结构来看，中国仍以化石能源消费为主，碳减排压力大。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表讲话时表示，“中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和目标”。“碳达峰”“碳中和”目标提出后，中国各省份积极开展有关政策研究，推进“30·60”目标的实现。

近年来，云南省“全力打造世界一流‘绿色能源牌’”战略并取得了显著成效。绿色能源发电装机容量快速上升，电力供应能力大幅提高[4]，据统计，2019 年云南省一次电力生产占能源生产总量的 75.32%，远高于全国平均水平，其中，绿色能源发电量约占总发电量的 92%，云南省电力生产已经高度绿色化。然而，2019 年，云南省煤炭、石油等化石能源占能源消费总量的 52.2%，一次电力消费量仅占 44.55%，可以发现，传统能源消费结构造成绿色能源消费具有一定的滞后性，激活绿色能源消费需求是改善能源结构的有效途径。然而工业和生活用电需求要求相对平稳，水力发电存在丰枯问题，丰期、枯期发电波动较大；太阳能能量密度小，季节、昼夜、气象等对其影响大；风能的风力和风向时常变化，能量无法集中，这些问题导致了云南省绿色能源发电

[1]**作者简介**：缪彬，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为信息理论。E-mail:7659485@qq.com

基金项目：中国工程院院地合作项目“云南绿色能源产业可持续发展战略咨询研究”(2020YNZH3);云南省省校合作重点项目“边疆欠发达地区中小企业创新发展对策研究”(KKDA202008001)

不稳定情况的发生，影响绿色能源发电效率。

随着资源环境约束趋紧，要实现经济社会与资源环境的协调发展就必须提高绿色能源发电效率，这既是生态文明建设的客观要求，也是推动发展方式转变、实现经济高质量发展的必然选择。云南省绿色能源正处于快速发展阶段，绿色能源资源的利用及转化效率是能源可持续的关键问题之一。本文首先对云南省 2011—2018 年绿色能源发电效率进行纵向测度，然后选取中国 2014—2018 年[1]除西藏、上海和港澳台地区以外的 29 个省份的面板数据进行横向比较(由于未查到上海市水电数据，以及西藏、台湾、香港和澳门缺少相关的数据统计，所以没有加入测度范围)，最后使用 20 个国家绿色能源发电效率(包括中国)与云南省进行对比分析。通过多视角对云南省绿色能源发电效率问题进行研究与分析，把握云南省当前绿色能源发电效率的现状，为云南省加速产业升级和建设清洁低碳、安全高效、智能创新的现代能源体系提供决策参考。

1 文献回顾

绿色能源在概念上可分为狭义和广义两种。狭义的绿色能源是指可再生能源，清洁无污染，如水能、太阳能、风能等。广义的绿色能源是指在能源的开发利用中对环境产生很少的污染，如天然气、清洁煤等[5]。绿色能源主要用于发电、热利用、制作燃料等，其中绿色能源发电是最主要的形式。考虑到研究数据的可获性，本文所研究的绿色能源主要是水能、风能、光伏三种能源。

从 20 世纪 90 年代开始，各个国家的电力产业改革吸引了越来越多的学者对发电效率进行研究。Yunos & Hawdon[6]使用数据包络模型计算了马来西亚与其他发展中国家的发电效率，发现马来西亚发电效率不高，并且不断提升电力生产技术可以提高马来西亚的发电效率。Sugathan 等[7]研究了 2000—2013 年印度燃煤和天然气发电企业全要素生产效率，发现受技术效率和要素配置效率的影响，燃煤发电效率更高，燃气发电效率更低。国内学者范玉仙和袁晓玲[8]从经济、环境和社会方面考察了中国电力行业的全要素生产率和技术效率，研究发现，中国电力行业存在“重经济轻环境，重发电轻输配”的问题，并且技术进步可以提高电力行业全要素生产率。庞雨蒙[9]对发电企业全要素生产率进行计算，发现市场竞争力、有效规制和环境政策提升了发电企业的生产效率，但是产权改革对效率的影响不明显。解百臣等[10]对 2014—2017 年中国电力系统生产效率进行了分析，发现中国电力系统生产效率区域差异明显，电力体制改革对电力系统的发展具有促进作用。

除此之外，还有部分学者对单一能源或者新能源发电效率进行了研究。Wang 等[11]研究了加拿大的水电效率，发现加拿大一些重要的经济地区的水力发电效率较低。Sueyoshi & Wang[12]考察了加利福尼亚大型商业屋顶光伏发电系统的性能，发现光伏发电效率低下，主要是因为管理不当，提出可以通过管理工作来提高规模收益。李少林[13]测度了 23 个国家的新能源发电效率，发现这些国家的新能源发电效率都呈现上升趋势，城镇化率、人均收入水平等会对新能源发电效率产生影响。杨淑霞等[14]对蒙西地区风电场消纳风险进行了测度，并探讨了影响风电场效率的关键因素，研究发现蒙西地区整体消纳风险呈下降趋势，资源禀赋、接入电压等级以及电力市场交易规模是蒙西地区风电场效率的主要影响因素。张协奎等[15]对 2015—2019 年中国西部 11 个省份的可再生能源发电绩效及其影响因素进行了分析，发现可再生能源技术创新水平是影响可再生能源发电绩效的关键因素。Zhou 等[16]研究了 2010—2016 年太阳能发电效率和经济效益对各国太阳能发电规模的影响，发现太阳能发电效率的提高能带动太阳能发电规模和储能的发展。

