

长江干流航道超高分辨率近地表风场数值模拟 ——以武穴航段为例

卞瑶¹, 焦悦², 方思达³, 李世禧², 宋云帆⁴, 白磊^{2,4,5*}, 曲涛⁵

¹航天行云科技有限公司, 湖北 武汉

²海南大学生态与环境学院, 海南 海口

³武汉区域气候中心湖北省气象局, 湖北 武汉

⁴高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都

⁵北京驰远科技公司, 北京

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

为保证长江水上交通安全, 需要深入研究长江航道复杂地形的风场特征。本研究利用中尺度WRF模式结合微尺度CALMET诊断模型对长江干流航道上武穴航段进行30 m超高水平分辨率近地表风场模拟。结果表明: 1) 不论是月平均小时风速, 还是月最大小时风速, 均存在两个大风速分布区, 河流上游北岸山地区和河流中下游南岸区。2) 模拟区的风场存在显著的季节变化趋势。7月风速是最弱的月份, 4月风速是最大的月份。3) 地形对风速存在一定的影响。富池镇南部的大岭山和长江北岸的土山的风速强度为模拟区平均风速和小时最大风速的高值区, 富池镇附近的水域相对高于其他水域风速。复杂的地形会对水体上风场产生局地的影响, 因此需要加强类似地形水域的风场监测, 确保通航环境安全。

关键词

WRF, CALMET, 小时尺度, 航道风场, 地形效应

Ultra High Resolution Numerical Simulation of Near Surface Wind Field in the Main Waterway of the Yangtze River

—A Case Study of the Wuxue Section

Yao Bian¹, Yue Jiao², Sida Fang³, Shixi Li², Yunfan Song⁴, Lei Bai^{2,4,5*}, Tao Qu⁵

*通讯作者。

文章引用: 卞瑶, 焦悦, 方思达, 李世禧, 宋云帆, 白磊, 曲涛. 长江干流航道超高分辨率近地表风场数值模拟[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 211-223. DOI: 10.12677/ccrl.2023.121022

¹Leobit Technology Company, Wuhan Hubei

²College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou Hainan

³Hubei Meteorological Service, Wuhan Regional Climate Center, Wuhan Hubei

⁴Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

⁵Chiyuan Science Technology Co. Ltd., Beijing

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

Abstract

For the water transportation's safety in the Yangtze River, the waterway surface wind field characteristics along the complex terrain of the Yangtze River need to be further studied. This study uses the mesoscale meteorological model-WRF and the diagnostic model-CALMET to simulate the near-surface wind field within ultra-high horizontal resolution of 30 m near the Wuxue section of the Yangtze River main waterway. It is shown that: 1) There are two large wind speed zones, both in terms of monthly average hourly wind speed and monthly maximum hourly wind speed, in the upstream northern bank mountain area and the downstream southern bank area. 2) The wind field in the simulation area has a significant seasonal period. July has the weakest wind speed, and April has the strongest wind speed. 3) Terrain has a certain impact on wind speed. The high wind speed areas are in the southern area of Fuchi Town, which is the Dalingshan and the Tushan on the north bank of the Yangtze River. The wind speed in the water area near Fuchi Town is relatively higher than other water areas. Complex terrain will have a local impact on the wind field over the water, so it is necessary to strengthen the wind field monitoring in waterway similar to near terrain and ensure safe navigation environment.

Keywords

WRF, CALMET, Hourly Scale, Wind Field over Waterway, Topographic Effect

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江是中国重要的水上交通通道。近几年货运量的快速增长,已经跃居全球内河航运货运量的第一位。以黄金水道作为依托,长江经济带已成为继长三角、珠三角、环渤海之后的我国经济增长“第四极” [1]。已经广泛参与到中国和全球经济体系中。在航运通航环境安全中,大风(强风)和低能见度天气能够显著影响水上交通安全,尤其是大风天气。长江航道途径多处地形复杂和天气系统复杂地区,局地的大风天气会显著影响长江水上交通安全。

在长江航道干线沿线,气象观测站距离航道较远,很难进行有效大风监测。随着计算机技术的发展,数值模式已在风场研究中应用。采用数值模拟的方法能够更加全面地理解事故发生时所涉及的物理过程和机制[2] [3],且在复杂地形观测站分布稀疏,不具有代表性的情况下,仅依靠观测数据进行风速研究是远远不够的[4]。郁永静[5]等利用 WRF 气象模式模拟我国西南地区某高海拔山地风电场,模拟结果与

