

中国近海风能资源评估研究进展^①

姜 波^② 刘富铀^③ 汪小勇 杜 敏 徐辉奋 张 榕 丁 杰 石 勇 蔡晓晴

(国家海洋技术中心 天津 300112)

摘 要 总结并分析了近 30 多年来我国基于气象站历史资料、数值模拟、卫星遥感技术和再分析资料进行近海风能资源评估的 4 种方法与特点。比较了我国从普查到详查的 5 次近海风能资源评估工作的主要成果和存在的主要问题。说明了陆地风能评估方法标准不能完全适用于近海风能评估,以及对未来几十年的风能资源预测的重要性。提出了加快近海风能资源评估体系建设,做好近海风能资源长期变化趋势预测,加强海上风电开发利用环境影响评价等建议。

关键词 研究进展,海洋风能,资源评估,方法,建议

0 引 言

在当前全球减排二氧化碳以应对气候变化的形势下,发展可再生能源替代化石能源,实现能源的可持续发展则成为许多国家能源发展的重要举措。风能资源是清洁的可再生能源。同水力发电一样,风力发电是可再生能源领域中技术最成熟、最具规模化商业开发的发电方式。我国海域辽阔,海洋风能资源丰富。大力发展海上风力发电对于满足我国电力需求、改善能源结构、保障能源安全、促进经济增长、提高人民生活水平,具有重要意义。近年来,在《可再生能源法》以及《可再生能源发展“十二五”规划》、《海上风电场工程规划工作大纲》、《海上风电开发建设管理暂行办法》等国家一系列政策的推动下,我国海上风电项目建设取得突破性进展。

风能资源宏观评估是国家决策、开发利用发展规划的重要科学依据,而微观评估结果可直接应用于风电场选址、风机布局、风机选型、发电量估计和经济概算等。本文对我国近海风能资源的评估方法进行了回顾,总结了前期工作成果和存在的问题,并

对未来我国海洋风能资源评估进行了展望,以期为我国海上风电规划和风电场建设提供科学依据。

1 近海风能资源评估方法

近 30 多年来,我国近海风能资源评估的技术方法主要有四种:基于气象站等历史观测资料的海洋风能资源评估^[1-8]、基于再分析资料的海洋风能资源评估^[9-11]、基于数值模拟的海洋风能资源评估^[12-16]以及基于卫星遥感技术的海洋风能资源评估^[8,17-19]。

1.1 基于气象站等历史观测资料的近海风能资源评估

早期的近海风能资源评估方法主要是基于气象站历史观测资料的统计分析方法。例如,1981 年,朱瑞兆和薛桁^[1]利用全国 300 个气象站的资料做出中国风能资源的计算和区划,研究表明东南沿海及其岛屿为我国最大风力资源区,沿海岛屿的有效风功率密度在 300W/m² 以上,有效风时(这里指全年风速 3m/s~20m/s 小时数;2004 年国家发改委发布的《全国风能资源评价技术规定》订正为 3m/s~

① 国家软科学研究计划(2013GXS4B093)和天津市自然科学基金(16JCYBJC20600)资助项目。

② 男,1978 年生,硕士,副研究员;研究方向:海洋能调查与评估;E-mail: qdjiangbo@163.com

③ 通讯作者,E-mail: lfuyou@163.com

(收稿日期:2016-03-14)

25m/s) 7000 ~ 8000h, 全年 6m/s ~ 20m/s 风速也有 4000h 左右。1979 ~ 1987 年开展的全国海岸带和海洋涂资源综合调查^[2]表明:沿海岛屿区年平均风速 6m/s ~ 8m/s, 年平均有效风功率密度为 200W/m² 以上, 有效风时(全年风速 3m/s ~ 20 m/s 小时数) 6000 ~ 8000h。其中浙江、福建沿海岛屿风能资源最为丰富;沿岸和近海陆地区年平均风速 4m/s ~ 6m/s, 年平均有效风功率密度为 200W/m² ~ 300W/m², 有效风时 6000h ~ 7000h; 海岸带陆地区年平均风速 3m/s ~ 4m/s, 年平均有效风功率密度为 100W/m² ~ 200W/m², 有效风时 4000h ~ 6000h。随后, 钱光明等^[3]、沈佩玉等^[4]、姜波等^[5-7]利用气象站、海洋站和临时测风站对我国特定海域的风能资源进行了评估。

