

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2018.0057

杨明祥,雷晓辉,蒋云钟,等.基于数值模拟的南四湖风能资源初步评估[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):182-188.
YANG M X, LEI X H, JIANG Y Z, et al. A preliminary assessment of wind energy resources in the Nansi Lake based on numerical simulation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 182-188. (in Chinese)

基于数值模拟的南四湖风能资源初步评估

杨明祥¹,雷晓辉¹,蒋云钟¹,鹿星²,杨宁³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 南水北调东线总公司, 北京 100088;
3. 黄河水利委员会信息中心, 郑州 450004)

摘要: 基于气象站与测风塔的区域风能资源评估具有较大局限性,前者无法获得风机轮毂高度处的风速资料,评估精度较低,后者难以获得较长时间观测资料,对平均风速的年际变化反映不足,且评估成本较高。选取南四湖周边地区为研究对象,基于WRF构建该地区数值天气预报模式,在NCEP FNL资料的驱动下实现南四湖地区2000-2016年的小时风场模拟。提取80 m高度处风场模拟信息,通过年平均风速、年平均风功率密度、年可利用小时数、年内风速分布、主风向等指标,对该地区风能资源进行了初步评估,认为该地区风能资源具备一定开发利用价值,且靠近南水北调东线泵站群等能源消耗中心,有利于风电的就地消纳,为该地区风能资源详查和开发利用提供了一定的参考。

关键词: 南四湖; 风能资源评估; WRF模式; 数值模拟

中图分类号: P962 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0182-07

A preliminary assessment of wind energy resources in the Nansi Lake based on numerical simulation

YANG Mingxiang¹, LEI Xiaohui¹, JIANG Yunzhong¹, LU Xing², YANG Ning³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. China Eastern Route Corporation of South to North Water Diversion, Beijing 100088, China; 3. Information Center of the Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The assessment methods of regional wind resources based on meteorological stations and anemometer towers have some limitations. The former does not have access to the wind speed data of the fan wheel, and has low evaluation precision. The latter has difficulty in getting long time observation data, cannot provide sufficient description of the interannual variability of the average wind speed, and has high evaluation cost. In this article, we selected the surrounding area of Nansi Lake as the object of study, constructed the numerical weather forecast mode of this region based on WRF, and realized the simulation of hourly wind field around Nansi Lake from 2000 to 2016. Extracting the simulation information of wind field at 80m height, we conducted preliminary evaluation of the wind energy resources in this region by studying the annual average wind speed, annual average wind power density, annual available hours, annual wind speed distribution, and prevailing wind direction. We held that the wind energy resources in this region have certain development and utilization value. As it is close to the energy consumption centers such as the pumping stations group of the East Route of the South to North Water Transfer Project, the wind electricity can be used locally. This paper provides certain reference for checking and utilizing wind energy resources in this region.

Key words: Nansi Lake; wind resource assessment; WRF Model; numerical simulation

收稿日期: 2017-04-28 修回日期: 2017-10-26 网络出版时间: 2018-01-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180108.1132.002.html>

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0402201);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(ZJBKYY1753);国家自然科学基金青年基金(51709271)

Funds: The National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period (2016YFC0402201); Special Fund for Basic Scientific Research of IWR (ZJBKYY1753); National Natural Science Foundation of China(51709271)