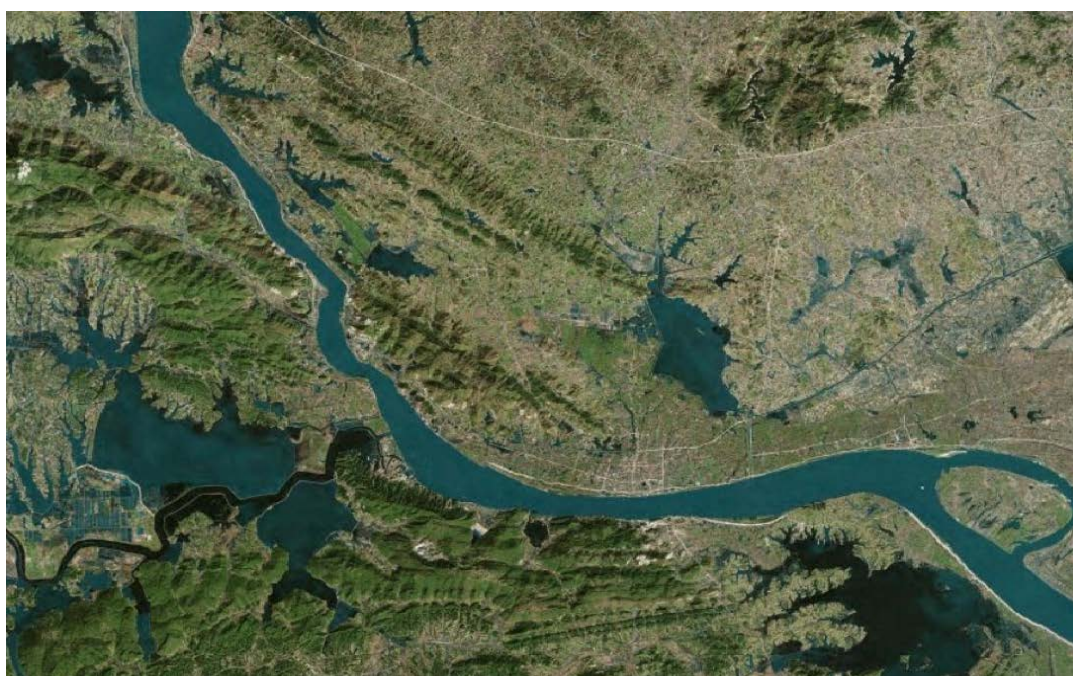
区域内 6 座测风塔的实测数据对比分析后表明 WRF 模拟结果具有较高的精度。但中尺度 WRF 模式在描述复杂地形下区域尺度的气象场时也存在一定的局限性。王文勇等[6]在对某山谷工业园区 3 年逐时的大气流场进行模拟时发现, 由于网格格距较大(1.0 km), 分辨率较低, 不能很好地体现出局部区域地形对风场的影响, 因此风场模拟效果与实测值差异较大。为了更好地体现复杂地形下局部区域地形对风场的影响, 需要更高分辨率的数值模拟。目前中尺度 WRF 模式结合 CALMET 诊断模式的方法已被广泛应用于高时空分辨率风场研究中[7] [8] [9] [10]。CALMET 模式为诊断模式, 能够不受复杂网格缺陷的影响。李俊徽[11]等利用 CALMET 模式对 WRF 模式输出的风场预报数据进行了动力降尺度处理, 结果证明 WRF/CALMET 模拟方法更加能够还原风场真实情况, 且能有效地提高风场预报数据的时空分辨率。张弛等[12]利用 WRF/CALMET 模式对近地层风场进行模拟诊断, 研究表明 WRF/CALMET 模式的模拟诊断能力比单纯 WRF 模式更加准确, 而且消耗的计算机资源相对更少。但目前采用 WRF/CALMET 模拟方法针对复杂地形风场的研究的空间分辨率大多是 1 km [13] [14], 模拟精度不够高。

为深入研究长江航道复杂地形下风场特征, 本研究针对长江中下游航段地形最为复杂的武穴航段, 利用中尺度 WRF 结合 CALMET 诊断模式的方法对武穴航段近地表风场进行 30 m 高分辨率气候态模拟研究。分析复杂地形影响下航道上典型季节的风场特征, 为长江黄金水道水上交通运输安全提供决策支持, 提高航道的通航环境安全条件。

2. 研究方法

2.1. 研究区域

图 1(a)可看出武穴航段两侧的周边环境, 航道两侧皆有山体的存在, 且航道走向从东西向转变为东南西北, 转变角度较大, 可谓长江中下游航段最为复杂的地形。图 1(b)是武穴段气象观测站点的分布图, 站点北部与南部均存在丛林, 西部为公路, 对站点风速的监测都会产生一定的影响。



(a)



Figure 1. Study area (The (a) picture shows the Wuxue section, and the (b) picture shows the meteorological observation station of the Wuxue section)

图 1. 研究区域((a)图为武穴航段, (b)图为武穴段气象观测站)

在验证高分辨率的模式数据时, 不仅仅需要高时间分辨率的站点观测, 还需要精确的坐标信息。研究中发现武穴站点的 4 位小数的坐标, 无法在 GoogleEarth 中影像找到气象观测场。因此本研究采用人工的方式在 GoogleEarth 以数据库站点坐标信息为中点, 在 0.25° 半径范围内查找定位武穴市附近气象站坐标, 获得 6 位小数的地理坐标。后续的模式数据转换等将基于此坐标开展研究。

2.2. 研究方法

在本研究中, 研究思路是: 首先, 利用中分辨率 WRF 模式为 CALMET 提供初始场; 其次, 修改 CALMET 模式的静态下垫面数据为高分辨的数据; 最后, 使用 CALMET 模式进行高分辨率的模拟, 并进行处理分析研究区气候态风场特征。