张秀芝等^[8]利用 1950 ~ 2008 年海上船舶气象观测资料计算分析了中国近海季、年平均风速风向分布。

基于气象站等历史观测资料的近海风能资源评估主要存在三个方面的问题:(1)气象站、海洋站一般局限在沿岸和岛屿,且站点分布稀疏(间距 50km ~ 200km),其代表性有所欠缺,无法全面反映海上风资源特性,而在海洋中设立测风塔的人力物力耗费巨大,不可能在海洋中大范围建立密集的观测网;(2)气象站、海洋站测风高度只有 10m,船舶测风相当于海面 25m ~ 30m,而现在海上主流风机轮毂高度在 70m ~ 100m^[20],从 10m 或 25 ~ 30m 高度的风能资源很难准确推断风机轮毂高度的风能资源;(3)据 1950 ~ 2008 年船舶气象观测资料统计,我国近海及毗邻海域 1° × 1° 经纬度网格内,在主航线上观测次数一般超过 200 次/年,非主航线多在 10 ~ 100 次/年,但是对于浅水区和某些海域,每年观测次数不足 2 次^[8],仅靠这些观测资料很难准确统计出高时空分辨率的近海风能多年平均状况。

1.2 基于数值模拟的近海风能资源评估

20 世纪 80 年代以来,欧美国家应用数值模拟技术发展了许多较为成熟的风能资源评估系统。其中常用的有丹麦的 WAsP, 美国的 MM5、MesoMap 和 Site Wind, 澳大利亚的 TAPM 和加拿大的 WEST 等。与国外相比,国内关于数值模拟技术的风能资源评

估起步较晚,但发展迅速。

2005 年,李晓燕等^[12]研究了将海洋站测风资料 and 卫星微波遥感散射计资料计入中尺度大气模式 MM5 的同化方法,并对广东沿海区域天气个例(2000 年 10 月 1 日)进行了模拟试验,不同模拟试验结果与实测值进行的对比分析表明,数据同化的结果优于仅采用数值模拟方法。这种利用某一时刻或较短时间,即天气学时间尺度的风场数据进行风能资源评估的方法称为天气学方法。

穆海振等^[13]利用 TAPM 数值模式在上海沿海地区进行了 1 a(2006 年 12 月至 2017 年 11 月)的数值模拟,用同期测风塔资料对初步模拟结果进行检验,然后根据误差分布规律进行模式系统误差订正,最后利用气象站 10a(1998 ~ 2007 年)的测风资料对经过订正的风模拟结果进行常年平均值订正,得到了模拟区域内 10m, 25m, 50m, 70m 和 100m 高度处多年平均风速和风功率密度。

中国气象局风能太阳能资源评估中心引进吸收加拿大、丹麦和美国等风能数值模拟技术,并根据中国的地理、气候特点,建立了适于中国气候和地理特点的风能资源评估系统 WERAS/CMA^[15,21]。周荣卫等^[15]利用该系统对我国沿海 20a(1986 ~ 2005 年)平均风资源进行 1km × 1km 分辨率的计算,结果表明,我国近海风能资源非常丰富,70 m 高度处多年平均风功率密度约在 300W/m² ~ 800W/m² 之间,福建省近海风能资源最为丰富,其次是辽宁省、浙江省和广东省,然后是山东省、河北省、天津市和上海市,最后是江苏省、海南省和广西省。这种利用较长时间系列(数年至数十年),即气候学时间尺度的风场数据进行风能资源评估的方法称为气候学方法。

随着数值模拟技术和计算机的快速发展,将数值模拟应用于风能资源评估已成为行之有效的方法。建立在对边界层大气动力和热力过程数学物理描述基础上的数值模拟技术要优于仅仅依赖气象站观测数据的空间插值方法^[21],特别是数据同化的发展,实现了数值模式和观测资料的有机结合,使其结果优于仅采用一种方法的风能资源评估,从而提高数值模拟的可靠性。

