

使用 WRF-Fitch 对湖区风电场风力发电机尾流效应特征的数值模拟

王姝^{1,2} 刘树华^{2,†} 陈建洲³ 胡菊¹ 冯双磊¹ 马玉龙⁴ 缪育聪⁵

1. 中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192; 2. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 3. 中国民用航空局空中交通管理局航空气象中心, 北京 100122; 4. Department of Civil & Environmental Engineering, Washington State University, WA 642910; 5. 中国气象科学研究院, 北京 100081; † 通信作者, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

摘要 为解析不同稳定度情况下多种风机排布配置对尾流效应的强度、作用范围和风能利用效率的影响, 以鄱阳湖地区风电场为例, 使用中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecast) 和 Fitch 尾流模型进行模拟实验。结果表明: 在不同大气层结稳定度情况下, 单个风机尾流效应的影响范围能够达到下游 4~10 km 处, 对下风向风速的削弱强度可达 $-0.2\sim-1.2$ m/s。在风的来向上风机数量越多, 下游风速减弱越大; 正方形紧密排布风电场的尾流效应对风速的削弱效果最明显, 而空心菱形稀疏排布风电场的尾流区风速更容易恢复。由于不稳定的大气层结内热力和动力湍流交换强度更强, 更有利于尾流区内中动量的交换和下传, 因此稳定大气层结的尾流效应影响范围比不稳定大气层结更广。风机所在位置垂直剖面上的湍流动能呈现中心最强、向外耗散的特征, QKE (湍流动能的两倍) 随着高度增加而先增至最大值 (>19 m²/s²), 再减至 0 左右, 之后趋于稳定, 最大值出现在约离地 90 m 的高度, 估计尾流效应的垂直影响范围可达约离地 1.1 km 的高度。

关键词 风机尾流效应; WRF; Fitch; 大气不稳定性; 风速削弱; 湍流动能

中图分类号 P404

Case Studies: Simulation on Characteristics of Wind Turbine Wake Effect in a Lake-Side Wind Farm with WRF-Fitch

WANG Shu^{1,2}, LIU Shuhua^{2,†}, CHEN Jianzhou³, HU Ju¹, FENG Shuanglei¹, MA Yulong⁴, MIAO Yucong⁵

1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 3. Aviation Meteorological Center, Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100122; 4. Department of Civil & Environmental Engineering, Washington State University, WA 642910; 5. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081; † Corresponding author, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

Abstract Meso-scale meteorological numerical model WRF (Weather Research and Forecast) and the Fitch Wake model are adopted to reveal the intension and patch range of TWE (turbine wake effect) in various atmospheric stability, as well as the impact of different turbine configuration on utilization efficiency of wind energy. Case studies are conducted over Poyang Lake region. The results are as followed. Horizontally, the patch range of a single wind turbine's TWE can reach 4 to 10 km downward, with a reduction in wind speed ranging from -0.2 to -1.2 m/s under different atmospheric instability. The reduction in wind speed is more severe with more turbines on the stream track. Among the five cases with different turbine location configuration, the wind speed reducing effect in square case (intensively distributed) is much more apparent than others, while the wind speed in TWE patch tends to recover quickly in hollow diamond case (sparsely distributed). Compared with unstable atmospheric stratification, the TWE under stable atmospheric stratification has a longer patch range,

国家电网公司科技项目资助

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-12-25; 网络出版日期: 2018-01-15

because the turbulent exchange of momentum is intenser in unstable stratification than that in stable stratification. Vertically, the QKE (twice of turbulent kinetic energy) at the wind turbine spot peaks in the core. QKE increases to its maximum value of $19 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and then decreases to around zero. The maximum QKE appears at the level of about 90 m above ground level, while the vertical impact of TWE can be traced to a height of 1.1 km.

Key words wind turbine effect; WRF; Fitch; atmospheric instability; decrease on wind speed; turbine kinetic energy

世界经济的迅猛发展带来能源需求的成倍增长,使用石油、煤炭等化石燃料导致的环境、生态问题日趋严重,已经引起国际社会的普遍关注。近几十年来,非可再生能源的逐渐枯竭及其带来的全球变暖压力,使得风能、太阳能等可再生清洁能源受到越来越多的重视。世界范围内大面积风电场的开发,使得风能资源成为世界上发展速度最快的可再生能源。中国在 2013 年成为世界上可再生资源开发量最大的国家^[1],截至 2015 年年底,全球风电新增装机容量增长 63013 MW,增长率为 22%,中国新增 30500 MW,5 年间年均增长 34.6%。

在风电场尺度,当近地层风吹过风力发电机(简称风机)时,通过风机的扇叶转动,将部分风动能转化为机械能,表现为风速的降低,即处于下风向风电机组的风速小于上风向风电机组,同时,风机的扇叶转动在出流方向产生一部分湍流动能。在风机运行的风电场中,风经过旋转的风轮后会发生方向与速度等特性的变化,这种对初始空气来流的影响称为风机的尾流效应。观测表明,上风方向的风机扰动产生的尾流将会减弱下游风速,并引起下游大气湍流动能的增大,导致下风方向风机功率流失和机械劳损增加^[2]。反过来,动辄几百架风机的大体量风电场产生的尾流效应对近地面、边界层特性以及局地天气乃至气候也可能产生影响。因此,有必要对风机尾流效应对风机的运行效率影响的范围和强度,以及对周边大气环境的影响进行观测和模拟研究。

风机对大气边界层风场的直接影响包括 3 个方面: 1) 减弱风速; 2) 在风机尾流区内产生扇叶尺度的湍流; 3) 风机尾流效应产生的湍流有利于风切变生成^[3]。Haan 等^[4]基于欧洲中心的初始场资料和三维同化资料,将 WRF (Weather Research and Forecast) 与 Fitch 尾流模型相结合,配合边界层参数化方案 Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino scheme (MYNN),对英国和丹麦两个海边风电场进行最内层 1 km 分辨率的边界层方案对比和尾流模拟,发现模拟的风

速、风向和风能功率特性与观测值相符,尾流效应能够在下风向几公里的范围内削弱近 15% (3 m/s) 的风速。使用 Fitch 尾流模型对挪威一个风电场为期数月的模拟结果显示,尾流效应损失的风速可达 1 m/s 左右^[5]。