2.2.1. WRF 模式

WRF (The Weather Research and Forecasting Model)是由美国环境预测中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)等研究机构共同研制, 已被广泛应用的中尺度气象模式[15]。

在武穴地区利用中尺度 WRF 模式按照空间分辨率 1:5 的比率进行 2 层嵌套(1 和 5 km), 网格数超过 $250 \times 250 \times 35$ 。大气驱动数据使用美国 FNL 全球大气再分析数据, 模式模拟时间设置为 2010 年 1、4、7 和 10 月以代表冬、春、夏和秋季四个季节。

2.2.2. CALMET 模式

加利福尼亚气象模式(California Meteorological Model, CALMET)是目前高分辨率风场模拟中常用的诊断模式之一[16][17][18][19]。CALMET 模式中有 1 km 的全球高程数据和土地利用数据, 但土地数据为 1992 年数据, 制作时间比较老, 同时在中国地区有大量的土地利用分类错误。为了能够更好地刻画地表真实的地貌特征, 本研究使用清华大学 30 m 分辨率的土地利用数据(LUCC)和日本 ALOS 卫星的 30 m 数据替换 CALMET 模式的原有模式的粗分辨率静态数据, 使 CALMET 模型的整体水平分辨率提高到

30 m。从而使用 CALMET 模式进行高分辨率的模拟，并进行处理分析研究区气候态风场特征。

清华大学 LUCC 是分为 10 类，其分类和 CALMET 默认的土地利用分类有相对应的选项。表 1 为 CALMET 默认土地分类编码和对应清华大学 2015 版本土地分类编码。本研究根据表 1 将土地利用数据进行重新分类。

Table 1. CALMET default land classification codes and the corresponding Tsinghua University 2015 version land classification codes

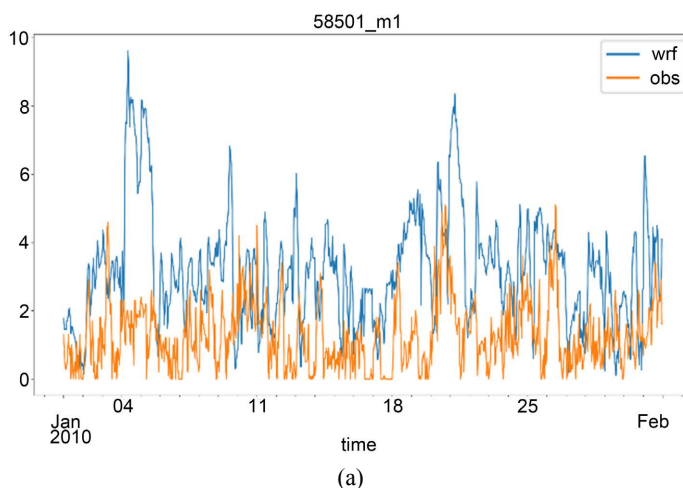
表 1. CALMET 默认土地分类编码和对应清华大学 2015 版本土地分类编码

Calmet	编码	清华	编码
Agricultural Land-Irrigated	-20	Cropland	1
Forest Land	40	Forest	2
Rangeland	30	Grassland	3
Agricultural Land-Unirrigated	20	Shrubland	4
Wetland	60	Wetland	5
Water	50	Water	6
Tundra	80	Tundra	7
Urbanor Built-up Land	10	Impervioussurface	8
Barren Land	70	Bareland	9
Perennial Snowor Ice	90	Snow/Ice	10

3. 结果

3.1. 1 km 分辨率上 WRF 和站点的小时尺度风特征

图 2 是 1 km 分辨率 WRF 风速在 58501 (武穴) 站点 1、4、7 和 10 月评估结果。可以发现 WRF 的模拟效果表现较差，与观测相比均存在较大的偏差。WRF 模拟风速均存在比观测风速偏大的情况，不能很好的还原风速真实情况，特别是十月份，可以大致表现出风速变化的趋势，但偏差较大。七月份相对来说是模拟效果最好的月份，在风速偏小时，可以大致还原风速，但也存在 WRF 模拟风速均存在比观测风速偏大的情况。



