

基于灰色预测模型的我国海上风电发展规模和趋势研究

窦如婷¹, 谢齐²

(1. 南方电网科学研究院 广州 510080; 2. 中国化工信息中心 北京 100029)

摘要:为掌握我国海上风电发展规模和趋势,进而为海上风电发展决策提供参考,文章基于灰色系统理论的3种模型,对全国和主要沿海地区海上风电发展规模和趋势作出预测。研究结果表明:装机量可作为海上风电发展规模的预测指标;通过历史数据模拟,GM(1,1)比NDGM和DGM(2,1)的拟合效果更好且预测精度较高,适用于海上风电装机量预测;GM(1,1)对海上风电发展的短期(1~3年)预测准确率较高,而中长期(5~10年)预测准确率有待检验;海上风电主要地区的装机量将持续增长,但各地区呈现不同的增长率;江苏海上风电发展在多年快速增长后可能放缓,广东和福建有望“接棒”江苏而成为海上风电大省;国内海上风电产业仍处于成长阶段,经济稳妥的发展策略是必然选择。

关键词:海上风电;灰色系统理论;装机量;新能源

中图分类号:P74;TM614

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2020)10-0062-07

The Development Scale and Trend of China's Offshore Wind Power Based on Grey Forecasting Model

DOU Ruting¹, XIE Qi²

(1. China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

2. China National Chemical Information Center, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to master the scale and trend of offshore wind power development in our country, then provide reference for decision-making of offshore wind power development, the paper made predictions on the scale and trend of offshore wind power development across the country and major coastal provinces, based on 3 models of grey system theory. The research results showed that the installed capacity can be used as a predictive indicator of the scale of offshore wind power development. Through historical data simulation, the GM (1,1) had a better fitting effect than the NDGM and DGM (2,1), and the prediction accuracy was relatively higher, suitable for forecasting offshore wind power installed capacity. GM (1,1) had relatively higher accuracy in short-term (1 to 3 years) forecasting, but the accuracy of medium and long-term (5 to 10 years)

收稿日期:2020-04-07;修订日期:2020-09-04

基金项目:南方电网科学研究院项目“公司生产设备知识管理体系构建及技术应用研究”(ZBKJXM20190032).

作者简介:窦如婷,研究员,硕士,研究方向为国际能源合作

通信作者:谢齐,工程师,硕士,研究方向为科学计量和评价

forecasting still to be tested. The installed capacity of offshore wind power in major provinces will continue to grow, but different regions showed different growth rates. After years of rapid growth, Jiangsu Province may slow down, Guangdong and Fujian Province were expected to take over Jiangsu Province and become the largest 2 offshore wind power provinces. Offshore wind power in our country was still in the growth stage, steady economic development was an inevitable choice.

Key words: Offshore wind power, Grey System theory, Installed capacity, New energy

0 引言

海上风电是可再生能源开发利用的重要方向之一,已成为全球风电发展的研究热点。海上风电是我国战略性新兴产业、科技产业和海洋产业的重要组成部分^[1]。我国海上风电的发展前景十分广阔,对于推进能源结构转型和环境保护具有至关重要的作用。

根据中国风能协会(CWEA)的统计数据,我国海上风电自“十三五”以来保持高速发展,年均增长率超过 50%^[2]。在我国海上风电总体发展的同时,各沿海地区海上风电的发展水平受地理位置、经济水平、电网运输和消纳能力以及政府重视程度等因素影响而存在一定的差异^[3]。2020 年 1 月,财政部宣布拟从 2022 年开始停止新建海上风电项目的中央补贴,鼓励各地方政府自行补贴支持本地海上风电项目建设,这意味着我国海上风电即将提前进入平价时代^[4]。因此,在全国海上风电加速发展的大潮中,各沿海地区根据自身特点发展海上风电具有重要的现实意义。