1.3 基于卫星遥感技术的近海风能资源评估

2004 ~ 2006 年以丹麦 Riso 国家实验室为主的

多家科研机构完成了丹麦国家科学技术委员会 SAT-WIND 研究计划,其目的是卫星遥感资料应用于海上风能资源评估的可行性^[22]。

张秀芝等^[8]利用 2000~2008 年 QuikSCAT 散射计卫星观测资料计算分析了中国近海季、年平均风速风向分布。与船舶观测资料比较表明,各月风向与船舶资料分析结果很一致,风速分布形式也基本一致,但数值上卫星资料略大于船舶资料(卫星反演的 10m 高度处风速,而船舶观测相对于 25m~30m 高度处风速),与实际相反。

在中国-欧盟环境项目“中国近海风能资源评估和海上风电开发可行性研究”中,利用合成孔径雷达(SAR)卫星资料,进行了江苏赣榆到杭州湾海域风能资源评估(由丹麦 Riso 国家实验室完成),这在我国海洋风资源评估中属首次^[8]。

常俊芳等^[17]利用 7 a(2005~2011 年)443 景 ENVISAT ASAR 遥感影像反演了浙江沿海 10m 高度处风速数据。评估结果表明,浙江沿海风能资源丰富,近岸海域 50km 范围内年平均功率密度达 $100\text{W}/\text{m}^2 \sim 500\text{W}/\text{m}^2$,其空间分布由东向西呈递减趋势,季节变化为秋冬季大、春夏季小。

2014 年,李赫等^[18]通过分析 10a(1999 年 7 月~2009 年 6 月)的 QuikSCAT 卫星遥感反演的海面风速资料,分析了中国毗邻海域风速和风功率密度的时空分布规律,并按照海洋功能区划的要求,综合衡量各海洋资源之间的关系,给出了海上风电开发建议。同年,常蕊等^[19]利用 SAR 卫星反演海面风场资料进行了杭州湾近海风能资源评估,通过实测风速与卫星反演风速的对比分析发现:(1)14 个实测站中 13 个站的相对误差小于 20%,其中 7 个站的相对误差小于 10%,平均标准差为 2.29 m/s ;(2)以卫星反演风速数据为基础计算的双参数 Weibull 概率密度函数的形状参数和尺度参数与实测数据计算结果的一致性较高;(3)将卫星反演风场数据利用松弛逼近方法同化进天气预报模式(WRF)数值模式中,使模拟效果得到明显提高(在 13 个检验站点中,10 个站的标准差明显减小)。

应用卫星遥感反演资料进行海洋风能资源评估的优势在于,卫星遥感资料覆盖空间范围大,而且卫

星图像的获取要比在海上建设测风塔更经济。但基于卫星资料的海洋风能资源评估也存在局限性,主要表现在:(1)时间分辨率低,例如在丹麦 SAT-WIND 研究计划所用的 17 颗卫星中,有 14 颗卫星观测频率不超过 1 次/天;(2)水平分辨率低,除 SAR 卫星可以达到 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的水平分辨率外,其他卫星资料分辨率一般为 $25\text{km} \times 25\text{km}$,难以直接应用于海上风电场资源评估;(3)精度较差,QuikSCAT 卫星遥感风速均大于实测风速,平均相差 $1.00\text{m/s} \sim 3.63\text{m/s}$ ^[23],SAR 卫星反演风速与实测风速标准差在 $1.90\text{m/s} \sim 3.59\text{m/s}$ ^[19];(4)卫星资料为 10m 高度层风场,不能反映不同高度处风场变化情况。

1.4 基于再分析资料的近海风能资源评估

2011 年,郑崇伟^[9]利用 NASA 提供的 CCMP 海面风场资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 6h),对中国海近 22a(1988~2009)海表风场特征进行分析。结果表明,中国海的海表风场具有明显的季节变化;6 级以上大风高值中心集中分布于东海和南海;中国大部分海域的海表风速呈增长趋势。

张华等^[10]利用 CCMP 再分析风场,评估了近 11a(2000~2010 年)我国近海风能资源。分析显示,近海水深 0m~50m 范围内 10m 高度处,福建沿海风能资源最丰富,其次是江苏近海。