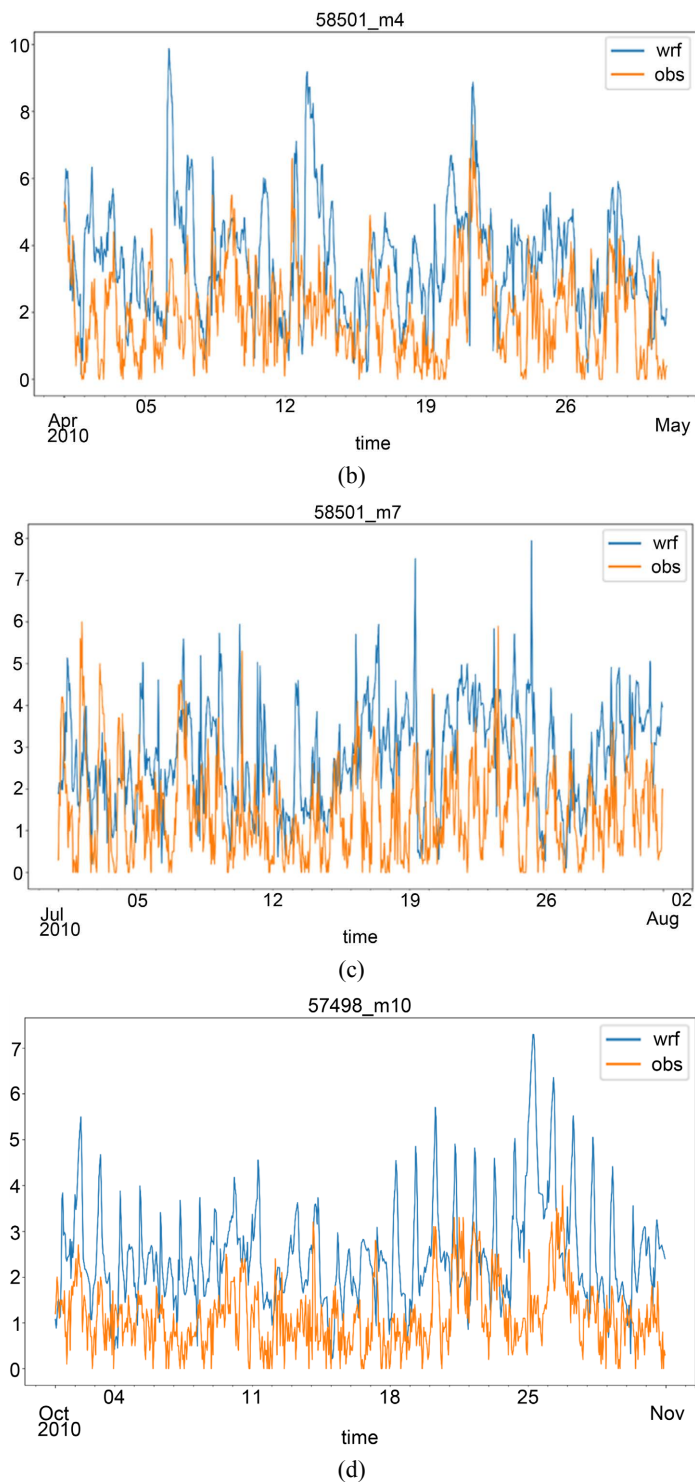
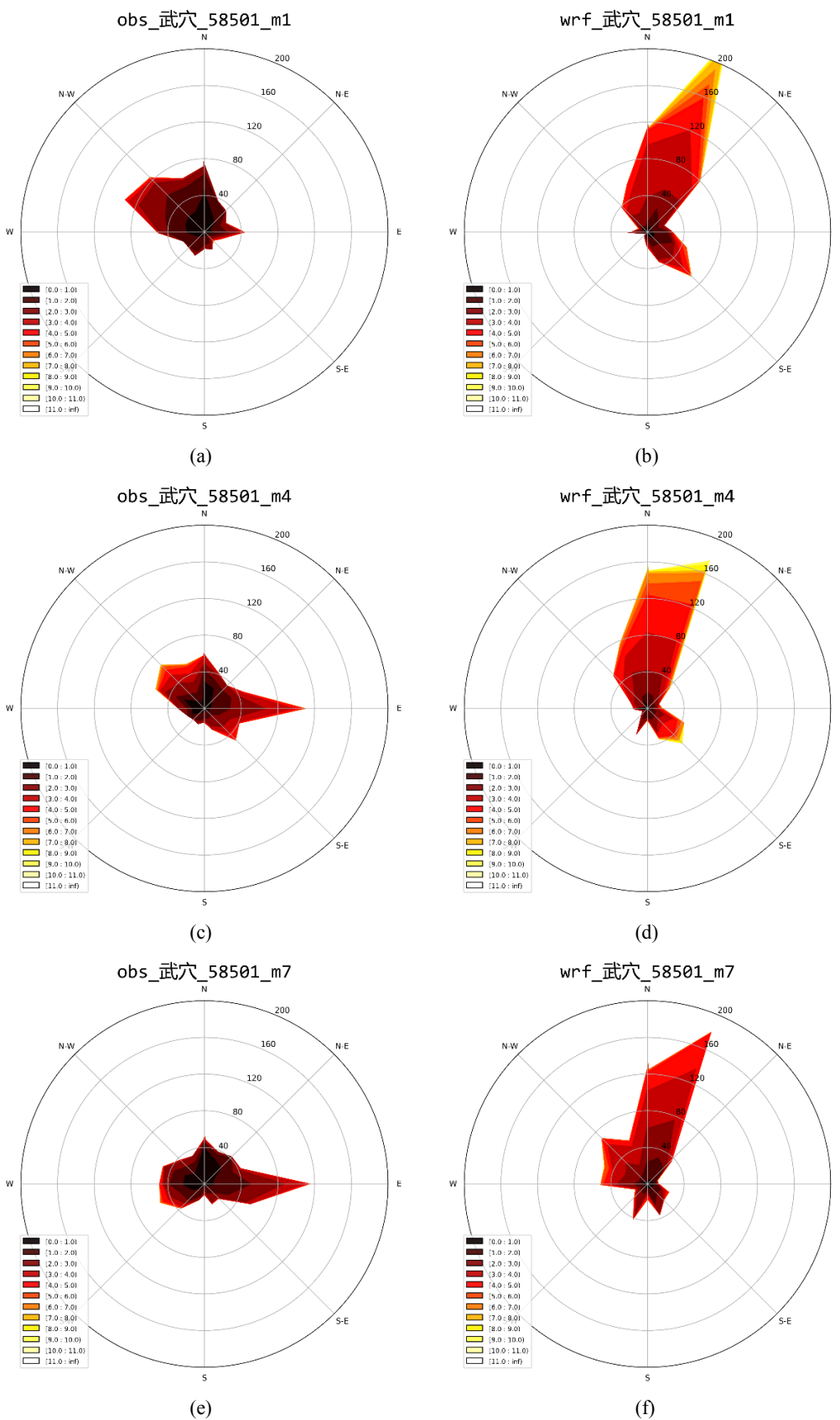