另外,大规模风电场的兴建也带来一些间接效果。风机组吸收空气动能,改变了陆面利用类型,增大了地表粗糙度,使得近地面拖曳系数和湍流交换系数增大,加强了近地面通量和水热输送,进而对本区域和下游大气环境造成影响^[6]。国外对风电场尾流效应产生的气候影响研究较多,国内对这方面的研究较少。Zhou 等^[7]使用 MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星资料,对德克萨斯州中西部大型风电场的地表温度变化进行反演和分析,结果表明,近地层变暖趋势与风机数量的增加、风速和风向分布的季节变化以及风机扰动导致的近地面边界层大气层结变化有明显的相关关系,近地层空气温度的改变可以达到 $\pm 1 \sim \pm 2 \text{ K}$ 。另有研究表明,在稳定边界层条件下,尾流效应可导致近地层气温升高 0.5 K; 在不稳定条件下,近地层可能有弱于 0.25 K 的降温,观测到的降温则更明显^[8]。利用区域气候模式对美国大平原虚拟风电场尾流效应的模拟结果表明,风机轮毂高度处风速减小,近地面和轮毂之上风速增加,风机转动使得近地面变暖变干^[9]。

环鄱阳湖地区是我国最主要的湖区风机装机地区之一,研究该地区的风机尾流效应对继续开发和合理利用风电资源有重要意义。鄱阳湖是中国第一大淡水湖,位于江西省北部,地理坐标为 $115.82^\circ \sim 116.77^\circ \text{E}$, $28.40^\circ \sim 29.77^\circ \text{N}$ 。最大丰水期面积为 5100 km^2 ,是一个过水性、吞吐型、季节性的湖泊^[10]。鄱阳湖地区风能资源较丰富,其中风能资源可利用区约占鄱阳湖区域面积的 32.5%,北部狭长湖体滩涂和沿岸是鄱阳湖地区风能资源最丰富的区域。由于湖区周边地形复杂,导致大气边界层结构和风场复杂,因此,对鄱阳湖地区大气边界层特征

进行数值模拟研究非常必要^[11]。据现有资料初步估算, 鄱阳湖平原风能资源总量约为 1270×10^4 kW, 技术可开发量约为 210×10^4 kW, 技术可开发区域面积约为 1390 km^2 , 山地低层风速和风功率密度较大, 随高度增加略有增大, 风切变指数较小^[12], 是内陆湖区风场的优秀选址地。

1 模式介绍和数值试验设计

1.1 WRF 模式介绍和设置

本文中模拟风机尾流效应使用的数值模式是中尺度气象模式 WRF V3.7^[13-14]和其中嵌套的 Fitch 尾流模型。WRF 重点解决水平分辨率为 $1 \sim 10 \text{ km}$ 的 60 h 以内有限区域的天气预报和模拟研究。WRF 为大气科学研究的理想实验和实际实验提供了一个公用的模式框架, 具有可移植性、易维护性、可扩充等诸多优点。WRF 模式在天气预报、大气化学、区域气候等方面得到广泛的应用, 使新的科研成果更便捷地运用于业务预报模式。

为解析边界层的日变化, 设置总积分时间为 36 h, 以前 7 h 作为模式的起转时间 (spin up)。模拟结果输出频率为每小时一次。初始场选用 NCEP FNL 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 6 h 的再分析资料。地表类型资料为 MODIS 30 s 的地表类型资料。由于研究区域内冬季的风能资源较丰富, 所以本文对风机排布配置的实验以 2011 年 1 月 15—16 日的冬季为个例进行模拟。

考虑到风机的空间尺度较小, 本研究设置 4 层单向嵌套的网格, 各层网格区域分别简称为 D01, D02, D03 和 D04 (图 1, 网格区域中心 (黑点标记) 地理坐标为 116.2°E , 29.6°N), 对应的水平分辨率分别为 15 km, 5 km, 1 km 和 200 m, 网格数分别为 105×105 , 109×106 , 96×151 和 101×101 个。D03 区域内地形高度及鄱阳湖所在位置如图 2 所示。

为满足模式积分的稳定性条件, 将时间分辨率跟随空间分辨率相应地提高。为了更详尽地得到风机高度的风场信息, 实验中设置垂直的 43 个 σ 层, 并且在重点关注的风机活动范围内有所加密, 约 150 m 以下有 13 层, 这 13 层离地高度分别为 3.89, 11.66, 19.45, 27.22, 35.02, 42.81, 50.61, 58.41, 66.22, 74.02, 81.82, 89.64 和 13.10 m。

$$\sigma = \frac{P - P_{\text{top}}}{P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}}}, \quad (1)$$

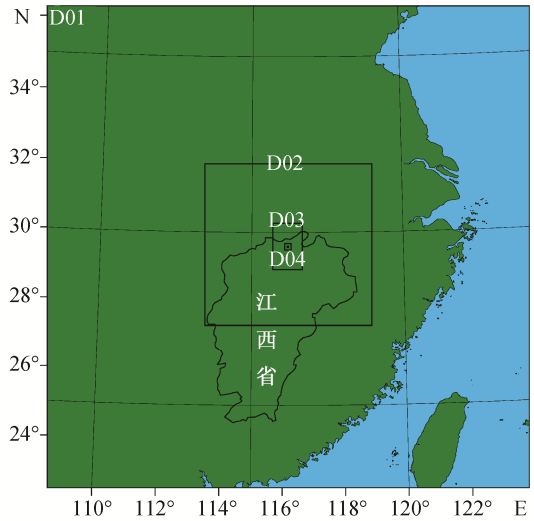


图 1 WRF 模式 4 层嵌套设置的地理位置
Fig. 1 Geographical configuration of four nested domain in WRF

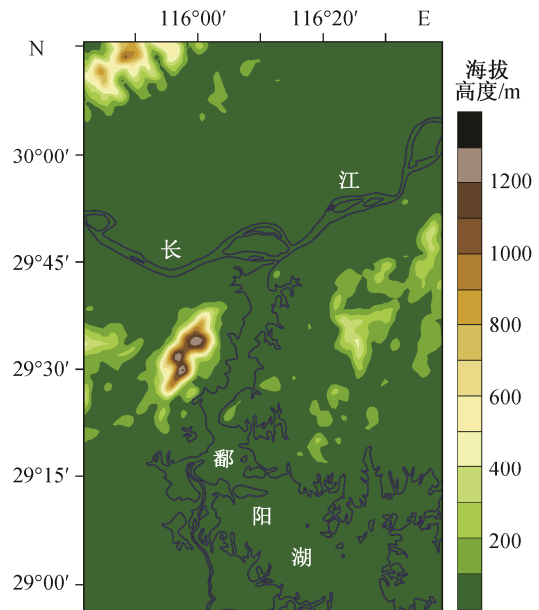


图 2 D03 区域内地形及水体边界
Fig. 2 Terrain height and watershed boundary in D03

P 为气压 (hPa), P_{top} 和 P_{bottom} 分别为模式顶和地表的气压 (hPa), 本研究中模式顶的气压设置为 100 hPa。本研究选用的物理参数化方案还有 RRTMG 辐射传输方案^[15]、WSM5 微物理方案^[16]、Noah 陆面方案^[17]以及含有湍流动能输出项以配合 Fitch 尾流模型使用的边界层方案 MYNN 方案^[18]。