查阅以上文献可以发现：在研究对象方面，现有文献主要是对电力行业或者单一绿色能源进行研究，部分文献把新能源视为一个整体进行测度，但从绿色能源发电角度进行的研究才刚刚起步。在评价角度方面，多数文献从时间和区域层面分析发电效率的动态变化，同时，从时间、区域、国际角度进行测度的研究不多。本文以云南省绿色能源为研究对象，通过从纵向时间、横向省际和全球视角测度云南省绿色能源发电效率，分析部分绿色能源发电效率高的省份、国家的经验，总结云南省发电效率的影响因素，提出发展对策及建议。

2 方法及指标选取

2.1 对抗型交叉评价 DEA 模型

数据包络方法(DEA)是目前被普遍使用的衡量同类型评价单元相对效率的一种非参数分析方法，已广泛应用于能源、医疗、金融、企业等评价单元相对效率的测度与分析[17]。但是传统 DEA 效率测算会产生多个相对有效的评价单元，且不能对有效评价单元进行排序，除此之外，其最优解是利用最有利于自己的权重计算出的，这个权重可能对各投入和产出指标的分配极为悬殊，在测度过程中，最优解还可能不唯一[18]。考虑到各决策单元能源之间存在竞争关系，本文最终选择使用 Doyle & Green[19]提出的对抗型交叉评价方法，其核心思想是用每一个评价单元(DMU_i)的最佳权重去计算其他 DMU_k 的效率值，同时每一个 DMU_i 在尽可能抬高自己的前提下，尽可能地贬低其他 DMU_k，以实现自身效率最大化情况下各评价单元的交叉评价。

设有 n 个同类型的评价单元，对于第 i 个评价单元 $DMU_i(i=1,2,\cdots,n)$，其 m 种输入构成投入向量 $x_i=[x_{1i},x_{2i}\cdots,x_{mi}]^T$，s 种输出构成产出向量 $y_i=[y_{1i},y_{2i},\cdots,y_{si}]^T$。设 $v=[v_1,v_2,\cdots,v_m]^T$ 和 $u=[u_1,u_2,\cdots,u_s]^T$ 分别是输入和输出的权向量($v\geqslant 0,u\geqslant 0$)，评价单元 DMU_i 的总输出 O_i 与总输入 I_i 之比 $E_{ii}=(\frac{u^Ty_i}{v^Tx_i}),i=1,2,\cdots,n.$，称为 DMU_i 的效率评价指数。评价单元 i 的最优数学模型为：

$$E_{ii}=\max\frac{u^Ty_i}{v^Tx_i}$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\dfrac{u^Ty_j}{v^Tx_j}\leqslant 1,j=1,2,\cdots,n\\ u\geqslant 0,v\geqslant 0\end{cases}\qquad(1)$$

通过 Chanes-Cooper 变换，可以将式(1)1 化为等价的线性规划问题，再进行求解。为此，令 $t=\frac{1}{v^Tx_i}$，$\omega=tv$，$\mu=tu$，则有：

$$E_{ii}=\max\mu^Ty_i$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\mu^Ty_j\leqslant\omega^Tx_j,(1\leqslant j\leqslant n)\\ \omega^Tx_i=1\\ \mu\geqslant 0,\omega\geqslant 0\end{cases}\qquad(2)$$

若式(2)的最优目标值 $E_{ii}=1$，且 $\omega_i>0$，$\mu_i>0$，说明评价单元 DMU_i 是 DEA 有效的。但是在实际的操作中，往往会有多个评价单元效率值都为“1”，并且最优解 $\omega_i>0$，$\mu_i>0$ 可能不唯一，因此引入对抗型交叉评价机制。设 μ_i 和 ω_i 为式(2)的最优解，则$E_{ii}=\mu_i^Ty_i$为 DMU_i 的效率值。

给定 $i\in\{1,2,\cdots,n\},k\in\{1,2,\cdots,n\}$，解下列线性规划：

$$\min\mu^Ty_k$$
$$s.t.\begin{cases}\mu^Ty_k\leqslant\omega^Tx_k(1\leqslant j\leqslant n)\\ \mu^Ty_i=E_{ii}\omega^Tx_i\\ \omega^Tx_k=1\\ \mu\geqslant 0,\omega\geqslant 0\end{cases}\qquad(3)$$