Figure 2. WRF wind speed and site wind speed in January, April, July and October ((a)~(d)), respectively
图 2. 1、4、7、10 月((a)~(d)) WRF 风速与站点风速对比图

由图 3 可看出在 1、4、7 和 10 月中，基于 1 km 分辨率的中尺度 WRF 风场模拟，与观测相比，在风向上均存在较大模拟差异，模拟效果较差。可能原因是站点大多分布在城镇中，而 WRF 模式 1 km 分辨率下没有考虑城市下垫面。



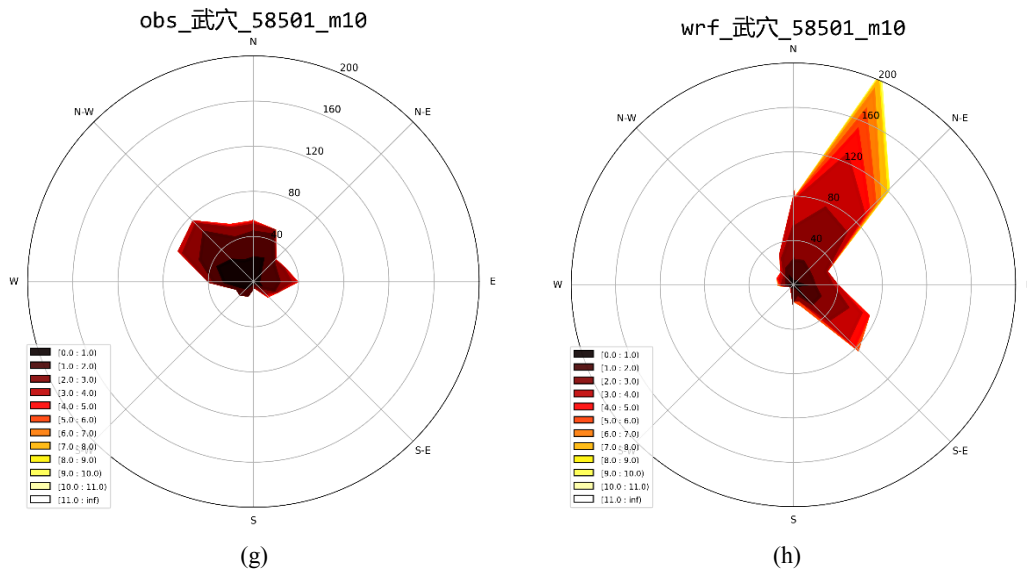
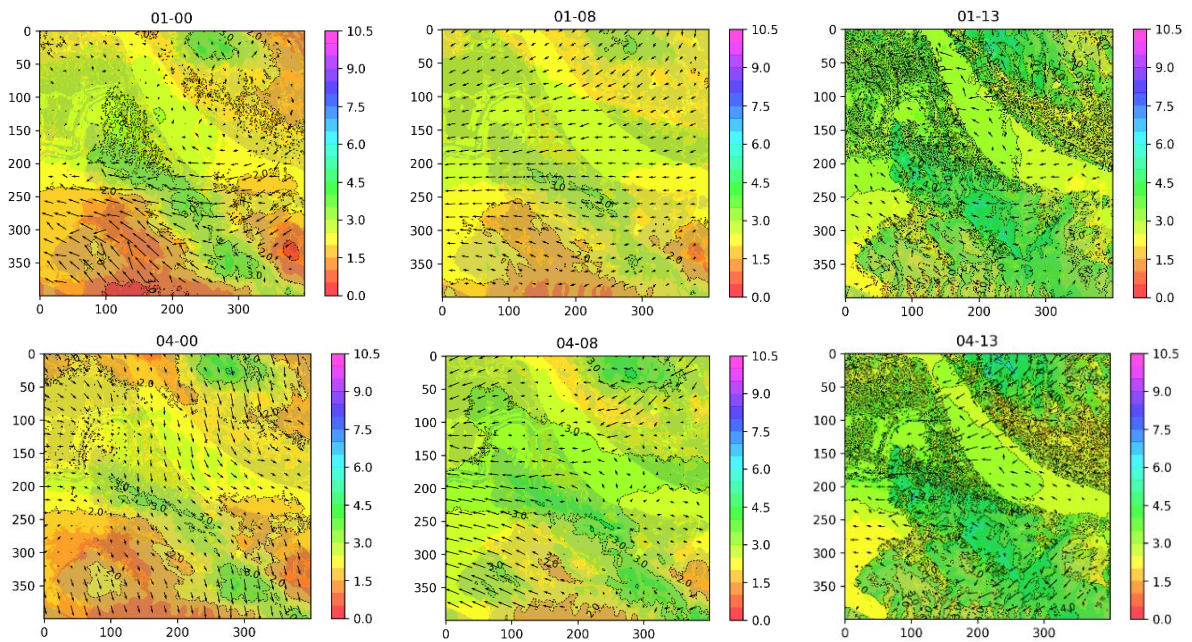