1.2 Fitch 尾流模型

从 2012 年开始, Fitch 等^[19-20]将一个风场参数

化模块——Fitch 尾流模型(Fitch Wake Model)添加到 WRF 中。将该尾流模型与 MYNN 方案结合,可实现在中尺度天气模型中在线耦合模拟风电场风场特征与尾流效应。实质上, Fitch 模型是将风机涡轮的拖曳系数引入 WRF 中的风速和湍流动能的计算中,将风场解析为大气动量的汇和湍流动能产生的源^[21]。在 WRF 中,借助趋势量(tendency)的传递, Fitch 模型对风速、动量和湍流动能等要素进行数据流入和流出的双向计算。

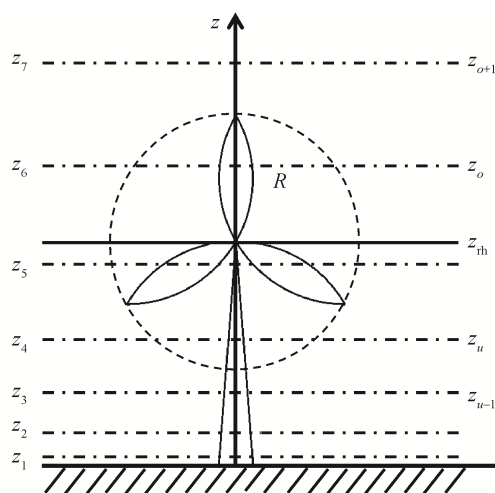
在流经风电场之后,大尺度背景风场伴随的大气动能流向两处:1) 动能转化成电能;2) 动能转化成湍流动能。与传统的使用风机功率系数加上一个估计损耗因子的计算方法不同, Fitch 模型基于风机涡轮推力系数计算风机从大气中提取的动能(kinetic energy, KE)及风速的函数湍流动能 TKE (turbulence kinetic energy)。因此, Fitch 适用的边界层参数化是能够产生湍流动能项输出的 MYNN 方案。由于在高于 5 倍扇叶直径(70 m 左右)的空间分辨率下,必须再考虑复杂的扇叶旋转,因此,为了简化,Porte-Agel 等^[22]建议 Fitch 模型的适用分辨率为低于 5 倍扇叶直径。

Fitch 模型对置入一个或多个风机的每个模式格点的能量进行计算,包括包含风机的逐个垂直层、逐个格点上的动能变化量和风速变化量。在扇叶横截面上的模式层数分布如图 3 所示。模型中对动能变化量的描述如式(2)所示,在格点 (i, j, k) 内动能的变化率等于该格点内由于风机而损失的动能:

$$\frac{\partial |V|_{ijk}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N^{ij} C_T (|V|_{ijk}) |V|_{ijk}^2 A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}, \quad (2)$$

其中, $|V|_{ijk}$ 是 (i, j, k) 格点内的标量风速(m/s); t 表示时间; N^{ij} 是第 (i, j) 格点内置入的风机功率总和(W),等于风机个数乘以额定功率(W); C_T 是推力系数(thrust coefficient),它与空气动力学效率不直接相关,而是间接地表征风力机从原风场中吸收并转化的所有能量占原风场风能的比例,推力系数越大,风力机对原流场风能的削减越强烈,在高雷诺数状态下, C_T 的取值依赖于功率曲线; A_{ijk} 是 (i, j, k) 格点内扇叶扫过的面积(m²); $(z_{k+1} - z_k)$ 是模式中垂直第 k 层的厚度(m)。

在单位质量内,风机从大气中提取并将其转化为电能的能量由下式给出:



左侧的 z 为大气模式中固有的垂直层; 右侧各层与左侧对应,但 z_{rh} 为风机轮毂高度, z_o, z_{o+1}, z_u 和 z_{u-1} 表示受风机扇叶旋转影响的垂直层范围,其中 z_{o+1} 和 z_{u-1} 分别表示受影响的上界和下界; R 表示扇叶半径

图 3 WRF-Fitch 模型中风机的典型垂直层数配置示意图^[22]
Fig. 3 Typical integration of vertical layers which characterizes the wind turbine in WRF-Fitch^[22]

$$\frac{\partial P_{ijk}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N^{ij} C_P (|V|_{ijk}) (|V|_{ijk}^3) A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}, \quad (3)$$

其中, P_{ijk} 为 (i, j, k) 格点上转化的电能(J); C_P 为功率系数(power coefficient),代表被转化成有用电能的大气能量占原风场风能的比例。

风机从大气中提取但却转化为湍流动能的另一部分能量由下式给出:

$$\frac{\partial TKE_{ijk}}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N^{ij} C_{TKE} (|V|_{ijk}) (|V|_{ijk}^3) A_{ijk}}{(z_{k+1} - z_k)}, \quad (4)$$

其中, TKE_{ijk} 为 (i, j, k) 格点上转化的湍流动能(m²/s²); C_{TKE} 为湍流动能系数(coefficient of turbulent kinetic energy),代表被转化成湍流动能的大气能量占原风场风能的比例。3 个系数(C_T, C_P 和 C_{TKE})之间的关系为

$$C_P = C_T - C_{TKE} \quad (5)$$

在 WRF 的最新版本 WRF V3.7 中,风机所在位置已设定为独立于网格区域。在实际使用 Fitch 模块时,需要注意 WRF 模式的垂直和水平分辨率、时间步长设置以及风机的间距。对于更精细的网格 D04,为了应用较稀疏网格的结果作为归一化

的初边值条件并提高模式运行效率, 本研究使用 WRF 中的 ndown 模块进行降尺度, 驱动 D04 内的模式运转。ndown 的技术流程如图 4 所示, 左列表示原来的 WRF 正常运行流程, 由 WPS 模块(WRF preprocessing system)对初始场数据进行预处理, 考虑地形条件插值, 得到格点化分析场(met_em*), 初值条件(wrfinput*)和边界条件(wrfbdy*文件), 输入到 WRF 模块, 通过 WRF 差分积分求解计算得到最终模拟结果(wrfout*)。ndown 技术流程与 WRF 通常运行方式有所不同, 比如需要对 D02 进行精细化模拟, 那么, ndown 模块以 WRF 正常模拟出的 D01 最终数据(wrfout_d01*)作为格点化分析场(包含边界条件), 并以 D02 的初值条件(wrfinput_d01)作为输入, 运行得到实际模拟 D02 需要的各种初值, 再用 WRF 模块进行模拟。图 4 中有一些更名(rename)过程, 是为了方便 ndown 程序运行过程中不同网格区域相对关系的切换。