利用(3)的最优解 μ_k 和 ω_k 求出交叉评价值，并由交叉评价值 $E_{ik}=\frac{u_k^T y_i}{\omega_k^T x_i}$ 构成交叉评价矩阵。

$$E=\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：主对角线上元素为自我评价值，其余元素 E_{ik} 为交叉评价值，表示第 i 个评价单元对第 k 个评价单元的评价，最后计算 E 的各列的平均值，平均值是各评价单元对 DMU_i 的总体评价，值越大说明 DMU_i 越优。本文选择对抗型交叉评价 DEA 方法不仅可以对有效评价单元进行排序，而且各评价单元都对其余评价单元进行评价，其效率值更符合实际情况。

2.2 指标选取与数据来源

绿色能源主要用于发电，其投入主要体现在装机容量或发电量的增加上，本文选取水电装机容量、风电装机容量、光伏装机容量、劳动力人数、固定资本存量、科技水平作为投入指标，选取水电发电量、风电发电量和光伏发电量作为产出指标。需要说明的是，由于部分数据缺失，在进行国际比较的时候，只使用水电装机容量、风电装机容量、光伏装机容量作为投入指标，产出指标不变。此外，中国东、中、西部是按照中国统计年鉴中的规定划分，将各个区域的数据汇总后，东、中、西部分别作为评价单元参与测度。由于不能从年鉴中找到绿色能源发电的就业人员，所以选用中国劳动统计年鉴中的电力、热力、燃气及水生产和供应业的就业人员作为劳动力指标数据，固定资本投资采用张军等[20]提出的“永续盘存法”以 2011 年为基期进行指数平减，科技水平使用中国科技统计年鉴中的各省 R & D 项目数。原始数据来源于 2011—2018 年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国电力年鉴》《BP 统计年鉴》《国际统计年鉴》。

3 实证分析

3.1 云南省绿色能源发电效率纵向比较

近几年在各级政府的支持下，云南省以水电为主、以风电和光伏为辅的绿色能源快速发展。鉴于云南省光伏发电数据从 2011 年开始有统计记录，所以本文基于对抗型交叉评价 DEA 模型，使用 MATLABR2014a 软件，先对云南省 2011—2018 年的面板数据进行测算[21]，再对其变化原因进行探讨分析，所选择的投入产出指标值和对应评价单元的效率值如表 1 所示。

由图 1 可知，2011—2018 年，云南省绿色能源发电效率呈现“V”型发展。2011—2012 年绿色能源发电效率呈上升趋势，并在 2012 年达到高点。从 2011 年开始，云南省大力发展以水电为主的绿色能源，持续增加投资，扩大装机容量，改善能源结构。2013 年，绿色能源发电效率开始下降，在 2015 年降到最低。究其原因，这几年云南省水电大规模集中投产，2015 年固定资本投资达到近几年最高值，发电装机增长迅速，但是省内消费端用电和外送负荷消纳不了供给端增量，电量供大于求矛盾突出，从 2013 年开始，云南省出现较大规模水电弃水。近年云南省通过大力发展水电铝、水电硅等清洁载能产业，省内用电比例提升至 55%以上，大规模弃水问题得到基本解决，2016—2018 年绿色能源发电效率逐渐恢复，云南省逐渐从送电大省向用电大省转变，绿色能源发电效率稳步提高。可以发现，政策导向、能源结构、绿色能源投资、绿色能源产业对绿色能源发电效率产生了积极的作用，但是需求不足会对绿色能源发电效率产生负面影响。

3.2 云南省绿色能源发电效率省际比较

2014 年开始，全国大部分省份都在进行水电、风电、光伏同步发展，为了进一步了解云南省绿色能源发电效率在中国的发展情况，本节以省份为 DMU，测算 29 个省份 2014—2018 年的绿色能源发电效率。测度方法同上，测度结果如表 2 所示。