作者简介: 杨明祥(1986-),男,河南新乡人,工程师,博士,主要从事数值模拟方面研究。E-mail: yangmx@iwhr.com

风能资源评估是风电开发的重要环节,有助于摸清待开发区域的风场分布,风能储量等,对电厂布局设计和风能资源详查有重要指导意义^[1]。目前,风能资源评估主要基于气象站或者测风塔进行^[2-5]。然而,气象站往往只能获得 10 m 高度处的风速,无法直接对风力发电机 80m 甚至更高的位置进行评估,在风能资源评估中具有先天不足^[6]。测风塔虽然可以获取大多数风机所在高度的风速资料,但建设成本较高,测风周期较长,难以直接获取一个地区多年的平均风能情况,评估效果可靠性有限^[7-9]。近些年来,随着气象数值模式与高性能计算机技术的发展,利用数值模拟方式对研究区风场进行较长时间的模拟,获取研究区年平均风速分布、可利用小时数分布、主导风向等关键指标受到了越来越多研究人员和工程人员的关注。罗梦森等人利用 WRF(Weather Research and Forecast)模式对江苏沿海地区风能资源状况进行了数值模拟和评估,并据此对风力发电场的位置给出了建议^[10]。汪明军等人利用中尺度气象模式对长三角地区 2010 年 10 月份的风场进行了数值模拟,并对该地区近地层和高层风资源进行了评估^[11]。陈楠等人利用 WRF 模式对广东海上风能资源进行了量化估计,并利用测风塔实测资料进行了对比分析,发现两者评估结果无明显差别^[12]。NREL 实验室通过中尺度数值模拟技术实现了美国近海风能资源评估,并绘制了 90 m 高度处高分辨率的风能资源分布图^[13]。Riso 实验室利用中尺度数值模式数据,对欧洲部分区域进行了分辨率为 2~5 km 的风能资源评估,并生成了高分辨率风能资源分布图^[14]。可见,围绕数值模式在风能资源评估中的应用,国内外已经开展了大量研究工作。然而,目前研究多是对一年或一段时间的风场进行模拟评估,未充分考虑风速在年际间变化的影响。有研究表明,过短的资料并不能准确反映当地的风况,一般认为 5~10 a 或者 10 a 以上的观测资料能比较客观地反映该地的真实状况^[15]。本文选择南四湖周边作为研究区,基于三层嵌套构建该区域 WRF 模式,并在美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的 FNL 全球分析资料(Final Operational Global Analysis)的驱动下,实现南四湖周边长达 17 a 的风场模拟及初步评估,以期数值模式在风能资源评估中的应用提供一定参考,为南四湖周边风能资源详查和开发提供一定支撑。

1 研究区简介

南四湖位于山东省西南部,如图 1 所示,隶属微

山县管辖,位于 $34^{\circ}15' - 34^{\circ}53' N$ 和 $114^{\circ}50' - 117^{\circ}48' E$ 之间,全湖面积 $1\,266\text{ km}^2$,是山东第一大湖,也是中国大型淡水湖泊之一,分为上级湖与下级湖两部分^[16]。南四湖处在山东丘陵西部边缘与黄河冲积平原的交接地带,湖东地势东高西低,湖西是数千年来黄河改道、决口泛滥淤积而成的平原,地势西高东低。南四湖是南水北调东线干线工程的必经之地,其承接从台儿庄-万年闸-韩庄,以及刘山-解台-蔺家坝两条调水线路的来水,并通过位于湖泊中部的二级坝泵站,将水抬升至上级湖通过长沟泵站继续北送^[17-19]。南四湖周边的 8 座大型泵站内单台机组装机普遍在 2 000 kW 左右,电力消耗成了调水成本的重要组成部分^[20-21]。对南四湖区周边风能资源进行初步评估,摸清周边风能资源时空分布特点,对于该地区清洁能源的有效利用,降低环境污染风险,有一定的帮助。

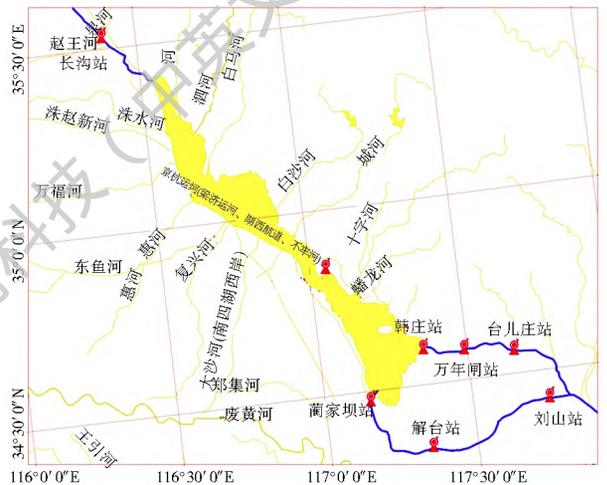


图 1 研究区域

Fig. 1 Study region

2 数值模式构建

WRF 模式是由美国国家大气研究中心(NCAR),国家环境预报中心(NCEP)等多所研究机构共同研发的新一代高分辨率中尺度数值模式^[22-23],适用于水平分辨率从数米到上万千米尺度的各种天气系统的模拟^[24]。近年来,随着全世界风能开发加速推进,特别是中国风电市场逐步成熟,对气象服务的要求也越来越高,使得 WRF 模式在风能资源开发方面的研究和应用逐渐升温。

综合考虑计算资源与研究目标,采用三层嵌套方式,将 WRF 模式输出最内层数据分辨率定为 3 km。嵌套区域设置充分考虑了周边大地形和重点天气、气候系统,并尽量避免模拟中跨越气候特征或者地理特点相差巨大的区域。不同层级之间的网格