王国松等^[11]基于 NCEP 的 CFSR 近 20a(1991~2010 年)10m 高度处风场再分析资料(水平分辨率约为 $0.312^\circ \times 0.312^\circ$,时间分辨率为 1h),对我国近海风能资源分布特征进行了统计分析;利用位于渤海湾的 54646 号平台观测站($118^\circ 25'E, 38^\circ 27'N$)逐时观测风速对 CFSR 同期数据进行对比分析,结果显示,该平台观测与 CFSR 两者之间的风速均方根误差在 2.3m/s 左右,偏差为 0.24m/s 。

上述研究表明,对于现场观测严重缺乏的我国近海风能资源评估,再分析资料具有较高的质量,可用于国家尺度的宏观评估。但对于海上风电场风能资源评估,再分析数据的水平分辨率、高度(通常为 10 m)还不能满足直接使用的要求,通常需要与现场观测和数值模拟等联合使用。

近海风能资源评估方法比较见表 1。

表 1 近海风能资源评估方法比较

序号	近海风能资源评估方法	发展时期	特点	存在的主要问题
1	基于气象站等历史观测资料	20 世纪 70 年代末至今	随着气象观测设备的快速发展和获取观测资料技术手段的提高,观测精度已有很大的提高和改善。	各观测站水平分布不均匀;观测时段不同步;海上建测风塔耗费巨大。
2	基于数值模拟	20 世纪 80 年代末至今	可获得较高分辨率的海洋风能资源分布特征,确定各高度层资源储量和技术可开发量。	因无法获得真实的初始场和边界条件,使模拟值与真实值存在较大差异,通常需与观测资料联合使用。
3	基于卫星遥感技术	近 10 年来	卫星遥感资料覆盖空间范围大;卫星资料的获取较在海上建设测风塔经济。	时空分辨率较低;精度也较差;仅提供距海面 10m 层风场。
4	基于再分析资料	近 5 年来	再分析资料分布均匀,时段较长。	时空分辨率较低;近海靠岸区域代表性不好。

2 中国近海风能资源评估的历史回顾

我国共进行了 5 次全国规模的近海风能资源调查,分别是第一、第二次全国风能普查,全国海岸带和海涂资源综合调查,第四次全国近海海洋可再生能源普查和全国风能资源详查(见表 2)。其中给出我国近海风能资源技术可开发量(潜在开发量)的 3 次全国近海风能资源调查与评估是:第二次全国风能资源普查、第四次全国近海可再生能源普查和全国风能资源详查。

2.1 第二次全国风能资源普查中的近海风能资源评估^[21,24,25]

20 世纪 80 年代末,薛桁等利用全国 900 多个测风资料(1980 年以前的观测资料)绘制了我国多年平均风功率密度分布图,并首次估算了全国离地面 10 m 高度处的风能资源储量和技术可开发量,陆地风能资源总储量为 32.26 亿 kW,技术可开发量按总储量的 10% 再乘以 0.785 计算(0.785 为风能捕获系数),得陆地风能技术可开发量 2.53 亿 kW,近海(水深小于 15m)风能技术可开发量估计为 7.5 亿 kW。薛桁等提出的风能资源总储量计算方法随后被国家发改委《全国风能资源评价技术规定》^[26]采

用,但该规定未采用其技术可开发量的计算方法。本次普查首次对我国风能资源储量和技术可开发量进行了估算,其中海上风能资源是按陆地风能资源技术可开发量的 3 倍计算,是套用丹麦的陆、海风能资源比例得出的^[25]。但丹麦是个岛国,海洋面积是陆地面积的几倍,而我国是个大陆国家,海洋面积不足陆地面积的 1/3,因此直接套用丹麦陆、海风能资源比例对我国海洋风能进行评估缺乏科学依据。

2.2 第四次全国近海可再生能源普查^[16,27]