国内学者很早就针对风电开展预测研究。商立峰等^[5]基于时间序列的 Logistic 模型,预测我国各地区 2013—2020 年的风电发展趋势;符森等^[6]采用灰色预测理论的 DGM(2,1)模型,对“21 世纪海上丝绸之路”沿线代表国家的风电装机量进行预测;马红艳等^[7]采用技术扩散理论的 Gompertz 模型,预测我国风电发展趋势,提出 2010 年是起飞点,此后的 17 年是成长期,2027 年后进入成熟期,且按照这种发展速度,国内存在风电设备产能过剩的现象;张毅等^[8]基于国内某风电场的实际风机运行数据预测风电功率,提出经优化的灰色模型可提高所选数据的点数和背景值,有助于提高预测精度和性能。在众多预测方法中,基于灰色系统理论的预测

模型所需历史数据少、运算量较低,且能适应数据的动态变化,被广泛应用于经济、能源和金融等领域。

现有文献的研究成果集中在海上风电发展现状和对策,而针对其发展规模和趋势的预测则很少见。本研究梳理我国海上风电发展现状,根据历史数据的特点选取灰色预测模型,对全国和主要地区海上风电装机量进行模拟和预测,为我国海上风电发展决策提供参考。

1 我国海上风电发展现状

发电量、装机量、并网装机量和弃风电量等可作为海上风电发展的统计指标^[9]。考虑到风电装机量与实际并网发电装机量之间有明显差别、弃风限电的问题一直存在以及风电发电量的数据较难获取等因素,本研究采用装机量作为预测我国海上风电发展规模和趋势的指标。

我国海上风电发展起步较晚(2010 年后),且具有跨越式和波动大等特点。根据 CWEA 的统计数据,截至 2018 年,我国海上风电累计装机量为 444.5 万 kW。其中:江苏为 312.9 万 kW,占比约为 70.4%;上海为 40.5 万 kW,占比约为 9.1%;福建为 28.9 万 kW,占比约为 6.5%;广东、浙江、河北、山东、辽宁和天津等合计为 62 万 kW,占比约为 13.9%。

江苏海上风电的自然资源和建设条件较均衡,自 2010 年如东潮间带试验风电场建成并投产以来,江苏成为我国海上风电发展的先行者^[10]。

2016 年《电力发展“十三五”规划》确定因地制宜发展海上风电的任务,我国海上风电开始加速发展。福建和广东海上风电的开发难度较高,但其凭借显著的风能资源优势逐渐成为重点发展区域。至 2018 年年底,福建已累计投产约 30 万 kW,在建阶段

项目约 180 万 kW^[11]; 广东已累计投产约 12 万 kW, 在建阶段项目约 420 万 kW^[12]。此外, 浙江、河北和山东等地的海上风电建设均已取得进展, 北部湾、辽东湾和海南岛西部海域等优质资源区也有待逐步开展相关规划。

全国和江苏的海上风电装机量呈增长趋势, 其他地区由于数据量较少, 暂时呈线性或波动发展趋势。

2 灰色系统理论和灰色预测模型

灰色系统理论的研究对象通常为“部分信息已知、部分信息未知”的小样本和“贫信息”的不确定性系统。该理论将一切随机过程视为在一定范围内变化的、与时间有关的灰色过程, 并将离散的原始数据整理成有规律的生成数列后再进行研究。对灰色过程建立的模型即灰色模型^[13], 其中应用最广泛的是 GM(1, 1), 而 DGM(1, 1)、GM(2, 1) 和 DGM(2, 1) 等均为衍生模型。

GM(1, 1) 适用于具有较强指数规律的序列; DGM(2, 1) 是单调序列二阶线性动态模型, 其利用微分方程逼近拟合, 对于趋势变化较强烈的数据更能显示预测精度, 适用于单调的摆动发展序列; 对于原始数据具有近似非齐次指数增长规律的数列, 可采用 NDGM 预测^[13]。

2.1 GM(1, 1)

GM(1, 1) 是最常用和最原始的灰色模型, 由包含单变量的微分方程构成。

设原始数据序列为 $X^{(0)}$, 即

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

其中: $x^{(0)}(k) \geq 0, (k=1, 2, \dots, n)$ 。

$X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列, 即

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

其中: $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), (k=1, 2, \dots, n)$ 。

$Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, 即

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$$

其中: $Z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), (k=2, 3, \dots, n)$ 。

GM(1, 1) 的基本形式为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$$

将 $k=2, 3, \dots, n$ 代入, 可将 GM(1, 1) 的基本形式转化为矩阵方程。

若 $P=[a, b]^T$ 为参数列, 且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法原理, 参数列满足:

$$P = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

求解上述矩阵和参数列, 可得 GM(1, 1) 的时间响应序列:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-ak} + \frac{b}{a}$$

还原后可得预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$$

2.2 DGM(2, 1)

DGM(2, 1) 的微分方程为:

$$\frac{d^2 x^{(1)}}{dt^2} + a \frac{dx^{(1)}}{dt} = b$$

原始序列 $X^{(0)}$ 和 1-AGO 序列 $X^{(1)}$ 的计算方法同 GM(1, 1)。

此外, 须对 $X^{(0)}$ 进行 1-IAGO 处理, 得序列:

$$\partial^{(1)} x^{(0)} = (\partial^{(1)} x^{(0)}(1), \partial^{(1)} x^{(0)}(2), \dots, \partial^{(1)} x^{(0)}(n))$$

其中: $\partial^{(1)} x^{(0)}(k) = x^{(0)}(k+1) - x^{(0)}(k)$ 。

矩阵方程为:

$$B = \begin{bmatrix} -x^{(0)}(2) & 1 \\ -x^{(0)}(3) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -x^{(0)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} \partial^{(1)} x^{(0)}(2) \\ \partial^{(1)} x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ \partial^{(1)} x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

DGM(2, 1) 的时间响应序列为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(\frac{b}{a^2} - \frac{x^{(0)}(1)}{a}\right) e^{-ak} +$$

$$\frac{b}{a}(k+1) + (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}) \frac{a+1}{a}$$

最终预测值为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$$

2.3 NDGM

NDGM 的基本形式为:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(1)}(k+1) = \beta_1 \hat{x}^{(1)}(k) + \beta_2 \cdot k + \beta_3 \\ \hat{x}^{(1)}(1) = x^{(1)}(1) + \beta_4 \end{cases}$$

式中: $\hat{x}^{(1)}(k)$ 为原始序列数据的拟合值; $\beta_1 \sim \beta_4$ 为其中:
 待定参数; $\hat{x}^{(1)}(1)$ 为迭代基值。

$$\Delta_k = \frac{|\epsilon(k)|}{x^{(0)}(k)}$$

参数 $\beta_1 \sim \beta_3$ 仍采用最小二乘法求解,其中:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) & 1 & 1 \\ x^{(1)}(3) & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & 1 \\ x^{(1)}(n-1) & n-1 & 1 \end{bmatrix}$$

关联度为:

$$\gamma = \frac{1 + |s| + |\hat{s}|}{1 + |s| + |\hat{s}| + |s - \hat{s}|}$$

参数 β_4 则采用无约束优化模型求解,令 $\hat{x}^{(1)}(k)$ 和 $x^{(1)}(k)$ 的误差平方和最小,即

其中:

$$|s| = \sum_{k=2}^{n-1} x^{(0)}(k) + \frac{1}{2} x^{(0)}(n)$$

$$|\hat{s}| = \sum_{k=2}^{n-1} \hat{x}^{(0)}(k) + \frac{1}{2} \hat{x}^{(0)}(n)$$

$$\beta_{4\min} = \sum_{k=1}^n [\hat{x}^{(1)}(k) - x^{(1)}(k)]^2$$

可求得:

均方差比值为:

$$C = \frac{s_1}{s_2}$$

$$\beta_4 = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [x^{(1)}(k+1) - \beta_1^k x^{(1)}(1) - \beta_2 \sum_{j=1}^k j \beta_1^{k-j} - \frac{1-\beta_1^k}{1-\beta_1} \cdot \beta_3] \cdot \beta_1^k}{1 + \sum_{k=1}^{n-1} (\beta_1^k)^2}$$

其中:

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\epsilon(k) - \bar{\epsilon})^2$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon^{(0)}(k)$$