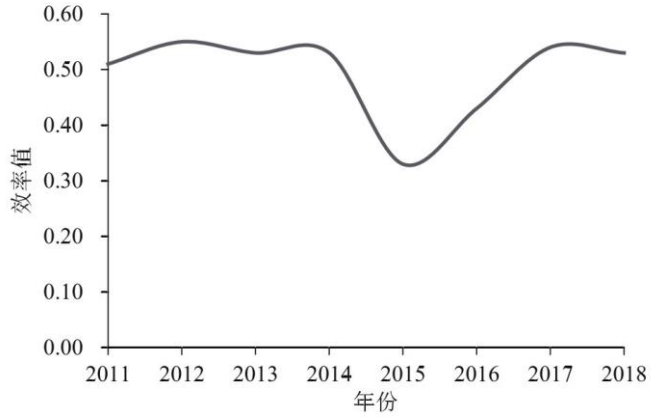

图 1 2011—2018 年云南省绿色能源发电效率

表 2 省际绿色能源发电效率测度结果比较

省份	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	均值	排名
内蒙古	0.6259	0.5834	0.6369	0.6510	0.6760	0.6346	1
宁夏	0.5585	0.4268	0.5337	0.6534	0.6564	0.5658	2
云南	0.5673	0.4529	0.5992	0.6014	0.6076	0.5657	3
河北	0.4924	0.4627	0.5405	0.6157	0.5727	0.5368	4
福建	0.5583	0.5149	0.5689	0.5358	0.4916	0.5339	5
辽宁	0.5347	0.5178	0.5680	0.4999	0.5370	0.5315	6
青海	0.4974	0.4446	0.5156	0.5756	0.6169	0.530	7
山西	0.4863	0.4236	0.5101	0.5556	0.5871	0.5125	8
黑龙江	0.5498	0.4666	0.5106	0.4869	0.5449	0.5118	9
新疆	0.5324	0.3341	0.4442	0.6117	0.5884	0.5022	10
天津	0.5308	0.4533	0.4242	0.5054	0.4399	0.4707	11
江苏	0.4349	0.3902	0.4436	0.4911	0.5554	0.4630	12
甘肃	0.3978	0.3829	0.3977	0.5470	0.5866	0.4624	13
山东	0.4597	0.4431	0.4430	0.4348	0.5261	0.4613	14
吉林	0.4653	0.4197	0.4060	0.4454	0.5150	0.4503	15

安徽	0.3280	0.3086	0.4189	0.5471	0.6049	0.4415	16
陕西	0.3788	0.3731	0.3850	0.4788	0.5246	0.4281	17
湖北	0.4161	0.3536	0.3973	0.4733	0.4577	0.4196	18
海南	0.4312	0.4460	0.4616	0.4077	0.3482	0.4190	19
贵州	0.3668	0.3852	0.4652	0.4474	0.4289	0.4187	20
广西	0.3682	0.3942	0.4204	0.4401	0.4668	0.4180	21
四川	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	22
江西	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	23
湖南	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	24
重庆	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	25
广东	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	26
河南	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	27
浙江	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	28
北京	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	29
西部	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	—
东部	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	—
中部	0.3971	0.3610	0.4041	0.4546	0.4389	0.4111	—

由于引进了各省份之间的交叉评价机制，本文计算的绿色能源发电效率值比其他类似研究计算的数值要低，没有效率值为“1”的有效省份。由图 2 可知，云南省绿色能源发电效率排名全国第三，在国内排名情况较好，位于前两名的省份分别是内蒙古、宁夏，最低几个省份分别是浙江、河南、北京。东、中、西部三大区域绿色能源发电效率呈现西部最高、东部次之、中部最低的格局，这与传统能源效率呈东、中、西部逐次递减的情况不同[22,23,24]，原因是西部地区绿色能源资源禀赋优势明显，效率较高的几个省份都集中在西部。内蒙古风力资源丰富，风电装机容量和发电量一直是中国第一，光伏装机容量虽然位于全国第六，但是发电量位于全国第二，丰富的资源条件使得内蒙古绿色能源发电效率领先全国，达到 0.635。同样，宁夏依托丰富的绿色能源资源，在 2012 年被确定为全国首个新能源综合示范区后，大量能源企业投身宁夏进行风、光资源开发，其绿色能源实现了高速发展。分析发现，绿色能源发电效率高的省份资源禀赋都有明显优势，说明资源禀赋对各省份的绿色能源发电效率有显著的正向影响。

表 1 云南省绿色能源发电效率指标与测度结果

年份	水电装机容量/万千瓦	风电装机容量/万千瓦	光伏装机容量/万千瓦	劳动/人	固定资产投入/亿元	R&D 项目数/项	水电发电量/亿千瓦时	风电发电量/亿千瓦时	光伏发电量/亿千瓦时	效率值

2011	2842	67	2	51782	783	1514	1009	10	0	0.5065
2012	3306	131	3	52684	939	1665	1240	28	0	0.5493
2013	4409	165	11	38183	861	1729	1631	38	1	0.5338
2014	5361	287	28	35794	837	2102	2082	63	3	0.5252
2015	5782	614	117	33433	1100	3017	2177	94	6	0.3303
2016	6088	737	208	34613	832	3441	2268	149	23	0.4340
2017	6281	825	238	23618	586	4122	2502	188	28	0.5369
2018	6649	857	326	23142	657	4216	2699	220	34	0.5343