2004 ~ 2011 年,在国家海洋局组织实施的“我国近海海洋综合调查与评价专项”我国近海海洋可再生能源调查与评价项目中,采用 2 a(2007 ~ 2008 年)的 2976 个常规地面观测站、196 个探空站、112 条船舶提供的观测资料和 QuikSCAT 卫星反演资料作为同化资料,以 NCEP 再分析资料作为初始场和驱动场,利用中尺度气象模式 MM5,重构了 2007 ~ 2008 年我国近海 10 m 高度风场(时间分辨率 1h,水平分辨率 0.1° × 0.1°),在利用 76 个海洋站气象资料对模拟结果进行验证后,根据《全国风能资源评价技术规定》^[26]对我国近海海洋风能资源进行了评估。结果表明,我国近海 50m 等深线以内风能资源总储量为 8.83 亿 kW,技术可开发量为 5.70 亿 kW。

表 2 我国近海风能资源评估状况

序号	历次近海风能资源调查与评估	调查时间	评估方法	主要成果	存在的主要问题
1	第一次全国风能资源普查中的近海风能资源评估	1979	基于气象站等历史观测资料	首次做出我国陆地风能资源储量计算和区划(将全国划分为风能丰富区、较丰富区、可利用区和贫乏区)	本次海洋风能资源评估工作由全国 300 个气象站测风资源统计计算的结果进行外推获得,缺乏海上测风数据验证,也没有给出近海风能资源储量
2	全国海岸带和海涂资源综合调查中的近海风能资源评估	1979~1987	基于气象站等历史观测资料	利用沿岸和海岛上 32 个海洋站气象资料分析了我国海岸带风能资源分布特征	仅分析计算了年平均风速、平均风功率密度和有效风时等 3 个海洋风能资源评估参数
3	第二次全国风能资源普查中的近海风能资源评估	1984~1987	基于气象站等历史观测资料	首次估算了我国海洋风能资源技术可开发量	海洋风能资源技术可开发量由丹麦海洋/陆地风能技术可开发量比例推算,缺乏科学依据
4	第四次全国海洋可再生能源普查中的近海风能资源评估	2004~2011	基于数值模拟	计算了 2007-2008 年我国近海 0m~50m 水深范围内 10m 高度层的风能资源储量和技术可开发量,并进行海洋风能资源区划	评估数据序列长度较短(仅 2 a);水平分辨率较低($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$);评估高度为 10m 层
5	全国风能资源详查中的近海风能资源评估	2007~2009	基于数值模拟	利用高分辨率数值模式评估了我国近海 1971-2000 年我国近海 10m、50m、70m 和 110m 高度层的风能资源潜在开发量,并进行了海洋风能资源区划。	未进行风能资源长期变化趋势研究

本次调查采用先进的观测技术手段,并通过多源融合资料同化进行了近海风能资源评估,获得较为可靠的评价结果,这在我国近海风能资源调查与评估方面尚属首次。需要说明的是:(1)评估区域不包括台湾省;(2)评估数据序列长度为 2a 与《全国风能资源评价技术规定》^[26]规定的 30a 差距较大;(3)评估的水平分辨率较低,且评估的高度为 10m,使评估结果无法直接应用于海上风电开发规划。

2.3 全国风能资源详查中的近海风能资源评估^[14,21,25]

2007 年,中国气象局采用 WEST 模式完成了对我国大陆及其近海 30a(1971~2000 年)的风能资

源评估。本次详查给出垂直高度 10m、50m、70m 和 110m,水平分辨率 5km×5km 的全国陆地和近海风能资源分布图。按照 GB/T 18710-2002《风电场风能资源评估方法》^[28]的风能资源区划标准,计算了我国陆地离地面 50m 高度达到 3 级及其以上的风能资源潜在开发量约为 23.8 亿 kW,我国近海 5~25m 水深范围内海平面以上 50m 高度处达到 3 级及其以上的风能资源潜在开发量约为 1.88 亿 kW。潜在开发量是指在理论储量的基础上,考虑了限制风能资源开发的自然地理和环境保护等因素后的风能资源储量^[26]。中国近海风能资源丰富。渤海的风能资源等级主要是 4 级;黄海及东海的杭州湾等级为 3 级;广西北海以外的北部湾海域,风能资源等

级为3~4级。风能资源最丰富的近海海域是浙江南部、福建和广东东部沿海,风能资源一般在4级以上。

2009年,中国气象局又利用WERAS/CMA风能资源数值模拟评估系统重点对山东、江苏、上海、浙江和福建近海近20a(1986~2005年)的风能资源进行了精细化研究,水平分辨率达 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。本次精细化评估得到了各高度层上的逐时风向、风速、年平均风速、平均风功率密度等10项参数。