最终还原的预测值为:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)$$

2.4 模型精度检验

原始数列为:

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

相应的灰色预测模型序列为:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n))$$

残差为:

$$\epsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$$

小误差概率为:

$$P = P(|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.674 5 s_1)$$

相对误差为:

模型预测精度等级如表 1 所示。

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k$$

表 1 灰色预测精度等级

等级	相对误差	关联度	均方差比值	小误差概率
一级	$\bar{\Delta} \leq 0.01$	$\gamma \geq 0.90$	$C \leq 0.35$	$P \geq 0.95$
二级	$0.01 < \bar{\Delta} \leq 0.10$	$0.80 \leq \gamma < 0.90$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.80 \leq P < 0.95$
三级	$0.10 < \bar{\Delta} \leq 0.20$	$0.70 \leq \gamma < 0.80$	$0.50 < C \leq 0.65$	$0.70 \leq P < 0.80$
四级	$\bar{\Delta} > 0.20$	$\gamma < 0.70$	$C > 0.65$	$P < 0.70$

2.5 历史数据模拟和检验

全国海上风电装机量呈增长趋势,各沿海地区海上风电装机量呈线性或波动的发展特征。本研究采用 3 种灰色预测模型,对 2010—2019 年我国海

上风电装机量的历史数据进行模拟,并与实际数据进行比较以验证模型精度,从而进行模型选择。数据的模拟和计算采用灰色系统建模软件和 Matlab 软件,具体模拟过程如表 2 所示。

表 2 历史数据模拟过程

项目	模型		
	GM(1,1)	DGM(2,1)	NDGM
参数			$\beta_1 = 1.475\ 2$
	$a = -0.413$	$a = -0.29$	$\beta_2 = 69.324\ 5$
	$b = 121.126$	$b = 65.86$	$\beta_3 = -36.667$
			$\beta_4 = 59.38$
Y 矩阵	26.05	10.96	41.15
	38.76	12.70	79.91
	42.66	39.00	122.57
	67.00	24.34	189.57
	103.00	36.00	292.57
	163.00	60.00	455.57
	278.10	115.10	733.67
	444.50	166.40	1 178.10
	593.00	148.50	1 771.17
B 矩阵	-28.12 1	-26.05 1	15.10 1 1
	-60.53 1	-38.75 1	41.15 2 1
	-101.24 1	-42.65 1	79.91 3 1
	-156.07 1	-67.00 1	122.57 4 1
	-241.07 1	-103.00 1	189.57 5 1
	-374.07 1	-163.00 1	292.57 6 1
	-594.62 1	-278.10 1	455.57 7 1
	-955.92 1	-444.50 1	733.67 8 1
	-1 474.67 1	-593.00 1	1 178.17 9 1

度检验如表 3 所示。

表 3 灰色预测模型的精度检验

模型	相对误差	关联度	均方差比值	小误差概率
GM(1,1)	0.103 0	0.994 4	0.003 6	1
DGM(2,1)	0.422 0	0.924 2	0.023 8	1
NDGM	0.176 9	0.996 8	0.006 9	1

与表 1 相对照:GM(1,1)和 NDGM 相对误差的精度等级为三级,而 DGM(2,1)的相对误差超过 0.2,不符合可用标准;3 种模型关联度、均方差比值和小误差概率的精度等级均为一级。

综上所述,GM(1,1)对历史数据的模拟效果更佳、预测精度更高,可用于海上风电装机量预测。

3 预测结果和分析

采用 GM(1,1)预测 2020—2025 年全国和主要沿海地区海上风电装机量(表 4)。浙江、河北、山东和辽宁等地区的历史数据较少,暂无法预测。

表 4 全国和主要地区海上风电装机量预测

年份	万 kW				
	全国	江苏	上海	福建	广东
2020	936.34	685.96	60.21	101.17	56.84
2021	1 415.38	1 093.10	73.95	202.59	135.59
2022	2 139.50	1 741.88	90.84	405.67	323.43
2023	3 234.07	2 775.73	111.58	812.33	771.47
2024	4 888.66	4 423.19	137.06	1 626.62	1 840.15
2025	7 389.73	7 048.47	168.35	3 257.17	4 389.21