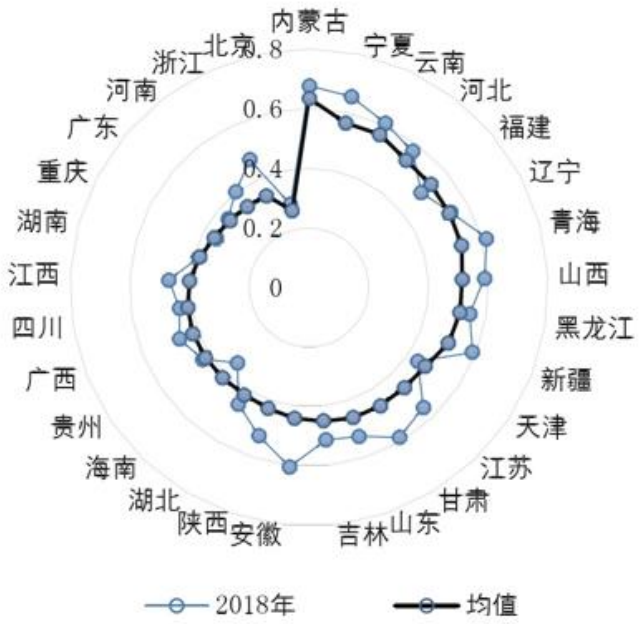

图 2 2014—2018 年中国 29 个省份绿色能源发电效率雷达图

3.3 云南省绿色能源发电效率国际比较与分析

全球气候变化的严峻形势，日益倒逼世界各国积极探索、发展绿色能源。2016 年《巴黎协定》正式生效后，世界各国都加强了对气候变化的关注，发展绿色能源成为全球共识。各国纷纷制定长远发展目标，大力开展技术研发，积极发展绿色能源产业，期待实现能源安全与环境保护协调发展。出于文章的需要以及数据的可获性，本节选取云南省与水能、风能、光伏三种资源均有的部分国家共同进行测度，最后得到了 20 个国家(包括中国)的绿色能源发电效率水平，测度方法同上，测度结果如表 3 所示。

从表 3 和图 3 可以看出，20 个国家的绿色能源发电效率在 2014—2018 年间，除 2017、2018 年有小幅下降以外，其他年份均呈现上升趋势，云南绿色能源发电效率处于中上水平，中国整体发电效率比较低，埃及、南非、巴西、美国和加拿大这几个国

家的绿色能源发电效率较高。美国较早就建设了绿色能源生产基地，并采用积极开发绿色能源、支持先进能源技术研发、扩大能源供给、以市场调节能源需求等措施来探索新能源发展的路径。美国还拥有较高水平的储能技术，储能技术在电网系统、削峰填谷、频率调节、配电网变电站、微电网、商业设施、家庭等方面都起到了积极作用和广泛应用[25,26]。除此之外，英国、日本、德国等国家的绿色能源发电效率也高于中国。英国是发展低碳清洁能源的典型国家，通过征收碳税贷款、财政投入等经济工具补贴绿色能源的开发，同时鼓励家庭绿色能源、交通绿色能源、城市绿色能源计划等刺激绿色能源消费[27]。日本国土狭小、资源匮乏，能源问题突出，日本一方面投入巨资设立绿色能源技术研发机构，大力发展氢能技术；另一方面聚焦区域性综合能源建设，即以区域为单位，将用户聚合到统一的供能体系中实现电、热、冷、气等能源的集中供应[28]。德国等欧盟国家建立了再生能源补贴机制和市场化消纳机制，为了防止陷入财政补贴困境，德国以渐进式改革的方式帮助绿色电力融入能源的市场竞争中。除此外，整个欧洲交通领域的绿色能源利用较好，例如高速公路上的光伏电站、油氢一体站等。通过对美国、日本、德国、英国等国家的分析发现，这些国家较早实施了比较全面的绿色能源发展计划，同时从经济、法律、政策制度等方面保障绿色能源的生产和消费，绿色能源得到快速发展；通过大力支持绿色能源技术的研发并长期积累，储能技术、发电技术稳步提升，绿色能源发电效率逐渐提高。通过对绿色能源发电效率高的国家进行分析，发现高水平的储能技术、完善的体制机制会对绿色能源发电效率产生积极的作用。

表 3 云南省与全国及部分国家绿色能源发电效率结果比较

国家(地区)	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	均值	排名
埃及	0.4236	0.6231	0.6400	0.6425	0.5491	0.5823	1
南非	0.3953	0.5741	0.6449	0.6148	0.6085	0.5745	2
巴西	0.4515	0.5863	0.5923	0.5717	0.5786	0.5638	3
美国	0.4554	0.5043	0.5806	0.5924	0.5617	0.5392	4
加拿大	0.3612	0.5570	0.5689	0.5570	0.5651	0.5280	5
荷兰	0.4098	0.4912	0.4724	0.5218	0.4685	0.4752	6
墨西哥	0.3954	0.4972	0.3989	0.4567	0.4386	0.4554	7
云南省	0.3593	0.3973	0.4399	0.4780	0.5132	0.4553	8
西班牙	0.4624	0.4367	0.5334	0.4634	0.4481	0.4549	9
英国	0.3793	0.4695	0.4358	0.4598	0.4617	0.4525	10
澳大利亚	0.3755	0.4186	0.4890	0.4461	0.4420	0.4352	11
日本	0.4083	0.3687	0.4848	0.4724	0.4298	0.4336	12
土耳其	0.2844	0.4649	0.4357	0.3920	0.4449	0.4239	13
泰国	0.4324	0.3094	0.4331	0.4721	0.4327	0.4114	14
德国	0.3406	0.3927	0.4099	0.4044	0.3935	0.3944	15
菲律宾	0.1884	0.3163	0.4620	0.4362	0.4648	0.3884	16
意大利	0.4314	0.3409	0.4270	0.3735	0.3602	0.3836	17