1.3 风机排布实验设置

为了控制变量, 保持初值条件和边界条件的一

致性, 使用 D01~D03 的模式输出场作为初值条件和边界条件, 借助 ndown 技术, 驱动设置风机排布的最内层 D04 内的 Fitch 尾流模型进行模拟。为了简化模拟, 本文进行几种理想的风机设置, 不同风机排布的方式如图 5 所示。该区主导风向为西北偏北风, 据此设置单个风机、纬向线形、正方形、三角形和空心菱形 5 个理想的简化排布实验, 代表迎风的不同风机排布情况, 其中空心菱形方式的风机排布较为稀疏。风机设置在较平坦地区, 以减少地形起伏对尾流效应的影响。除单个风机实验外, 其余 4 个实验均安排 16 架风机, 以便后续比较风能的耗散。纬向线形、正方形和三角形风机布阵中, 相邻风机的经、纬向间距都均匀设置为约 1.11 km; 空心菱形风机布阵中, 在“空心”处相邻风机的经、纬向间距设置为 2.22 km。多风机布阵的机阵中心位置基本上一致。风机形状参数和功率信息的预设输入为轮毂高度(hub height) 75 m, 扇叶直径 85 m, 标准推力系数 0.13, 风机额定功率 2 MW, 还有一系列实测的风速、推力系数和风机产能功率数据作

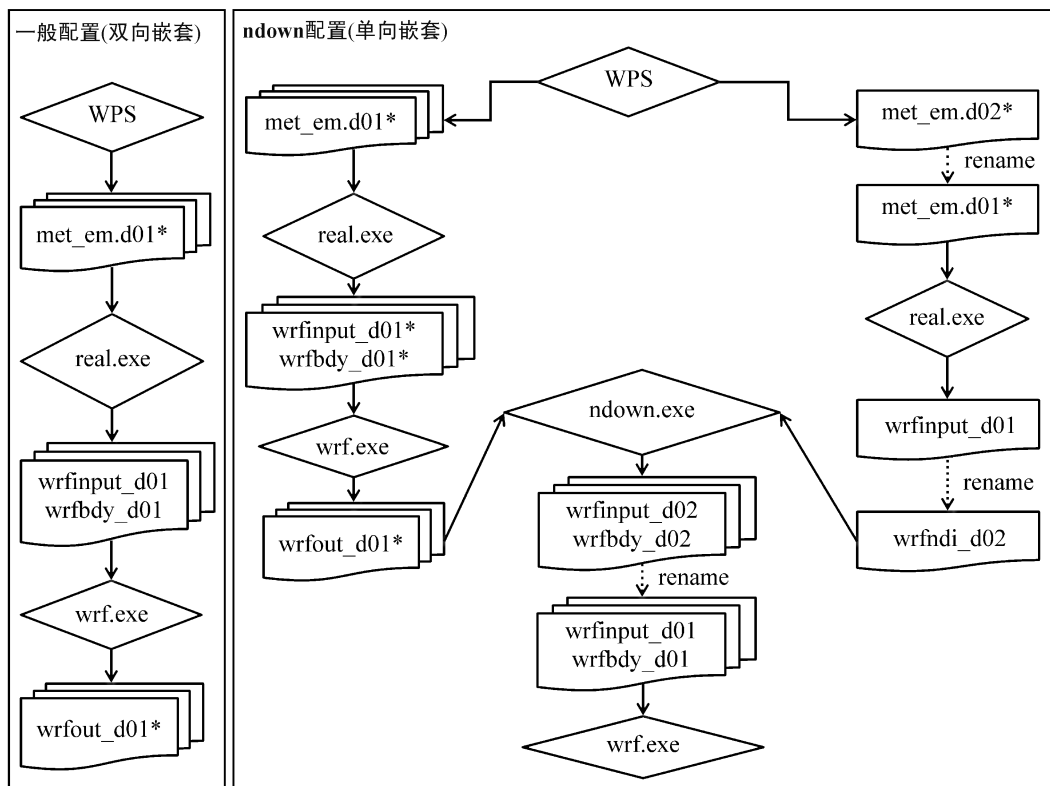


图 4 WRF 中降尺度 ndown 技术流程^①

Fig. 4 Technical flow of ndown, the downscaling technique in WRF^①

① http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.7

为风机功率曲线参数估计的参考资料。

2 结果与讨论

Fitch 模型的代码设置为向 WRF 反馈风速增量和湍流动能增量, 因此, 为揭示研究区域内风机的尾流效应, 一般考察水平风速、风功率密度和湍流动能这几个物理量及其变化量的时空分布和对不同排布方式的敏感性。风功率密度(wind power density, WPD)与风速的三次方成正比, 定义为

$$WPD = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho WS_i^3, \quad (6)$$

其中, WPD 的单位为 W , ρ 为空气密度(kg/m^3), WS_i 为第 i 个格点上的水平风速。一般来说, 风功率密度的变化幅度即是风速变化在风机功率上表现出来的放大效果。

在观测中, 湍动能常用来衡量尾流强度^[23]。湍动能 TKE 是由水平风速 u 和 v 分量的自相关系数 σ^2 计算得到的, 其计算公式为

$$TKE = \frac{\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}}{WS}, \quad (7)$$

其中, WS 表示在观测或模拟高度的水平平均风速^[24]。MYNN 边界层方案中输出的湍流动能项是 QKE, 定义为 TKE 的两倍。

2.1 风机排布方式对尾流效应的影响

首先分析单个风机与不同形状风机阵列产生的尾流效应的差异。图 6 给出有风机存在状况下轮毂高度处的风速差值场, 由分为 3 个时次(16:00, 20:00 和 01:00, 北京时)和 5 种风机阵列排布方式, 分别减去对应时次、对应格点上无风机自由流场同样高度处的风速得到。