Figure 3. Comparison of Wuxue ((a), (c), (e), (g)) and 1 km-WRF ((b), (d), (f), (h)) wind rose in January, April, July and October

图 3. 武穴 1、4、7、10 月站点风玫瑰((a), (c), (e), (g))与 WRF 1 km 尺度上风玫瑰对比((b), (d), (f), (h))

3.2. CALMET 月平均小时风速分析

在图 4 中，一月份整体风速普遍不大，范围在 0~4 m/s 内，风速大值区主要有两个区域，一是研究区河道上游鸡屎尖一侧，范围较小；二是研究区河道中下游南岸，范围较广，呈条带状，走向和附近山地走向一致，呈西北 - 东南向。风速在西侧宽阔水体面上有较大变化，有一个小值中心在下巢湖村以北区域，风向复杂多变。日落前，模拟区整体风场风速增加，受到长江两岸地形影响，风速从中午 2 m/s 增加接近 3 m/s。整体的风向为偏东风。夜间模拟区的风场风速相对于白天有显著提高，风速基本在 4 m/s 左右，在长江航道上有明显的风速分区边界，在富池镇以西的江面风速偏大为 3.5~4 m/s，在以东的江面为 3~3.5 m/s。



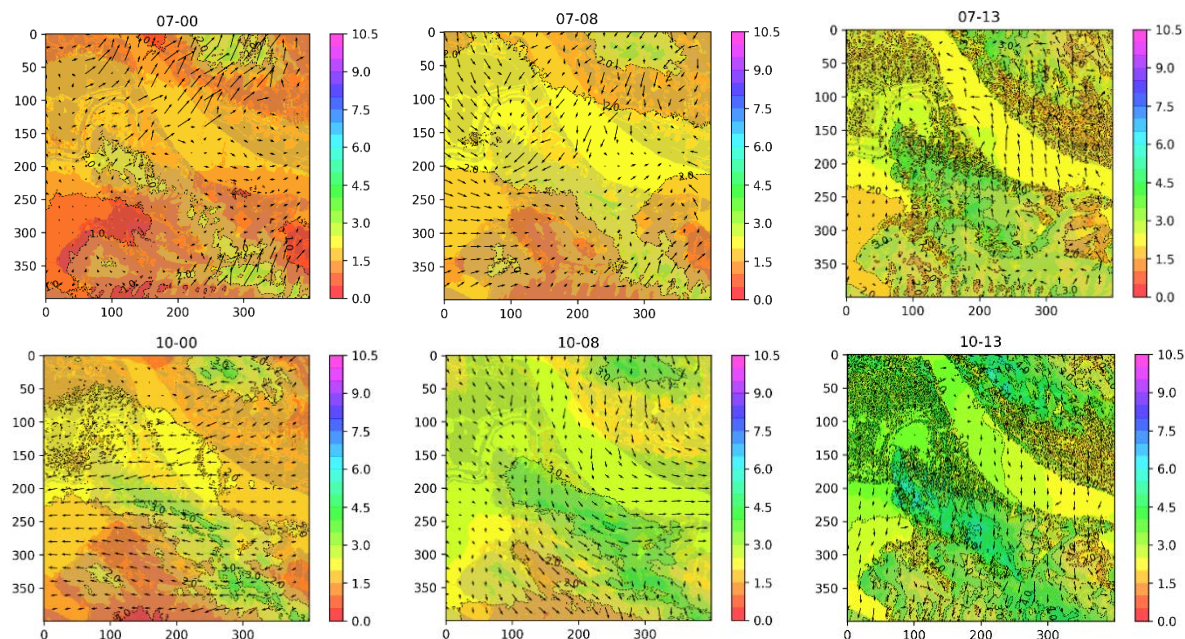


Figure 4. Monthly average hourly wind speed during sunrise, sunset and nighttime in January, April, July, and October (01-00 denotes January 00 hour)

图 4. 1、4、7、10 月日出后、日落前、夜间月平均小时风速(01-00 代表 1 月份 00 时)