印度	0.3155	0.3423	0.3859	0.3759	0.4075	0.3742	18
中国	0.2862	0.3467	0.3815	0.3748	0.3965	0.3649	19
法国	0.2905	0.3611	0.3861	0.3411	0.3688	0.3538	20
乌克兰	0.1950	0.2461	0.2306	0.2492	0.2672	0.2321	21
均值	0.3639	0.4307	0.4682	0.4617	0.4572	0.4417	/

注：云南省仅用做比较使用，并无其他含义。下同

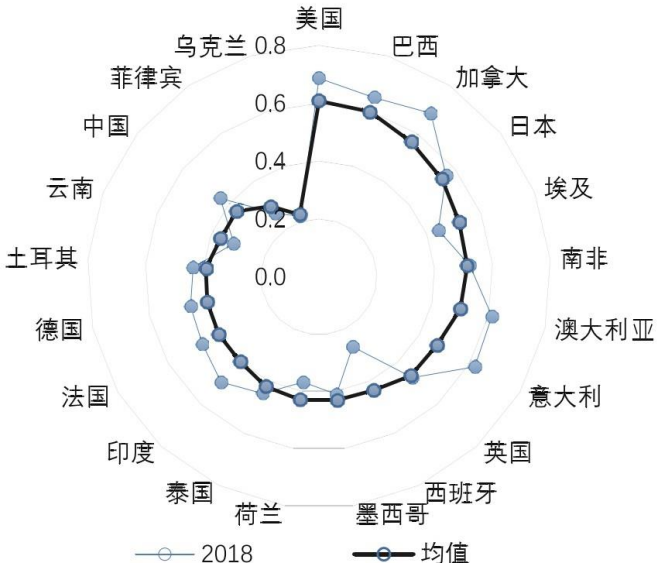

图 3 2014—2018 年云南省与 20 个国家绿色能源发电效率雷达图

4 云南省绿色能源发电效率影响因素分析

通过前文的分析，发现云南省绿色能源发电效率亟须进一步提升。通过实地调研、专家访谈、文献研究和资料分析，发现科技水平、供需矛盾、体制机制、协同互补效应不足等因素影响了云南省绿色能源发电效率，具体体现在以下几方面：

(1)1 科技水平尚不能完全满足绿色能源发展要求。

一方面，云南省以水电为主的绿色能源丰枯矛盾突出，风电、光伏间歇式问题明显，随着绿色能源比例不断提高、结构愈加丰富，该矛盾更加突出，亟须大规模、分布式储能技术保证电网输配的稳定性和安全性，然而云南省储能技术研发和应用尚不成熟，支持多样化、大规模绿色能源发展能力不够。另一方面，绿色能源的收集、转换的技术难度很大，需要持续的技术支撑，相比其他科技发达地区，云南省面临核心技术制约，存在能源转换效率不足的问题。储能技术和能源转换技术是绿色能源发展的重要支撑，贯穿绿色能源开发与利用的全部环节，云南省储能技术和能源转换技术的不足，影响了绿色能源发电效率。

(2)供求失衡导致绿色能源发电不充分。

云南省工业结构较为单一，以资源粗加工为主，受国家宏观经济下行压力影响大，需求侧增量不足，消纳不了供给端增量，于是出现“弃水”问题，从 2013 年开始，云南省出现较大规模水电弃水，2013—2018 年弃水电量分别为 50 亿、168 亿、153 亿、314 亿、287 亿、175 亿千瓦时。云南采用“优价满发”的方式引入相关企业，发展水电铝等产业，极大缓解了弃水问题，但引入企业的电价(0.25 元/度)不仅远远低于全国平均电价(0.39 元/度)，也低于云铝的电价(0.34 元/度)，而对引进企业的优惠定价，致使省内能源企业成本优势削弱，能源企业主动提高绿色能源发电效率的积极性不高。

(3)市场机制和体制仍需不断完善。

云电送粤价格按照框架协议内和框架协议外分别定价，框架内电量电价按照广东省燃煤机组标杆上网电价 0.4505 元/度倒推确定，扣除输配电价 0.1977 元/度后，云南省发电侧电价为 0.2528 元/度。框架外电量电价由广州电力交易中心根据交易规则组织开展交易，2019 年的交易电价为 0.231 元/度。近几年云电送桂全部为框架协议内电量，因两省间一直未就送电价格达成一致，云电送桂暂按落地广西 0.3 元/度结算，扣除输配电价 0.1577 元/度后，云南省发电侧电价为 0.1423 元/度，远低于大型水电企业超过 0.24 元/度的综合平均成本。同时，广西送广东的电价为 0.4297 元/度，广西转卖云南电力给广东，赚取每度电 0.13 元的差价。现行的定价机制未能反映绿色能源成本和社会经济贡献，给绿色能源发电效率带来负面影响。