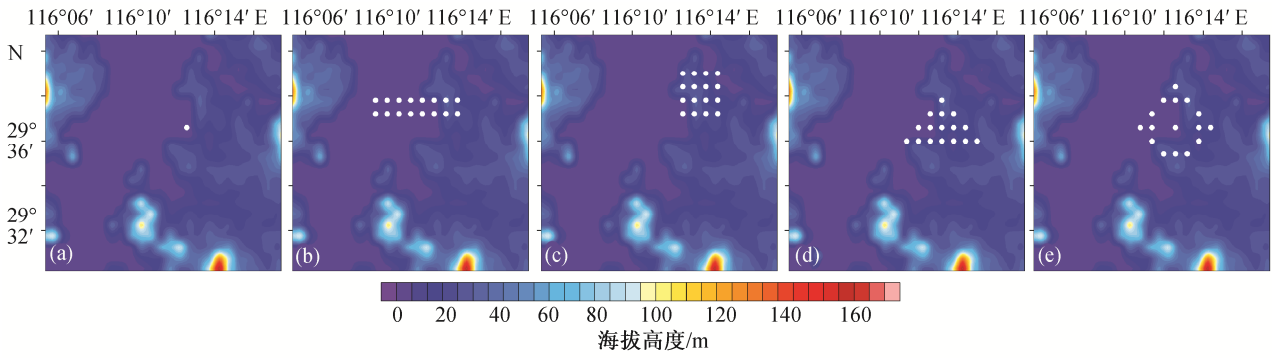
本研究中, 这种功率和尺寸等级的单个风机对下风方向的风速削弱随着距离增加而逐渐衰减。就风速减弱强度来看, 数量级可达 $-0.2 \sim -1.2$ m/s, 与前人研究的 Fitch 模型模拟的尾流对风速的减弱范围相吻合^[9]。就影响范围来看, 根据经纬度范围估计, 单个风机的尾流区(风速减弱区)长度可达 4~10 km。复杂风机阵列情况下的总体尾流效应是多个单机下风向尾流的复杂叠加, 包括不同风机单纯尾流的叠加效应以及上游风机影响下游风机之后下游风机尾流改变的影响。从不同排布风机阵列的下游

风速减弱情况看, 在风的来向上风机数量越多, 下游风速减弱越大。

本次模拟的个例, 主导风向为东北风。由于为每台风机设置的风机推力系数相同, 所以单个风机对风速的削弱作用是一致的。对比同一时刻不同风机排布阵列实验可以发现: 图 6(b)中纬向线形风机排布只有两行, 迎风面的宽度比较大, 因此风速明显减小的范围的形状是东西向较宽, 下风向风机仅受上风向一排风机的尾流影响; 图 6(c)和(d)中正方形和三角形风机排布较密集, 下游风机受到的上游风机尾流效应更大, 多个风机对风速的减弱有叠加效应; 图 6(e)是空心菱形的风机排布阵列, 周围风机与中心风机间距稍大, 空隙处风速有所恢复。

为定量地比较不同风机排布方式下尾流效应对风速的削弱作用, 本文计算不同风机排布类型在 D04 内轮毂高度(75 m)层上各个格点的风速与无风机对照实验组风场相应位置风速的差值, 并进行累加, 以此代表整体的风速影响效果, 即风速差值场的累加值, 如表 1 所示。对于单个风机, 风速差为正值代表尾流效应促进湍流运动, 造成动量下传。从数值上看, 不同风机排布情况下的风速差累加值呈现不同的特征。

定义归一化风速变化指数 NWSVI (normalized wind speed variance index): 风机扰动的某层的风速与无风机的风速之差的平均值除以平均风速得到一个序列, 然后对这个序列进行归一化得到的数值。NWSVI 代表风速的改变量占该处风速的比例, 其值为正说明风速增大, 反之, 风速有所减小。不同时刻、不同风机排布情况下, D04 内轮毂高度(75 m)层的 NWSVI 如图 7 所示。在单个风机的情况下, 风机轮毂高度处的风速有所增大, 21:00 和 22:00 尤其明显, 这是因为单个风机的尾流效应促进的湍流交换使得高层动量加速下传。这种效应在同时刻的多个风机情况下也有体现。在多个风机情况下, 尾流效应导致的风速减弱非常明显。午后风速减弱幅度大于夜晚。从 16 台风机不同排布方式对风速减弱的平均值(表 1)看, 对风速减弱的效果从强到弱依次是正方形、纬向线形、空心菱形和三角形, 即风机排列紧密的正方形风场受尾流效应的影响最明显。在空心菱形风机排布的情况下, 风机的间隙较大, 对风速的减弱效应时间序列较为平稳, 说明较大的风机间距有助于尾流区叠加风速的恢复。