设置为双向反馈关系,内层网格在接受外部网格提供的初始场和边界条件的同时也向外部网格反馈模式运行信息。设置模式层顶气压为 50 hPa,并将地面以上至 100 m 的垂直空间做加密处理,使其能够输出 10 m、50 m、70 m、80 m、100 m 等关键高度层。模型运行所需的地形等地面静态数据从 WRF 官网获取 (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/GEOGRID/ter_data.htm)。模式积分步长设置为 90 s,每 1 h 输出一次模拟结果。模式微物理方案和积云对流参数化方案采用 WSM3 (Single Moment 3-class scheme) 和 GD (Greif-Devenyi)。由于最内层分辨率为 3 km,因此不对最内层积云对流参数化方案进行设置。边界层和陆面模式选择普遍使用的 YSU 和 Noah 参数化方案,长波辐射选择 RRTM 参数化方案而短波辐射选择 Dudhia 参数化方案。WRF 模式其他参数或方案设置详见表 1。

表 1 WRF 模式参数配置

Tab. 1 WRF model parameters configuration

名称	取值
动力框架	Noah hydrostatic
驱动数据	NCEP/NCAR FNL
输出时间间隔	6 h
网格大小与垂直分层	Domain 1: (30×30) × 50
	Domain 2: (46×46) × 50
	Domain 3: (34×34) × 50
水平分辨率	Domain 1: 27 km × 27 km
	Domain 2: 9 km × 9 km
	Domain 3: 3 km × 3 km
地形数据分辨率	30 s
植被数据分辨率	30 s
地图投影	Mercator
水平网格系统	Arakawa C grid
积分步长	90 s
垂直坐标	Terrair following hydrostatic pressure Vertical coordinate with 35 vertical levels
时间差分方案	3 rd order Runge-Kutta Scheme
空间差分方案	6 th order center differencing
边界层方案	YSU
云微物理参数化方案	Single Moment 3-class scheme
积云对流参数化方案	Greif-Devenyi
陆面模式	Noah land surface scheme
长波辐射	RRTM scheme
短波辐射	Dudhia scheme

3 实验设计与指标计算方法

3.1 实验设计

本研究利用 2000 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日的 FNL 数据驱动 WRF 模式,获取时段内每小时的平均风速模拟结果。但 WRF 模式动力框架与参数化方案均为适应天气模拟而设计,且模式运行需要一定的 Spin up 时间,因此采用 60 h 一循环,前 12 h 舍去的方式完成长达 17 a 的数值模拟。

3.2 指标计算方法

本文主要借助年平均风速、年平均风功率密度、风能年可利用小时数、主风向等指标对南四湖周边区域进行风能资源的初步评估。由于目前风机位置多位于 80 m 高度处^[25,26],因此本文所做研究主要针对 80 m 高度处的风速展开。

(1) 年平均风速

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

式中: V 为年平均风速 (m/s); v_i 为逐小时平均风速 (m/s); n 为评估时段内的小时数 (h)。

(2) 年平均风功率密度

风功率密度 (W/m^2) 是指与风向垂直的单位面积风所具有的功率,是衡量风电场风能资源的综合指标,数值越大代表风能资源越丰富^[27]。年平均风功率密度计算公式如下:

$$D = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho v_i^3 \quad (2)$$

式中: D 为年平均风功率密度 (W/m^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3)。

空气密度并不是 WRF 模式的直接输出变量,本研究利用式 (3) - 式 (5) 对各网格上各时次的空气密度进行计算:

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366T} \left[\frac{p - 0.378}{1000} \right] \quad (3)$$

$$E = 6.111 \times 10^{(7.57T/237+T)} \quad (4)$$

$$e = E \times r_h \quad (5)$$

式中: T 为气温 (WRF 输出变量, °C); p 为大气压 (WRF 输出变量, hPa); e 为水汽压 (hPa); E 为饱和水汽压 (hPa); r_h 为相对湿度 (WRF 输出变量, %)。

(3) 风能年可利用小时数

风能年可利用小时数 (h) 是指一年内可以运行在有效风速范围内的时间^[28]。根据目前常规风力发电设备的机械与电力特性,一般将切入风速定为 3 m/s,即轮毂处风速大于 3 m/s 就可开始并网发