(4)多种绿色能源协同互补效应不足。

目前，云南省绿色能源以“水电”为主，风光规模相对较小。2020 年云南省电力总装机达到 10340.29 万千瓦，其中水电装机规模占全省电力总装机的 80.56%，全省完成发电量 3674.44 亿千瓦时，水电发电量占全省总发电量的 80.55%，以水电为主的绿色能源发电存在“汛期富余，枯期紧张”的问题，水电丰枯发电比为 65∶35，因此，枯水期需要补充其他绿色能源来平衡用电负荷，满足绿色能源产业稳定用电需要。而风电和光伏分布均呈枯水期大、丰水期小的特点，风电发电丰枯比为 31∶69，光伏为 45∶55，三者之间互补性好。然而，2020 年风电和光伏发电仅占总发电量的 6.8%和 1.36%，目前还尚未形成水风光协同发展的格局，以水电为主的绿色能源丰水季节和枯水季节发电波动大，影响发电效率。

5 研究结论与建议

近几年，云南省以水电为主的绿色能源得到了快速发展，云南省已经初步建成清洁低碳、安全高效的能源体系。本文基于对抗型交叉评价 DEA 模型，对云南省绿色能源发电效率从多个角度进行了测算，通过分析高效率国家、省份的经验，探讨了绿色能源发电效率的影响因素，主要结论如下：从纵向时间来看，云南省绿色能源发电效率波动上升，其间政策引导、能源结构、绿色能源投资、绿色能源产业对绿色能源发电效率产生了积极的作用，但是供给过剩使得部分年份的发电效率有所下降。从横向省际角度看，得益于丰富的绿色能源资源条件，云南省发电效率排名全国第三，绿色能源是一种资源型能源，资源的富裕程度和绿色能源发电效率呈显著的正相关。从国际角度来看，云南省排名 18，研究其他国家的经验发现，储能技术、体制机制等是绿色能源发电效率的重要影响因素。进一步分析得到：科技水平、供需矛盾、体制机制以及协同互补效应不足等因素影响了云南省绿色能源发电效率。云南省绿色能源资源优势明显，如何进一步发展和完善绿色能源产业，为“30·60”目标的实现做出更大的贡献，根据主要影响因素，本文提出以下几点建议：

(1)1 发展储能技术，提高转换效率。

一是大力发展储能技术，储能技术在绿色电力削峰填谷、电压补偿、电能质量管理等方面具有重要的作用，故需评估云南电网内现有储能资源，并根据电网的调峰调频、满额消纳、能源系统经济运行以及紧急事故响应的需要，改进或研发储能设备。二是提高能源转化技术，加快筹建云南省新材料、智能制造领域形成完整的研发体系，攻克先进铝、太阳级多晶硅等金属基复合材料、大尺寸/大功率光伏组件、绿色铝/硅深加工技术与装备等核心技术，从绿色能源转化的源头最大限度地减少能源转化过程中的无序化损失，提高能源转换的有效利用效率。

(2)延长绿色能源产业链，加强省际国际合作。

一是加大对传统工业的改造，调研国内外绿色能源相关产业集群调整、技术变革及招商引资、资源要素配置情况，探索传统工业绿色转型发展模式。二是引进以信息技术为核心的高新技术产业，围绕绿色能源利用，增加互联网、大数据、人工智能、新能源汽车制造等行业与绿色能源产业之间的融合，延长绿色能源产业链，推动绿色能源消费增长从工业向建筑、服务、交通转移。三是引进水电铝、水电硅深加工技术设备，以及新材料、绿色能源、航空制造、轨道交通等领域的国内先进企业，构筑云南高端铝、高端硅产业集群。四是增加国家电网和南方电网之间输电通道规划建设，提高输电能力，增加跨境合作，把云南省建设成为能源国际枢纽中心。

(3)完善绿色能源发展支持体系，健全绿色低碳电力市场机制。

一是以“30·60”目标为契机，抢抓我国碳交易市场全面启动的机遇，推动建立跨省能源合作的生态补偿机制，在电价、碳价等省际博弈层面提升云南省的话语权，将绿色能源优势充分转化为绿色经济优势，通过“西电东送”，为粤港澳大湾区输送更多的绿色电力，为国家实现“30·60”目标做出云南的贡献。二是完善绿色低碳电力建设和运营的市场机制，引入社会资本投资绿色能源，不断扩大其建设规模，实现规模效应和市场竞争优势地位，形成有利于电力优化配置的市场化机制和价格机制，鼓励所有企业参与电力市场化交易。

(4)统筹协调绿色能源开发，建立绿色能源生产基地。

随着水电铝、水电硅两大千亿级清洁载能产业快速发展，未来几年云南省绿色能源需求将迎来大规模增长，因此，应继续开发绿色能源，进一步增加绿色能源供应量，从而满足未来省内载能产业稳定的用电需求。

综上所述，作为绿色能源大省，云南省要勇于承担时代赋予的重大使命，充分利用资源优势、政策条件和地理优势，推动水、风、光等绿色能源一体化发展，实现绿色能源高效利用，加快打造世界一流绿色能源产业，助力云南经济社会高质量跨越式发展，在国家“30·60”目标实现中贡献更重要的作用。

参考文献：

[1]林伯强.中国新能源发展战略思考[J].中国地质大学学报(社会科学版)，2018(2)：76-83.