(a) 单个风机; (b) 纬向线形机阵; (c) 正方形机阵; (d) 三角形机阵; (e) 空心菱形机阵。(b)~(e)均包含 16 个风机

图 5 D04 区域内风机排布实验的风机位置设计

Fig. 5 Assignment of experimental wind turbine implementation in D04

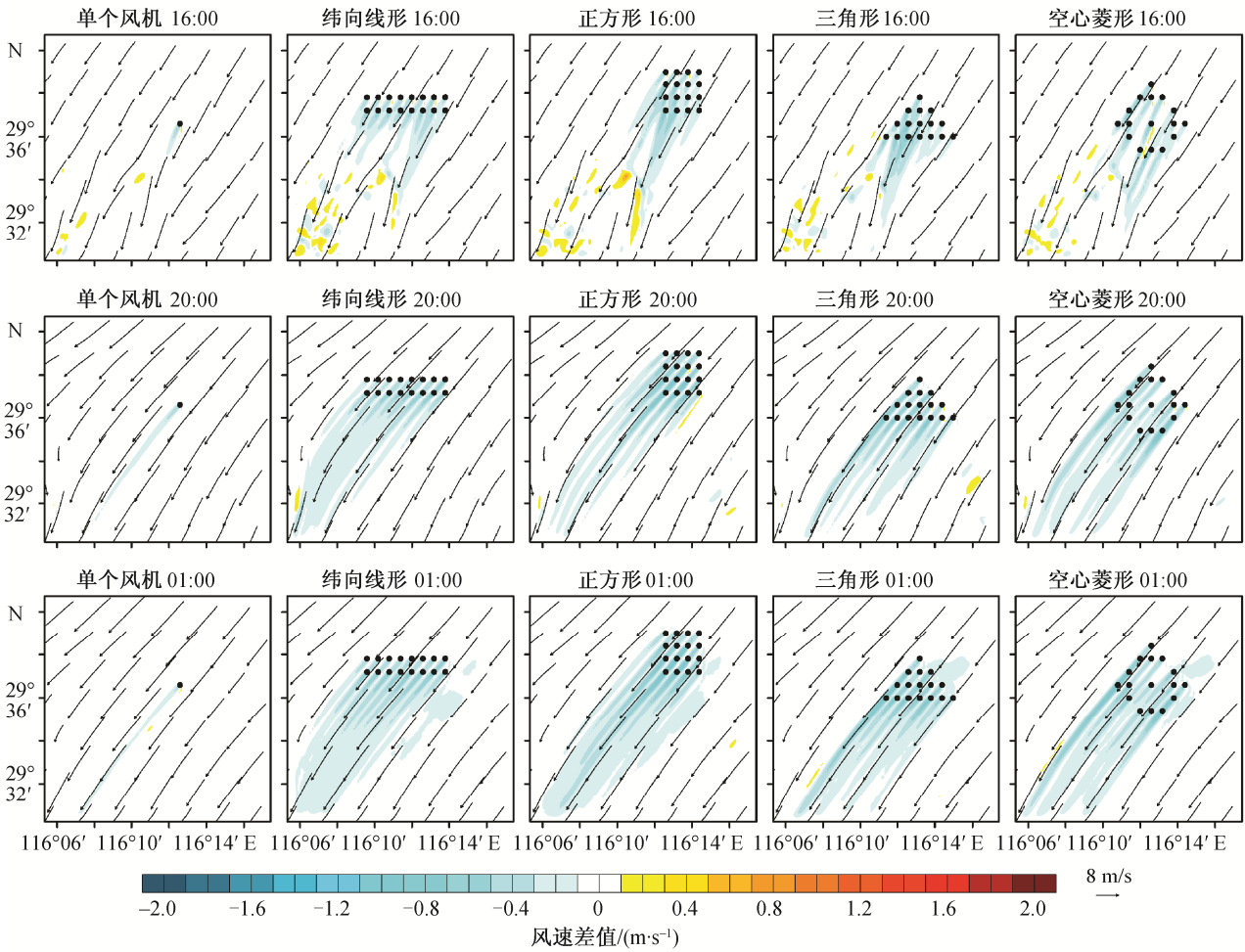


图 6 5 种风机排布设置下的轮毂高度(75 m)处水平风速与无风机情况下风速的差值场
Fig. 6 Difference between horizontal wind speed of five wind turbine implementation cases and that of no-turbine case at 75 m hub height

2.2 大气稳定度对尾流效应的影响

图 6 所示的 5 种风机布阵产生的尾流效应, 其模拟时间分别选取背景风场比较平稳的一天中的下

午 16:00、晚上 20:00 和半夜 01:00, 3 个时次代表 3 种不同的稳定度。无论单个风机还是风机阵列, 从风机下游风速的恢复(风速差从负值变成正值)情况

表 1 不同时刻、不同风机排布情况下 D04 内风速差的累加(m/s)

Table 1 Accumulation of wind speed difference for each time and each turbine configuration in D04 (m/s)

| 时刻 | 单个风机 | 纬向线形 | 正方形 | 三角形 | 空心菱形 |
|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 15:00 | -15.21 | -104.92 | -94.03 | -131.42 | -136.11 |
| 16:00 | -3.61 | -181.50 | -190.60 | -196.37 | -168.23 |
| 17:00 | -38.59 | -381.97 | -477.09 | -415.27 | -374.35 |
| 18:00 | 39.94 | -566.80 | -584.64 | -399.99 | -415.56 |
| 19:00 | -18.77 | -678.59 | -704.23 | -514.67 | -540.75 |
| 20:00 | -61.96 | -627.80 | -671.51 | -606.47 | -536.45 |
| 21:00 | 143.20 | -591.81 | -580.54 | -478.59 | -540.48 |
| 22:00 | 73.35 | -623.34 | -676.82 | -553.43 | -595.42 |
| 23:00 | 11.06 | -489.47 | -541.30 | -430.48 | -530.09 |
| 00:00 | 1.50 | -426.45 | -457.04 | -433.99 | -472.75 |
| 01:00 | -24.66 | -452.47 | -453.78 | -407.07 | -472.28 |
| 02:00 | -81.69 | -524.61 | -536.22 | -479.47 | -520.22 |
| 平均值 | 3.61 | -504.07 | -533.97 | -446.89 | -469.69 |

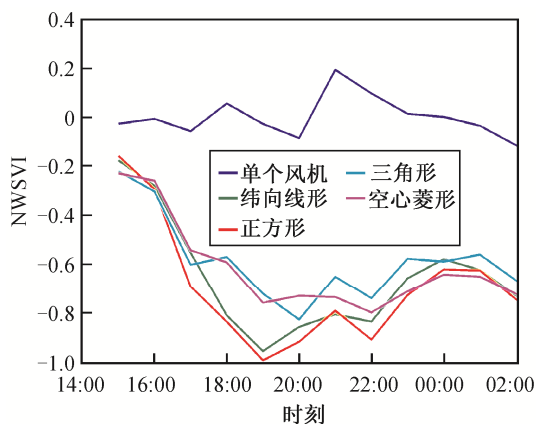


图 7 不同时刻、不同排布情况下 D04 内轮毂高度(75 m)层归一化风速变化指数

Fig. 7 NWSVI at hub height (75 m) over D04 for each time and each turbine implementation type

初步发现, 16:00 的模拟实验中风速恢复更快, 01:00 的模拟实验中尾流效应的持续影响延伸到下游的范围更广。风机尾流效应涉及动能转化和大气边界层内的湍流混合。风机尾流区内, 湍流动能明显增大,

然而, 近地层活跃的湍流交换会使各种物理量最终趋向平均分布, 那么, 可以猜想, 大气层结不稳定有利于尾流区风速的恢复。

为验证这一猜想, 下面探讨一天中不同时刻的大气边界层稳定度条件下, 风机扰动对风速和湍流动能影响的差异。借助基于 WRF 输出结果计算得到的通量理查孙数 Ri , 定量地表征不同时刻大气层结的稳定度。理查孙数可以定量地表示风切变和浮力分别对湍流动能产生的贡献, 其计算公式为

$$Ri = \frac{g}{\theta_1} \frac{(\theta_1 - \theta_2)(z_1 - z_2)}{(u_1 - u_2)^2}, \quad (8)$$

其中, g 是重力加速度(m/s^2), $u_1, u_2, \theta_1, \theta_2$ 分别是在 z_1, z_2 高度处的风速(m/s)和位温(K)。理查孙数的负值表征大气层结不稳定, 正值表征大气层结稳定, 零值附近表征大气层结中性^[25]。参考更详细的划分方案^[26], 使用 0.1, 0.25 等几个阈值, 将稳定度 Ri 划分为最不稳定到最稳定的 A~G 共 7 个等级。在轮毂高度对应的模式垂直层上, 计算本层 Ri , 结果如表 2 所示。