综合评估时段、水平分辨率和评估高度等方面,本次全国风能资源详查是迄今为止最详实的近海风能资源调查与评估,上述成果对于我国海上风电规划的编制和风电场选址发挥了重要作用。

3 我国近海风能资源评估展望与建议

3.1 加快近海风能资源评估体系建设

在近海风能资源的评估技术方法上,由过去的基于测风塔、气象站和船舶等观测资料统计分析方法发展到采用数值模拟、再分析资料和卫星遥感等评估方法。目前进行近海风能资源评估通常依据《风电场风能资源评估方法》和《全国风能资源评价技术规定》,但这两个标准(技术规定)是针对陆地风能制定的,其评估方法也仅有观测资料统计分析法(技术规定中数值模拟为可选项)。

国家发改委发布的《可再生能源发展“十二五”规划》规定,到2015年海上风电装机达到500万kW,2020年海上风电装机达到3000万kW。在这个大规模发展海上风电的形势下,建立近海风能资源评估体系,统一评估海洋风能资源储量、技术可开发量、经济可开发量的技术指标,规范数值模拟、再分析资料和卫星反演等评估方法显得尤其重要。

3.2 做好近海风能资源长期变化趋势预测

资源评估是风电场建设的基础性工作,风能资源的长期变化直接关系到风电开发的经济效益。现阶段的海洋风能资源评估一般是针对历史上1~30a时间进行,而风电场的运营期一般在20年以上,因此开发商更关注的未来几十年的风能资源。

3.3 开展近海风能资源评估中的不确定性分析

近海风能资源评估结果的准确性直接关系到海

上风电场业主投资的风险及经济效益。由于测量误差问题、代表年的选择不同、风切变分析、选用的数值模式的差异、风能资源长期订正问题(评估地点风速与最近气象站风速相关性不完全满足要求)等诸多原因,评估结果必然存在一定的不确定性。目前针对近海风能资源评估中的不确定性的分类和评估方法并不统一且不易量化,应对风能资源评估不确定性因素进行分类并提出科学、合理、可操作性的评估方法。

3.4 加强海上风电开发利用环境影响评价

海上风电虽然对环境污染较少,但是在施工期和运营期也会对海洋环境造成一定程度的影响。在施工期会产生噪声、悬浮物和废弃物,影响区域生态和水动力环境;在运营期也会产生噪音和辐射等,对渔业生产、鸟类迁徙和自然景观等产生影响。因此,在进行海上风电开发以前,有必要对海上风电开发而带来的环境影响进行深入、细致地研究,并做好海上风电场选址工作,避开鸟类的迁徙路线、海洋保护区、港口航运区和特殊利用区等,将风电开发对环境的影响降低到最低;在风电场施工期和运维期进行长期监测,对风电项目不同阶段的实际环境影响进行评价,对由海上风电开发造成的生态和水动力系统破坏、环境污染等,应进行修复和补偿。

3.5 开展海上风电场的局地气候影响评估

大型风电场建立与运行以后,无疑将改变原有的局地近地层大气运动特征,近地层大气运动的改变进而产生对整个大气边界层中动量、热量和水汽输送的影响^[21]。大规模发展近海风电对局地的风速、温度、降水和湍流强度等会有一定的影响。因此,有必要对近海风电开发带来的局地气候影响进行深入、细致的研究,同时应科学论证大规模开发利用近海风电的温室气体减排效应。

参考文献

- [1] 朱瑞兆,薛珩. 我国风能资源. 太阳能学报,1981,2(2):117-224
- [2] 全国海岸带和海涂资源综合调查成果编委会. 全国海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京:海洋出版社,1991. 504-506
- [3] 钱光明,吴开嘉,罗金铃. 广东省沿海风能资源研究. 1992,8(3):227-236