电,切出风速一般定为 25 m/s,即轮毂处风速大于 25 m/s 风机就须切出电网^[29]。

(4) 主风向。

根据 16 方位图以及风速的 U 、 V 分量,对模拟的小时风速在风向上进行分类,并在多年尺度上做统计分析,得到每个栅格上的主风向。

4 评价结果

4.1 平均风速的年际变化

利用 2000 年 1 月 1 日 00 时到 2016 年 12 月 31

日 23 时的小时风速模拟资料,统计每个栅格上各年的平均风速大小。选择白沙河与城河入湖口、二级坝、南四湖最南端以及东北部山区为代表地点,获得这些地点风速的年际变化情况如图 2 所示。可知,该区域风速的年际变化较大,四个地点的平均风速变化接近 1 m/s,其中近些年平均风速的变化更加剧烈。这为基于测风塔的风能资源评估带来了较大困难,而利用数值模式进行风能资源的初步评估可实现多年风速的模拟评价,有望成为未来风能资源开发的重要研究内容。

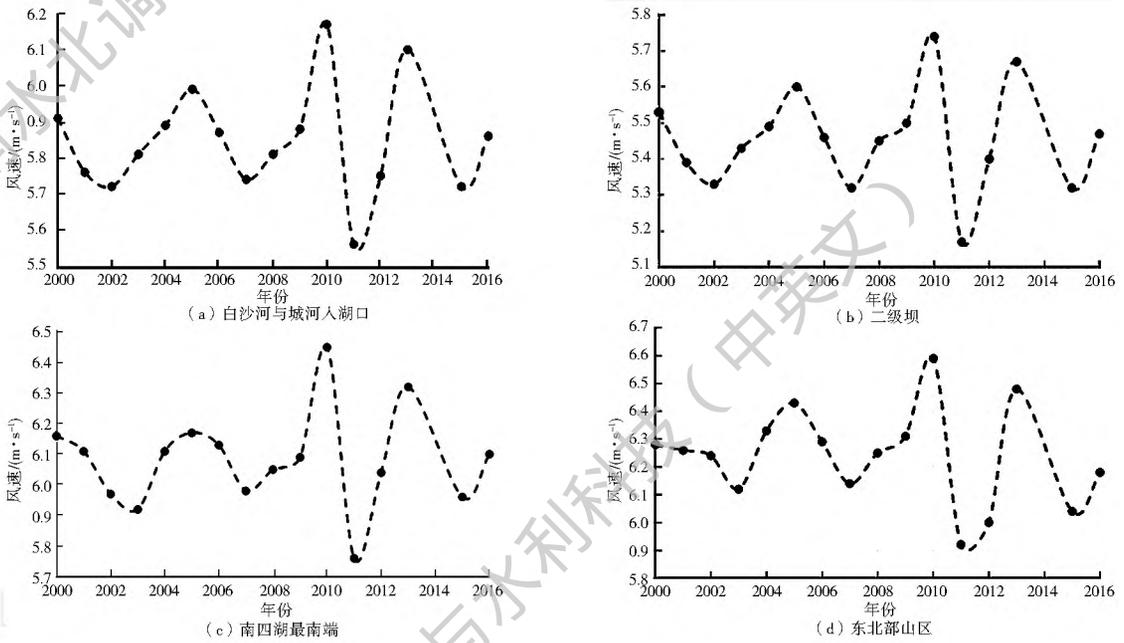


图 2 平均风速年际变化

Fig. 2 Interannual variation of average wind speed

4.2 年平均风速与风功率密度

根据公式(1)计算南四湖周边 80 m 高度上各栅格的年平均风速,如图 3(a)所示。从数值模拟结果可知,南四湖周边年平均最低风速高于 5 m/s,且各个地区风速差异并不明显,风速最高的东北部山

区较风速最低的下级湖西岸,年均风速仅相差 1.1 m/s。受地形强迫以及湖面加速的影响,白沙河与城河入湖口附近的风速较周边风速要高,达到了 6 m/s 左右,形成了一个较为明显的局部高风速区。根据公式(2)得到南四湖周边地区 80 m 高度处年