结合表 2 和图 6 可以发现, 在大气层结很不稳定的下午 16:00, 由于强烈的热力湍流交换作用, 风机尾流效应很快在下游被混合消散掉, 即在下游约 3 km 处风速就开始恢复(蓝色消失部分); 而在大气层结较稳定的 20:00 和 01:00, 尾流效应带来的风速削弱作用更强, 影响范围扩展到下游约 9 km 附近。值得注意的是, 对于明显处于不稳定边界层的 16:00 时次, 风机尾流的下风向又出现风速增大的情况(零星黄色部分), 可能原因是风机扰动增大了湍流动能强度, 在非常不稳定的边界层中更有利于动量的交换和下传, 使得下游的风速能尽快恢复。本次实验中的风机间距约是实际风电场风机间距的 2~4 倍, 因此实际情况下更密集风电场的风机之间尾流作用的影响可能会更明显。

2.3 尾流的垂直分布

作为自然环境中新加入的一个动量的汇和湍流动能的源, 一台轮毂高度加上扇叶半径共 90~120

表 2 图 6 中各个试验在中心格点轮毂高度上的稳定度(Ri)

Table 2 Ri over domain center grid at hub height for each cases in Fig. 6

| 时刻 | 单个风机 | 纬向线形 | 正方形 | 三角形 | 空心菱形 | 稳定度 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 16:00 | -5.291 | -6.064 | -5.210 | -5.543 | -4.990 | B (不稳定) |
| 20:00 | 0.139 | 0.168 | 0.200 | 0.145 | 0.139 | E (较稳定) |
| 01:00 | 0.097 | 0.125 | 0.169 | 0.103 | 0.097 | E (较稳定) |

m 的典型大型风电机组转动运行的时候,将对垂直结构上多大范围产生什么强度的影响,是一个值得研究的问题。我们选择单个风机和三角形排布风机与自由流场进行对比。为了尽可能地展示最大距离的尾流,横断剖面的方向选择与主导风向一致的东北-西南走向,如图 8 所示。横切线分别经过单个风机中心位置和三角形排布风电场的 3 个风机中心位置。

图 9 是从图 8 中红线处提取的湍流动能 QKE 的剖面截图。从图 9 可以看出,该个例中背景自由流场的 QKE 比较平均(0.5~1.5 m²/s²), 116.165°E 附近的 QKE“伪”高值区是受模式分块计算时的边界条件影响造成的(平面分布图略)。设置风机后,风机所在位置垂直剖面上的湍流动能强度呈现中心最强、向外耗散、垂直湍流强度明显增大的特征。

图 10 展示 QKE 的垂直分布。从模式最底层(约离地 4 m)向上, QKE 先增到最大值(>19 m²/s²),再减到 0 左右,之后趋于稳定。QKE 最大值出现在约离地 90 m 的高度,也就是比风机轮毂高度 75 m 稍高的高度。在离地 1.1 km 以上, QKE<1 m²/s²。若定义满足 QKE>1 m²/s² 条件的高度范围为尾流垂直影响区,估计尾流效应的垂直影响范围则可达 1.1 km 左右的高度。

3 结论

为了研究鄱阳湖北部风电场的尾流效应,本研究通过设置几个简单风机排布方式的实验,借助 WRF-Fitch 模型,对尾流强度和影响范围进行模式模拟和评估分析,结论如下。

- 1) 在不同大气层结稳定度情况下,单个风机尾

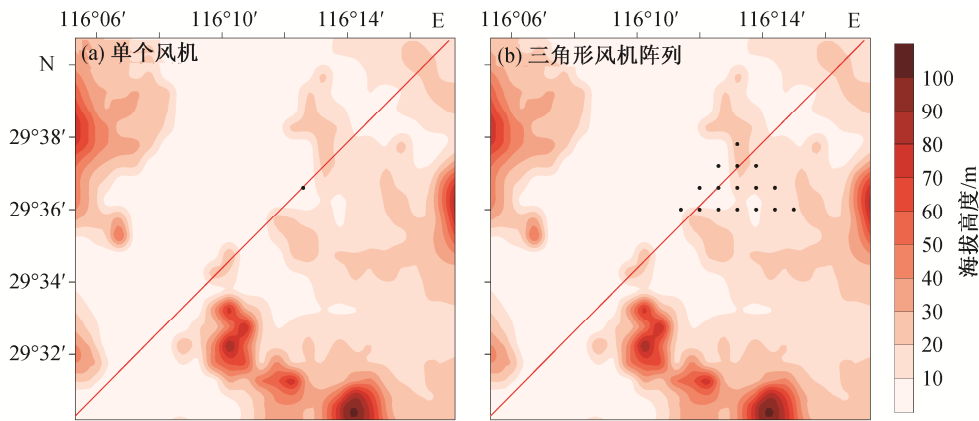


图 8 两个个例中湍流动能剖面图所在的位置

Fig. 8 Location of section extracted in the latter QKE section contour for two cases

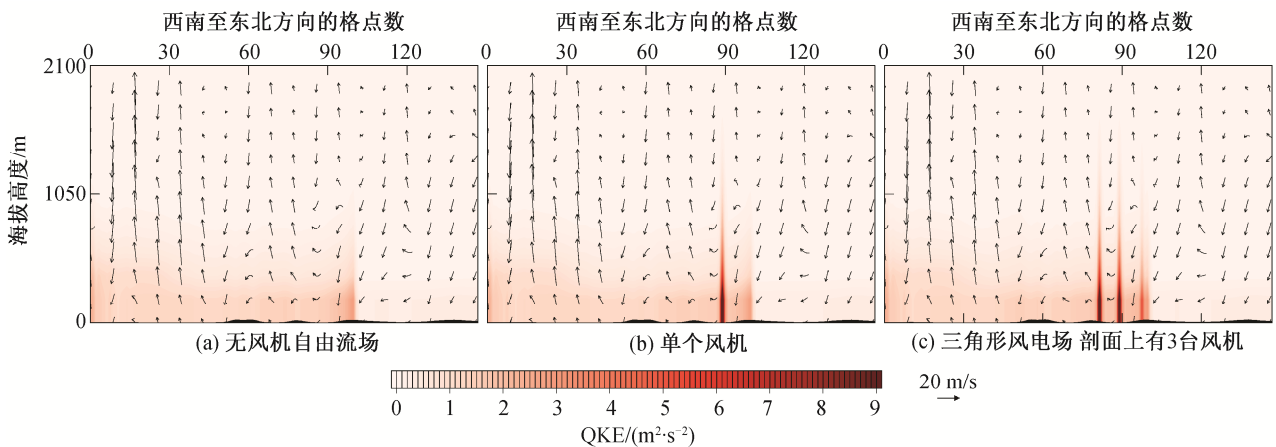


图 9 根据图 8 红线位置提取的主导风向下的湍流动能剖面

Fig. 9 Cross section of TKE extracted along the red line in Fig. 8 immersed in the prevailing wind