由表 4 可以看出,2020—2025 年全国和主要沿海地区海上风电装机量呈现持续快速增长的趋势。

(1)根据中国可再生能源协会的预测,至 2020 年年底,全国海上风电并网装机量约 790 万 kW,开工在建约 1 000 万 kW,与本研究预测的 936 万 kW 相近。全国海上风电装机量至 2025 年约 7 389 万 kW,接近全国远期规划的 7 800 万 kW。若后续无新增核准规模和远海风电开工计划,预计 2025 年后全国海上风电增长率将趋于平缓。

(2)江苏海上风电装机量至 2022 年约 1 741 万 kW,超过其远期规划的 1 600 万 kW,且至 2025 年接近

历史数据的模拟值与实际值对比如图 1 所示。

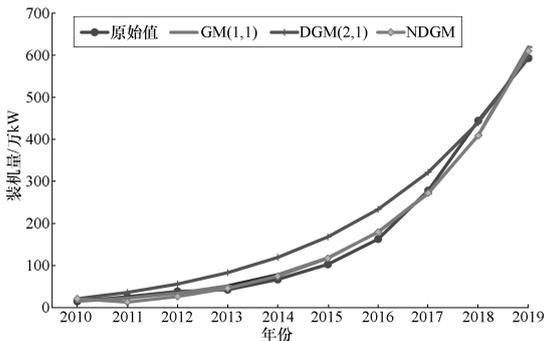


图 1 我国海上风电装机量历史数据的模拟值与实际值

根据历史数据模拟值与实际值的直观对比,GM(1,1)和 NDGM 的模拟精度较高。模拟值的精

全国总装机量。江苏近 10 年来是我国海上风电发展的领军地区,装机量年均增长接近 100%,而灰色预测模型正是基于历史数据的变化规律对未来发展规划进行预测。基于此,江苏完成存量规划任务的时间可能晚于预测年份,在存量规划目标达成后,其增长趋势会大幅减缓,后续装机量将转为平稳增长。目前江苏海上风电全部为近海风电,规划中的远海风电有望成为其海上风电新的增长点^[14]。

(3)广东海上风电装机量至 2025 年约 4 389 万 kW,超过其远期规划的 3 000 万 kW。广东海上风电发展虽起步较晚,但具备资源优势,再加上地方政策的推动,其有望“接棒”江苏成为我国下一个海上风电发展的领军省份。

(4)根据文献调研,福建将于 2020 年完成 100 万 kW 的装机目标^[15],与本研究的预测结果高度一致。福建的远期规划为 1 330 万 kW,与本研究 2024 年的预测值较接近。因此,福建也有望成为未来海上风电大省。

(5)上海海上风电装机量的增速较缓慢,至 2025 年约 168 万 kW。这与其海上风电装机量历史数据的变化规律有关,同时预测值也符合其远期规划的要求。

4 结论和展望

本研究在分析我国海上风电发展现状的基础上,在 3 种灰色预测模型中筛选针对海上风电装机量历史数据模拟精度较高的模型即 GM(1,1),对全国和主要沿海地区海上风电装机量进行预测。

基于灰色系统理论模拟和预测海上风电发展的规模和趋势具备可行性,然而 GM(1,1)的预测值后期呈指数级增长特征,可能与海上风电实际发展规律不符。有文献研究认为 2010—2027 年是我国风电发展的成长期,2027 年后进入成熟期^[7];本研究根据预测结果推断,2025 年后我国海上风电发展将进入平稳增长期。因此,GM(1,1)的短期(1~3 年)预测准确率较高,预测结果可在一定程度上为国家和沿海地区制定海上风电发展规划提供参考,从而提升科学决策水平以及减少盲目和重复建设;但中长期(5~10 年)预测准确率则有待实践检验。