在四月，日出后模拟区整体风向为北风。风速的高值区在长江南岸的大岭山和北岸的土山。航道附近的风速受到地形影响风速较大，风速在 2~3 m/s。UTC 08 时(北京时间 16 时)至 UTC 09 时，此时为武穴日落时间，模拟区风速格局由北风基本转为东风。UTC 11 时(北京时间 18 时)至 UTC 21 时(北京时间 5 时)，江面风速整体比周边大。但江面风速也有显著的分区，土山和富池镇之间的江面基本高于其上游和下游的风速 1 m/s 以上。

七月整体的风速比一月和四月份偏弱，即便在夜间风速较大的时段。在夜间，军山咀长江南岸附近的水面的风速显著大于周围江面风速。整体上，模拟区的风向，在日内有规律性的变化，夜间到清晨，风向主要为西风；正午到下午时段为北风；傍晚为东风；夜间转为南风；凌晨转为西南风。

在十月，风场风向变化是白天早晨为东风，中午到夜间模拟区西侧为偏北风，东侧过大岭山为偏西风。UTC 00 时(北京时间 8 时)风场在军山咀和富池镇的南岸有相对高风速区域(2~2.5 m/s)，其上游和下游风速在 1.5~2 m/s。UTC 01-UTC 08 时，较高的风速区域由长江两岸构成的峡谷地形逐渐扩大到大部分江面区域，最后主要集中在大岭山南岸和山区。UTC 09 时，整个区域的风速在 2.5 m/s 以上，军山咀到大岭山的山区风速在 4 m/s 以上。进入夜间后，长江江面有明显风速分区现象，富池以北的上游水域风速较大，下游水域风速较小。

3.3. CALMET 月最大小时风速分析

在图 5 中，北京时间 8 时，为日出后的时间。1、4、7 和 10 月在长江两岸的土山、军山咀和大岭山高地的地形区域月小时风速的最大值在 7 m/s 以上。但这些地区在七月仅为 3 m/s。这些月份在富池镇以东水域到对岸，存在 6 m/s 以上的高值区域，仅在 10 月其强度下降到 5 m/s。

在夜间，北京时间晚上 21 时，风速相对于白天显著的增强。在 1 和 4 月长江两岸的山体风速，均超过 11 m/s。1 月在富池镇上游的月最大小时风速在 6 m/s 以上，土山附近长江水域上在 7 m/s 以上。在 7 月和 10 月模拟区水域上的月最大风速在 4 m/s。但 7 月富池镇附近的水域风速依然高于长江其他水域。