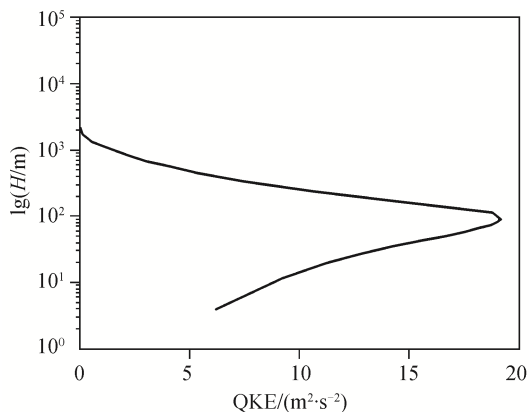


图 10 单个风机湍流动能的垂直分布
Fig. 10 Vertical distribution of QKE at the site of a single turbine

流效应的影响范围能够达到下游 4~10 km 处, 对下风向风速的削弱可达-0.2~-1.2 m/s 的强度。

2) 从不同风机布阵的下游风速减弱情况看, 在风来向上的风机数量越多, 下游风速减弱程度越大。正方形紧密排布风电场的尾流效应对风速的削弱效果最明显, 而空心菱形稀疏排布风电场的尾流区风速更容易恢复。

3) 无论单个风机还是风机阵列, 稳定大气层结的尾流效应影响范围比不稳定大气层结更广。这是因为不稳定的大气层结内热力和动力湍流交换作用更强, 更有利于尾流区内动量的交换和下传, 表现为被减弱的风速能够较快地恢复。

4) 风机所在位置垂直剖面上的湍流动能呈现中心最强、向外耗散、垂直湍流强度明显增大的特征。随垂直高度增加, QKE 先增大, 然后减小至 0 左右的稳定状态, 垂直方向的湍流动能最高值出现在 90 m 左右的高度, 可达约 $19 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 尾流效应的垂直影响范围可达约 1.1 km 的高度。

本研究对在中尺度气象模式中实现风机尾流效应的在线耦合模拟提供了方法和配置建议, 模拟的尾流效应各特征量的数值区间和分布特征对风能资源评估和地表改变引起的大气环境变化研究具有一定的参考价值。需要指出的是, 本文设置的风机排布方式比较简化, 模拟实验中设置的风机间距(最小 1.11 km)大于实际风场的风机间距, 而风机间距也可能影响风机尾流的相互作用。若要使用中尺度模式做更精细化的风机尾流模拟, 未来的研究中还需要基于高分辨率测风仪器的观测数据和对实际出力风机各项参数的准确描述文件, 采用更精细化的

地形数据, 使用 WRF-Fitch 模型并结合更高分辨率的大涡模式等进行模拟。

致谢 感谢中国气象局气候中心朱蓉研究员对本研究的数据支持与宝贵意见。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源. 北京: 中国电力出版社, 2012
- [2] Vermeer L J, Sørensen J N, Crespo A S. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(6): 467-510
- [3] Adams A S, Keith D W. The impacts of wind energy turbines on local meteorology: implications for urban environments // *The 89th American Meteorological Society Annual Meeting*. Phoenix, 2009: article ID: 148872
- [4] Haan B D, Hartmann H, Dijke D V, et al. Route to operational WRF wind farm forecasting // *Proceedings of the WRF Users Workshop*. Boulder, 2014: article ID: p31
- [5] Byrkjrdal Ø, Bredesen R E, Keck R E, et al. Properties of a wind farm wake as simulated by a numerical weather prediction model for the Smøla wind farm // *The European Wind Energy Association*. Barcelona, 2014: article ID: 0337
- [6] Roy S B, Pacala S W, Walko R L. Can large wind farms affect local meteorology. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(19): 4099-4107
- [7] Zhou L, Tian Y, Roy S B, et al. Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over western Texas. *Climate Dynamics*, 2013, 41(2): 307-326
- [8] Roy S B. Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 491-498
- [9] Baidya R S, Traiteur J J. Impacts of wind farms on surface air temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(42): 899-904
- [10] 贺志明, 聂秋生, 刘熙明, 等. 鄱阳湖区近地层风能资源特征研究. *资源科学*, 2011, 33(1): 184-191
- [11] 杨昱, 刘树华, 朱蓉, 等. 鄱阳湖地区大气边界层特征的数值模拟. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 896-908
- [12] 吴琼, 聂秋生, 周荣卫, 等. 江西省山地风场风能

- 资源储量及特征分析. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1605-1614
- [13] Michalakes J, Dudhia J, Klemp J, et al. Design of a next-generation regional Weather Research and Forecast Model: towards teracomputing // Proceedings of The Eighth ECMWF Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology European Centre for Medium Range Weather Forecasts. London, 1998: 117-124
- [14] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech Note NCAR/TN-475+STR. 2008, doi: 10.5065/D68S4MVH
- [15] Iacono M J, Delamer J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D13): 395-400
- [16] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 103-120
- [17] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced Land Surface-Hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 569-585
- [18] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor-Yamada Level-3 Model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(2): 397-407
- [19] Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K, et al. Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(9): 3017-3038
- [20] Fitch A C, Olson J B, Lundquist J K. Parameterization of wind farms in climate models. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6439-6458
- [21] Jimnez P A, Navarro J, Palomares A M, et al. Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: a composite-based analysis with the weather research and forecasting model over Horns Rev. *Wind Energy*, 2014, 18(3): 559-566
- [22] Porte-Agel F, Wu Y T, Iungo V, et al. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 154-168
- [23] Blahak U, Goretzki B, Meis J. A simple parameterization of drag forces induced by large wind farms for numerical weather prediction models // Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition. Warsaw, 2010: 4577-4585
- [24] Rhodes M E, Lundquist J K. The effect of wind turbine wakes on summertime US midwest atmospheric wind profiles as observed with ground-based Doppler Lidar. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 149(1): 85-103
- [25] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1988
- [26] Mohan M, Siddiqui T A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(21): 3775-3781