[2]陈伟，郭楷模，岳芳.国际能源科技发展动态研判与战略启示[J].中国科学院院刊，2019(4)：497-507.

[3]张国宝.中国已成世界第一大能源生产国和消费国[EB/OL].(2014-03-24).http://energy.people.com.cn/n/2014/0324/c71661-24719492.html.

[4]周倜然，殷浩钦.云南品牌—南方电网云南公司全面助力云南省打造世界一流“绿色能源牌”[J].中国电业，2018(6)：10-15.

[5]林智钦，林宏赡.2011 中国能源环境发展研究——绿色能源：引领未来[J].中国软科学，2011(S1)：49-60.

[6]Yunos J M,Hawdon D.The efficiency of the national electricity board in Malaysia:An intercountry comparison using DEA[J].Energy Economics,1997,19(2):255-269.

[7]Sugathan A,Malghan D,Chandrashekar S,et al.Downstream electric utility restructuring and upstream generation efficiency:Productivity dynamics of Indian coal and gas based electricity generators[J].Energy,2019,178:832-852.

[8]范玉仙，袁晓玲.基于 NSBM-ML 模型的中国电力行业技术效率和全要素生产率研究[J].当代经济科学，2015(4)：90-99.

[9]庞雨蒙.环境政策、竞争引入与异质性发电企业效率[J].经济与管理研究，2017(11)：69-79.

[10]解百臣，卢龙，段娜.网络结构视角下的中国电力系统生产效率研究[J].中国电力，2021(12)：128-136.

[11]Wang B,Nistor I,Murty T,et al.Efficiency assessment of hydroelectric power plants in Canada:A multi criteria decision making approach[J].Energy Economics,2014,46:112-121.

[12]Sueyoshi T,Wang D.Measuring scale efficiency and returns to scale on large commercial rooftop photovoltaic systems in California[J].Energy Economics,2017,65:389-398.

[13]李少林.2001—2012 年全球 23 国新能源发电效率测算与驱动因素分析[J].资源科学，2016(2)：321-332.

[14]杨淑霞，朱宪国，苑曙光.基于空间统计模型的区域风电场效率影响因素挖掘[J].数学的实践与认识，2020(9)：68-77.

[15]张协奎，王德磊，刘伟.西部地区可再生能源发电绩效评价研究[J].学习与探索，2021(4)：128-135.

[16]Zhou H J,Fu Y K,Li N,et al.The impacts of generation efficiency and economic performance on the solar power generation and storage scale:An empirical analysis of 20 countries[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2021,44:101084.

[17]Charnes A,Cooper W W,Rhodes E.Measuring the efficiency of decision making units[J].European Journal of Operational Research,1978,2(6):429-444.

[18]魏权龄.数据包络分析(DEA)[J].科学通报，2000(17)：1793-1808.

[19]Doyle J,Green R.Efficiency and cross-efficiency in DEA:Derivations,meanings and uses[J].Journal of the Operational Research Society,1994,45(5):567-578.

[20]张军，吴桂英，张吉鹏.中国省际物质资本存量估算：1952-2000[J].经济研究，2004(10)：35-44.

[21]彭育威，吴守宪，徐小湛.利用 MATLAB 进行 DEA 交叉评价分析[J].西南民族大学学报(自然科学版)，2004(5)：553-556.

[22]魏楚，沈满洪.能源效率及其影响因素：基于 DEA 的实证分析[J].管理世界，2007(8)：66-76.

[23]李兰冰.中国全要素能源效率评价与解构—基于“管理—环境”双重视角[J].中国工业经济，2012(6)：57-69.

[24]张志辉.中国区域能源效率演变及其影响因素[J].数量经济技术经济研究，2015(8)：73-88.

[25]Mahlia T M I,Saktisahdan T J,Jannifar A,et al.A review of available methods and development on energy storage;technology update[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,33:532-545.

[26]周喜超.电力储能技术发展现状及走向分析[J].热力发电，2020(8)：7-12.

[27]边文越，陈挺，陈晓怡，等.世界主要发达国家能源政策研究与启示[J].中国科学院院刊，2019(4)：488-496.

[28]赵勇强.国际可再生能源发展与全球能源治理变革[J].宏观经济研究，2017(4)：43-54.

注释：

1 云南省光伏发电从 2011 年开始有数据记录，但是全国 2011 年还有很多省份没有光伏的数据，因此全国以及国际的数据都从 2014 年开始测度。