- [4] 沈佩玉,高焕臣,邱力. 我国34°以北沿海风能的分布. 海洋通报,1993,12(1):86-90
- [5] 姜波,赵世明,徐辉奋等. 山东半岛沿海风能资源评估与分布研究. 海洋技术,2009,28(4):101-103
- [6] 姜波,赵世明,马治忠等. 辽宁沿海地区风能资源时空分布的初步分析. 海洋科学,2011,35(12):56-62
- [7] 姜波,刘富铀,徐辉奋等. 浙江省沿海海洋风能资源评估. 海洋技术,2012,31(4):91-94
- [8] 张秀芝,徐经纬. 中国近海风能资源评估. 风能,2009,3:44-47
- [9] 郑崇伟. 基于CCMP风场的近22年中国海海表风场特征分析. 气象与减灾研究,2011,34(3):41-46
- [10] 张华,张学礼. 中国东部海域风能资源分析. 水利学报,2013,44(9):1118-1123
- [11] 王国松,高山红,吴彬贵等. 我国近海风能资源分布特征分析. 海洋科学进展,2014,32(1):21-29
- [12] 李晓燕,余志. 基于MM5的沿海风资源数值模拟方法研究. 太阳能学报,2005,26(3):400-408
- [13] 穆海振,徐家良,杨永辉. 数值模拟在上海海上风能资源评估中的应用. 高原气象,2008,27(增刊):196-202
- [14] Zhu R, Zhang D, Wang Y D, et al. Assessment of wind energy potential in China. *Engineering Sciences*,2009,7(2):18-26
- [15] 周荣卫,何晓凤,朱蓉等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟. 资源科学,2010,32(8):1434-1443
- [16] 姜波,杨学联,张松等. 基于MM5模式的我国近海海洋风能资源评估. 风能,2013,37:80-85
- [17] 常俊芳,黄韦良,楼琇林等. 基于ENVISAT ASAR影像的浙江沿海风能资源评估. 高技术通讯,2013,23(5):467-475
- [18] 李赫,齐文静,曹春雨等. 中国毗邻海域海上风能资源分析. 青岛大学学报(自然科学版),2014,27(4):31-34
- [19] 常蕊,朱蓉,周荣卫等. 高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究. 气象学报,2014,40:606-613
- [20] 夏登文,岳奇,徐伟等. 海洋矿产与能源功能区研究. 北京:海洋出版社,2013. 127-128
- [21] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源评估. 北京:气象出版社,2010. 123-140
- [22] Hasager C B, Astrup P, Nielsen M, et al. SAT-WIND Project Final Report. Risoe-R-1586(EN). 2007
- [23] 徐经纬,张秀芝,罗勇等. QuikSCAT卫星遥感风场可靠性分析及其揭示的中国近海风速分布. 海洋学报,2013,35(5):76-86
- [24] 薛桁,朱瑞兆,杨振斌等. 中国风能资源贮量估算. 太阳能学报,2001,22(2):167-170
- [25] 朱成章. 关于中国风能资源储量的质疑. 中外能源,2010,15:34-38
- [26] 国家发展改革委. 全国风能资源评价技术规定. 2004
- [27] 韩家新,赵世明,刘富铀等. 中国近海海洋——海洋可再生能源. 北京:海洋出版社,2015. 158-212
- [28] 中国水利水电建设工程咨询公司. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法. 北京:中国标准出版社,2002

Research progresses in assessment of China's offshore wind Energy Resources

Jiang Bo, Liu Fuyou, Wang Xiaoyong, Du min, Xu Huifen,
Zhang Rong, Ding Jie, Shi Yong, Cai Xiaoqing
(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112)

Abstract

Four methods for assessment of China's offshore wind energy resources based on historical data of meteorological stations, numerical simulations, satellite remote sensing technology and reanalysis data over the past 30 years, and their characteristics, are summarized and analyzed. The main achievements and problems of the five offshore wind energy assessments based on census and detailed surveys are compared. The view that the standard for assessment of land wind resources cannot be fully applicable for the assessment of offshore wind energy is presented, and the importance of prediction of the wind energy resources in the coming decades is expounded. The proposals of accelerating the construction of the assessment system of offshore wind energy resources, accomplishing the long-term prediction of the variation trend of wind energy resources and strengthening the environmental impact assessment of offshore wind energy development and utilization are given.

Key words: research progress, offshore wind energy, resource assessment, method, proposal