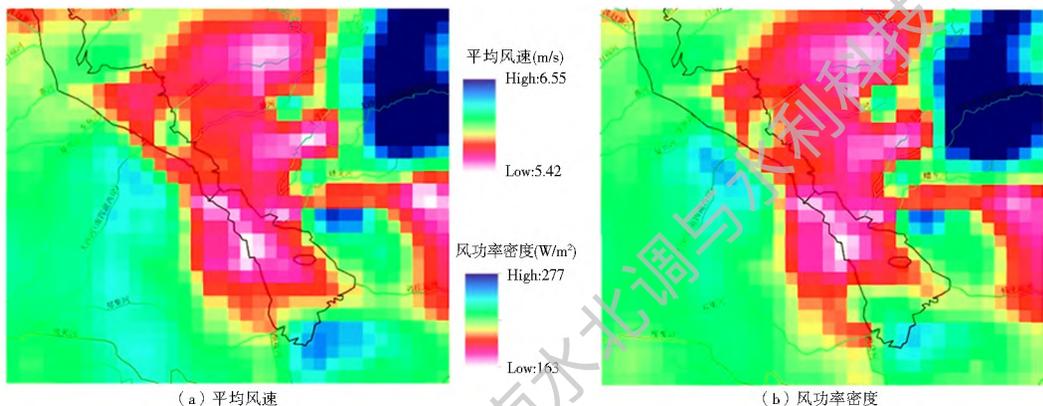


图 3 年平均风速与风功率密度分布

Fig. 3 Distribution of annual mean wind speed and wind power density

平均风功率密度分布情况,如图 3(b) 所示。可见,该地区年平均风功率密度位于 163 W/m^2 和 277 W/m^2 之间。其中,白沙河与城河入湖口附近年平均风功率密度在 200 W/m^2 左右;二级坝附近年平均风功率密度在 175 W/m^2 左右;南四湖最南端顺堤河与韩庄运河之间的区域,年平均风功率密度在 220 W/m^2 左右;东北部山区的年平均风功率密度则达到了 270 W/m^2 以上。综上,南四湖周边地区年平均风速在 5 m/s 以上,平均风功率密度在 163 W/m^2 和 277 W/m^2 ,参考 GB/T 18710-2002 中风功率密度等级表可知,该区域属于可开发的区域,随着低风速区风电开发技术的不断进步以及分布式风电建设的不断推进,该区域的开发潜力将日益突出。

4.3 年风能可利用小时数

根据 2000-2016 年的连续模拟资料,将每个栅格上风速位于 3 m/s 和 25 m/s 的时段数相加并求年平均,绘制风能年可利用小时数分布见图 4。可知,南四湖周边风能年可利用小时数位于 6929 h 到 7881 h 之间,代表理论上该地区一年内可进行风力发电的时间超过了 80%。其空间分布与年平均风速的分布基本一致,南四湖东部地区风能年可利用小时数普遍多于西部地区,这主要是由于地形

4.4 风速年内分布

基于 2000-2016 年的小时平均风速模拟数据,根据公式(1)对 80 m 高度上每个网格点各月平均风速进行统计,见图 5。南四湖周边各月平均风速

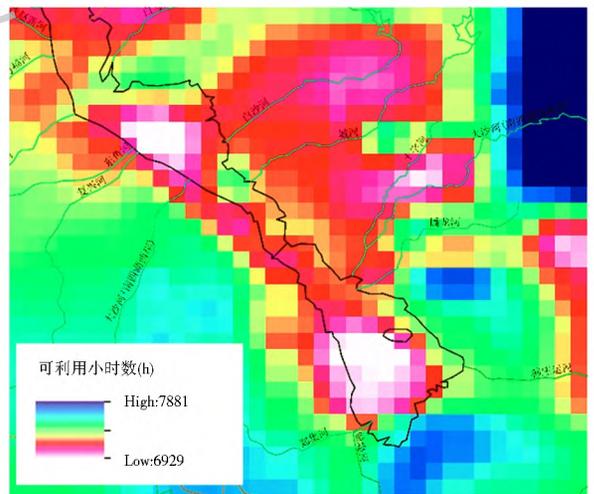


图 4 年风能可利用小时数分布

Fig. 4 Distribution of wind energy available hours

的空间分布与年平均风速的空间分布较为接近,均表现为东北方向风速高而西南方向风速小的特征,且各月模拟结果均表明白沙河与城河入湖口附近是一个风速高值区。从时间分布上来看,南四湖周边风速最大的几个月是 2 月-6 月,特别是 4 月份南四湖周边多数地区平均风速在 7 m/s 左右;风速最低的几个月主要是 8 月和 9 月。可见南四湖大风天气主要集中在春季,而低风速天气主要集中在夏季,这与该地区受季风气候影响有关。虽然南四湖周边各月平均风速相差较大,但其平均风速均在 4 m/s 以上,说明该地区的风能资源在一年四季均具有一定的开发利用价值。