根据模型预测数据,未来全国和主要沿海地区

海上风电装机量将持续增长,但各地区呈现不同的增长率。江苏海上风电发展起步早、速度快,但存量规划目标达成后的增长将遇到“瓶颈”;江苏已开始规划远海风电项目,有望成为其海上风电发展新的增长点。因此,在实际规划和发展中应关注国家和地方政府对可再生能源的政策动向,合理有序布局。福建和广东属于我国海上风电发展的新兴力量,其凭借丰富的海上风电资源,海上风电发展势头迅猛,有望成为我国海上风电发展的主力;但福建和广东海域的地质和气象等条件复杂,海上风电开发的技术难度较大,尤其易受台风和地震等自然灾害的影响。因此,应提高海上风电场选址的科学性,同时注重海上风电与海洋生态环境的协调发展^[15]。

值得一提的是,根据全球风能委员会的统计,我国海上风电装机量已居全球第三,但我国海上风电发展仍处于成长阶段。2018 年的海上风电“核准潮”和 2022 年面临的补贴退坡期限,势必导致各地出现“抢装潮”,从而对我国海上风电产业的供应链带来巨大挑战。目前全国海上风电的年吊装能力极限不超过 400 万 kW,远远无法满足在建和待建项目的需求^[16]。此外,由于我国海上风电发展起步较晚,许多新技术和大机组尚处于应用初期,其可靠性也须经长时间和大批量的实际运行来验证。

加快发展包括海上风电在内的各种新能源以及加速推进电力绿色低碳转型是不可逆转的全球能源发展大势。经济和稳妥地发展海上风电是我国实现电力转型发展和实施国家能源安全新战略的必然选择^[17]。在当前全国电力供需总体平衡以及为实体经济减负的大背景下,我国海上风电发展应以经济性为主要考量指标,重点在于谋划发展时机,关键在于把握发展节奏和规模,从而稳妥地推进海上风电发展,进而培育可释放巨大经济效益和社会效益的战略性新兴产业,为我国引领全球能源发展进程和加快经济结构转型升级注入强大的新动能。

参考文献

- [1] 姚中原.我国海上风电发展现状研究[J].中国电力企业管理,2019(8):24-28.

- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会.2018年中国风电吊装容量统计简报[Z].2019.
- [3] 刘佰琼,徐敏,刘晴.我国海上风电发展的主要问题及对策建议[J].海洋开发与管理,2015,32(3):7-12.
- [4] 财政部,国家发展改革委,国家能源局.关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见[Z].2020.
- [5] 商立峰,解百臣.我国不同省份的风电发展趋势研究[J].可再生能源,2014,32(2):191-195.
- [6] 符森,马锐.21世纪海上丝绸之路国家风电发展潜能分析:基于DGM(2.1)预测模型的实证研究[J].经贸实践,2016(13):1-3.
- [7] 马红艳,张磊,蒋景肖.我国风电设备市场扩散模型与预测研究[J].可再生能源,2011,29(4):14-19.
- [8] 张毅,孙鹤旭,郭英军,等.基于改进灰色系统模型的风电功率预测研究[J].可再生能源,2018,36(12):1865-1870.
- [9] 彭洪兵,吴姗姗,张凤成,等.我国海洋可再生能源产业统计指标体系的构建[J].海洋开发与管理,2017,34(10):33-39.
- [10] 刘秋华,陈超,董丹丹.江苏省海上风电资源利用现状分析[J].南京工程学院学报,2015(3):55-61.
- [11] 杨薇,孔昊.基于低碳经济的福建省海洋能源产业发展可行性研究[J].海洋开发与管理,2017,34(11):61-65.
- [12] 黄超,段晓峰,朱凌,等.广东省海上风电产业发展形势分析[J].海洋经济,2018(6):13-19.
- [13] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [14] 张云,景昕蒂,崔丹丹,等.江苏省海上风电用海项目调查[J].海洋开发与管理,2018,35(10):94-97.
- [15] 黄森炎.福建省海上风电产业发展思考[J].能源与环境,2015(6):100-101.
- [16] 井然.海上风电再审视[J].中国电力企业管理,2019,22(8):10-16.
- [17] 秦海岩.海上风电:行稳方能致远[J].中国电力企业管理,2019,22(8):29-31.