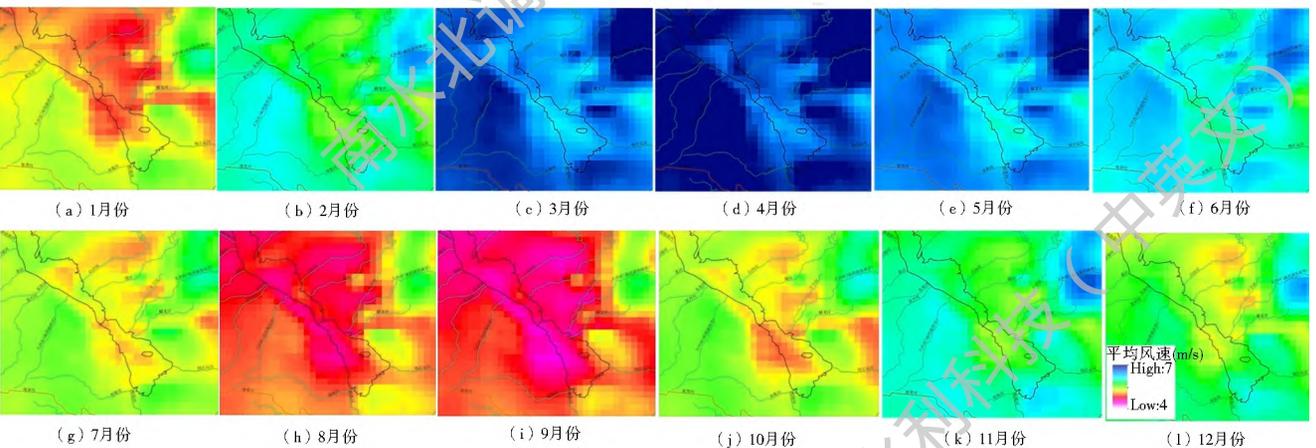


图 5 各月平均风速分布

Fig. 5 Distribution of mean wind speed in each month

4.5 主风向分布

根据 2000-2016 年南四湖周边 80 m 高度处小时平均风速 U 、 V 分量的模拟数据,按照 16 风向图的分类方式对各时刻风向进行定义,并基于此对各网格的风向频率进行分析,取频率最高者形成主风向分布图,见图 6。受东南季风的影响,南四湖周边

的主风向表现为偏东南风。在局部地形的强迫下,蟠龙河以南至南四湖最南端的区域,以及郑集河沿线区域的主风向为东风,韩庄运河周边的主风向为东北偏东风,而十字河上游以北的区域则盛行南风。湖面的主风向明显受两岸地形的影响,表现出与湖岸平行的特征。

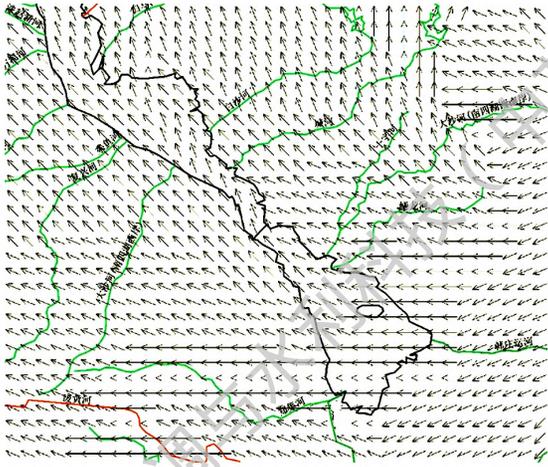


图6 南四湖周边主风向分布

Fig. 6 Distribution of main wind direction around Nansi Lake

5 结论与展望

5.1 结论

本文选择南四湖为研究区, 基于 WRF 模式构建风场模拟模型, 并在 FNL 资料的驱动下, 对 2000–2016 年的风场进行了连续模拟。在此基础上, 通过年平均风速、风功率密度、风能年可利用小时数、风速年内分布以及主风向分布等指标的分析, 实现对南四湖周边风能资源的初步评估。评估结果显示, 南四湖周边平均风速较高, 且时空差异较小, 年平均风功率密度在 163 W/m^2 和 277 W/m^2 之间, 年可利用小时数位于 6 929 h 到 7 881 h 之间。虽然平均风速在年内呈现出明显的季节变化, 但最小风速均在 4 m/s 以上, 仍具有一定的开发利用价值。受东南季风影响, 区域内主风向表现为偏东南风, 局部区域受地形影响存在偏东北风的情况。随着低风速区风电开发利用技术的不断进步, 该地区风能资源开发潜力将不断凸显, 且该地区靠近能源消耗中心, 存在大型泵站等耗能单元, 为新能源的就地消纳提供了一定条件。

5.2 展望

基于数值模拟的风能资源评估较传统方法有诸多优点, 如成本低、能够直接获取轮毂高度处的风速信息、可获取资料的时间序列长等。但数值模式为大量数学方程对自然现象的近似描述, 受人类认识能力的局限, 描述过程中不可避免存在一定偏差, 同时数值模式本身由大量的参数化方案组成, 各类参数化方案对不同气象特征的适用性不同。可见采用数值模式进行风能资源评估具有一定的不确定性, 在未来的研究中将针对数值模式评估过程中的不确定性进行深入探索。

参考文献 (References):

[1] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气

象学报, 2007, 65(5): 708-717. (LI Z C, ZHU R, HE X F, et al. Study on the assessment technology of wind energy resource [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(5): 708-717. (in Chinese) DOI: 10.11676/qxxb.2007.066.

- [2] TROEN I, PETERSEN E L. European Wind Atlas [M]. Roskilde: Risoe National Laboratory, 1989.
- [3] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源储量估算[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 167-170. (XUE H, ZHU R Z, YANG Z B, et al. Assessment of wind energy reserves in China [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(2): 167-170. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2001.02.010.
- [4] SHIKHA S, BHATTI T S, KOTHARI D P. A review of wind resource assessment technology [J]. Journal of Energy Engineering, 2006, 132(1): 8-14. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2006)132:1(8)
- [5] 谢今范, 刘玉英, 王玉昆, 等. 东北地区风能资源空间分布特征与模拟[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1497-1503. (XIE J F, LIU Y Y, WANG Y K, et al. Spatial distribution characteristics of wind resource and its simulation in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(12): 1497-1503. (in Chinese) DOI: 10.13249/j.cnki.sigs.2014.012.1497.
- [6] 朱金华, 张淑君, 许昌, 等. 基于 WRF/CALMET 模式的江苏沿海风能资源评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 62-65. (ZHU J H, ZHANG S J, XU C, et al. WRF and CALMET common modeling and assessment of wind energy for offshore region in Jiangsu Province [J]. J of China Three Gorges Univ (Natural Sciences), 2016, 38(1): 62-65. (in Chinese) DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948.2016.01.013.
- [7] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉. MM5/CALMET 模式系统在风能资源评估中的应用[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2101-2113. (ZHOU R W, HE X F, ZHU R. Application of MM5/Calmet Model System in Wind Energy Resource Assessment [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 2101-2113. (in Chinese) DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.12.011.
- [8] 杨鹏武, 王学锋, 王麟, 等. WRF_TopoWind 模式对中国低纬高原高山风速模拟的适用性研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 766-772. (YANG P W, WANG X F, WANG L, et al. A study on the applicability of WRF_TopoWind model to simulate the mountain wind speed of the low latitude plateau in China [J]. Journal of Yunnan University, 2016, 38(5): 766-772. (in Chinese) DOI: 10.7540/j.ynu.20160060.
- [9] 邢婷. 基于 WRF 模式和 SVM 方法的杨梅山风电场短期风电功率预报技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. (XING T. The research on the wind power prediction on Yangmei Mountain wind farm based on the WRF weather forecast model and SVM statistical regression approach [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014. (in Chinese))
- [10] 罗梦森, 何浪, 彭华青. 基于 WRF 模式的江苏沿海风能资源评估[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 486-491. (LUO M S, HE L, PENG H Q. Assessment Jiangsu sea wind resources by WRF Model [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 486-491. (in Chinese) DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2011.03.089.

- [11] 汪明军, 罗坤, 倪智振. 基于 WRF 模式的长三角地区风资源评估[J]. 能源工程, 2016(5): 29-33. (WANG M J, LUO K, NI Z Z. Wind resource assessment for the Yangtze River Delta region based on WRF[J]. Energy Engineering, 2016(5): 29-33. (in Chinese)) DOI: 10.16189/j.cnki.nyge.2016.05.005.
- [12] 陈楠, 杨苹, 邹澍, 等. 基于 WRF 模式的广东海上风资源评估[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 1-10. (CHEN N, YANG P, ZOU S, et al. Offshore wind resource assessment based on WRF Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.7643/j.issn.1672-9242.2013.05.001.
- [13] AYOTTE K W, DAVY R J, COPPIN P A. A simple temporal and spatial analysis of flow in complex terrain in the context of wind energy modelling[J]. Boundary Layer Meteorology, 2001, 98(2): 275-295. DOI: 10.1023/A:1026583021740.
- [14] SCHWARTZ M N, HEIMILLER D, HAYMES S, et al. Assessment of offshore wind energy resources for the United States[J]. Leading Edge, 2010, 21(4): 338-348. DOI: 10.2172/983415.
- [15] 张一民, 沈才元, 徐继先, 等. 江苏省风能简便计算方法的研究[J]. 气象科学, 1997, 17(3): 268-273. (ZHANG Y M, SHEN C Y, XU J X, et al. A study on convenient scheme of wind energy computation in Jiangsu[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1997, 17(3): 268-273. (in Chinese))
- [16] 张先军, 姚辉勇. 南水北调东线南四湖人工湿地建设与规划[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 21-24. (ZHANG X J, YAO H Y. Wetland construction and planning of Nansi Lake of the Eastern Route Project of the South to North Water Transfer[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 21-24. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2010.03021.
- [17] 王文杰, 吴学文, 方国华, 等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 422-426. (WANG W J, WU X W, FANG G H, et al. Optimal water operation in Jiangsu section of the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 422-426. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.03.006.
- [18] 武周虎, 罗辉, 刘长余, 等. 南水北调东线南四湖出、入湖泵站开启时间差分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 77-91. (WU Z H, LUO H, LIU C Y. Start up time difference of pumping station of Nansi Lake in the South to North Water Transfer[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 77-91. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.01.024.
- [19] 赵世新, 张晨, 高学平, 等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 923-931. (ZHAO S X, ZHANG C, GAO X P, et al. The impact of the operation of Eastern Route Project of the South to North Water Diversion Project on water quality in Lake Nansi[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 923-931. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2012.0616.
- [20] 高峰, 岳永起, 赵培青, 等. 南水北调二级坝泵站水泵调速必要性研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(6): 104-106. (GAO F, YUE Y Q, ZHAO P Q. Study on the necessity of water pump speed regulation in the Erji pumping station of South to North Water Transfer Project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(6): 104-106. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2005.06.037.
- [21] 仇宝云, 袁寿其, 冯旭松, 等. 南水北调东线工程梯级泵站的几个问题[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 69-73. (QIU B Y, YUAN S Q, FENG X S, et al. Several problems about step pump stations in Eastern Route South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2003.02.018.
- [22] SKAMARAOCK W C, KLEMP J B, DU DHIA J, et al. A description of the advanced research WRF version[Z]. NCAR Technical Notes, 2008.
- [23] KHVOROSTYANOV D V, MENU T L, DUPONT J C, et al. The role of WRF land surface schemes on weather simulations in Paris area[A]. Proceedings of ISARS 2010 conference[C], 2010.
- [24] 张华, 孙科, 田玲, 等. 应用 WRF 模型模拟分析风力发电场风速[J]. 天津大学学报, 2012, 45(12): 1116-1120. (ZHANG H, SUN K, TIAN L, et al. Wind speed simulation of wind farm using WRF Model[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(12): 1116-1120. (in Chinese))
- [25] 李正泉, 宋丽莉, 马浩, 等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810. (LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Review of Methodologies for Offshore Wind Resource Observation and Assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1007-8166.2016.08.0800.
- [26] 封宇, 何焱, 朱启昊, 等. 近海及海上风资源时空特性研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(5): 522-529. (FENG Y, HE Y, ZHU Q H, et al. Temporal and spatial characteristics of offshore wind resources[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Technol), 2016, 56(5): 522-529. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.25.011.
- [27] 范飞, 梁丙臣, 齐静静. 黄河口三角洲波浪能和风能资源评估[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1363-1368. (FAN F, LIANG B C, QI J J. Assessment of wave energy and wind energy resources of Yellow River Delta[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2014, 35(8): 1363-1368. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2014.08.008.
- [28] 杨艳娟, 李明财, 任雨, 等. 天津近海风能资源的高分辨率数值模拟与评估[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1999-2004. (YANG Y J, LIM C, REN Y, et al. High resolution numerical simulation and assessment of the offshore wind energy resource in Tianjin[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1999-2004. (in Chinese))
- [29] 李冲, 于伟艳. 不同季节乌鲁木齐风能资源潜能评估[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 112-117. (LI C, YU W Y. Wind energy resource potential evaluation in different seasons for Urumqi[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(1): 112-117. (in Chinese)) DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.2015.01.023.