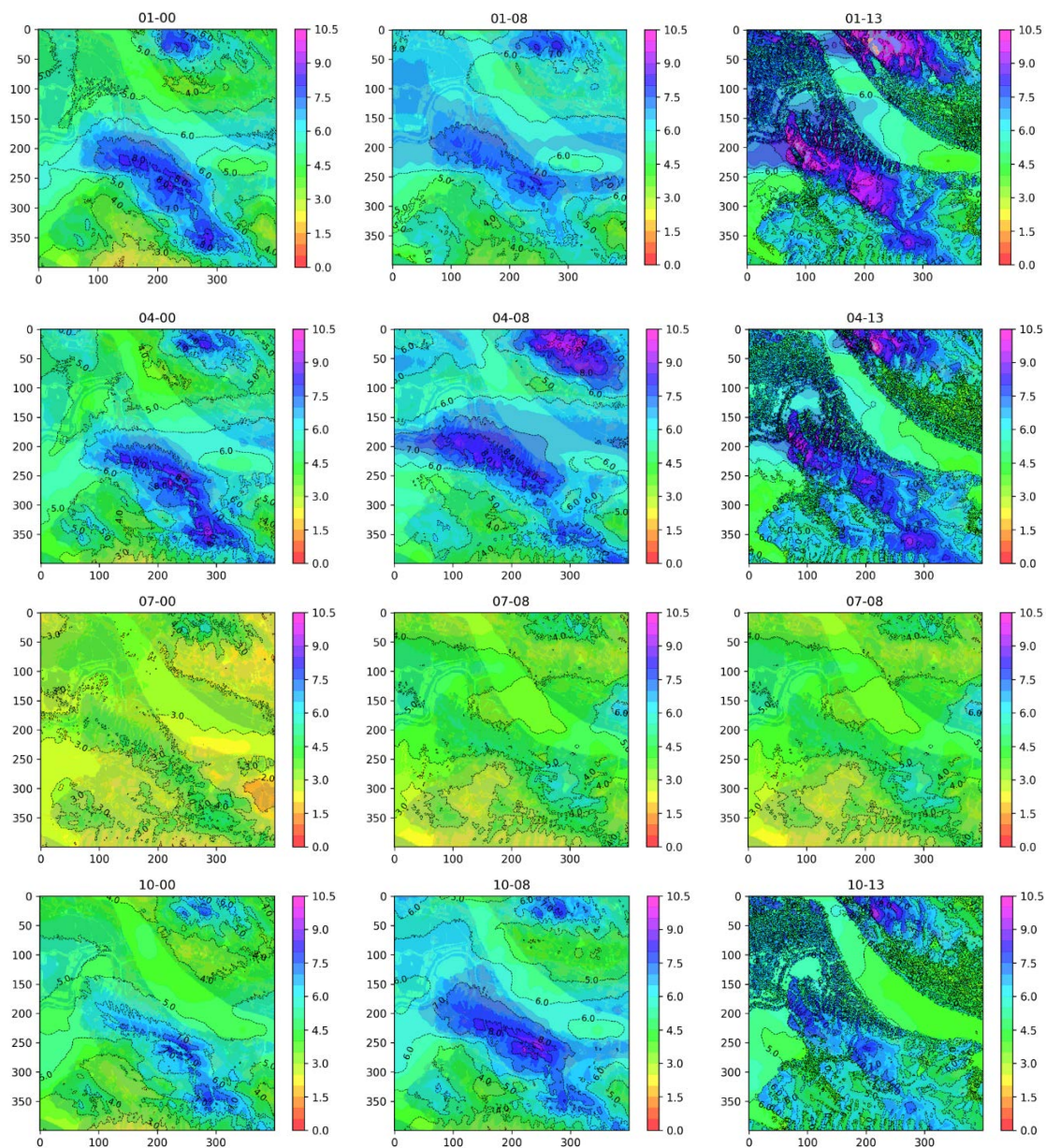


Figure 5. Hourly maximum monthly wind speeds after sunrise, before sunset and at night in different seasons
图 5. 不同季节日出后、日落前、夜间的小时月最大风速

3.4. 航道上的逐月风特征

通过分析 1、4、7 和 10 月的航段上样点的风玫瑰图，四个月份整体风向变化趋势表现大致相同，因此选取风速相对较大的 4 月为例进行分析，如图 6 所示。分析发现在整个武穴航段主要盛行风向为北风，但在不同样点存在些许的差别。在 1~8 样点盛行风向大多为西北风，从 6 样点开始风向逐渐从西北风转变为北风，在 8~17 样点风向基本转变为北风。分析结果与 3.2 中研究结果相符合。

3.5. 地形效应

在图 7 中，m1、m4、m7、m10 分别代表 1、4、7、10 月。在四月份，水域中 h2 点的风速比山顶风

速略微小，在其他几个月份中山顶风速均大于水域风速。山脚的h4样点风速始终最小。7月的风速相对其他几个月整体偏小。接下来的日内小时尺度风速变化分析以风速相对较大的4月为例。

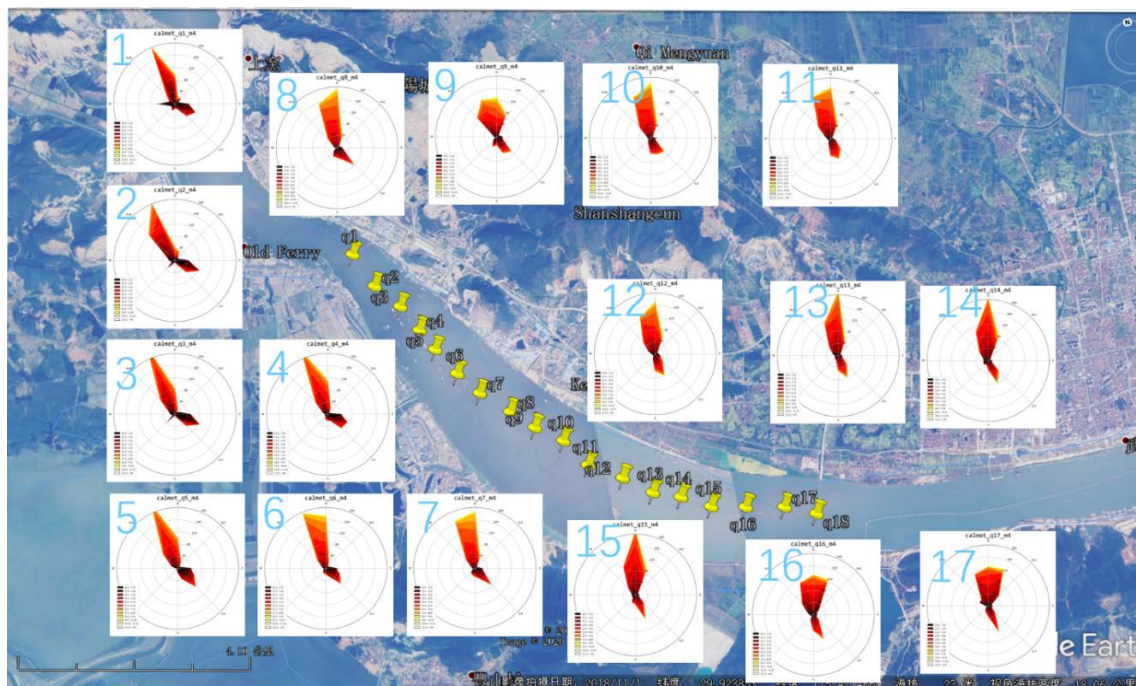


Figure 6. April windy rose on the waterway
图 6. 4月航道上风玫瑰

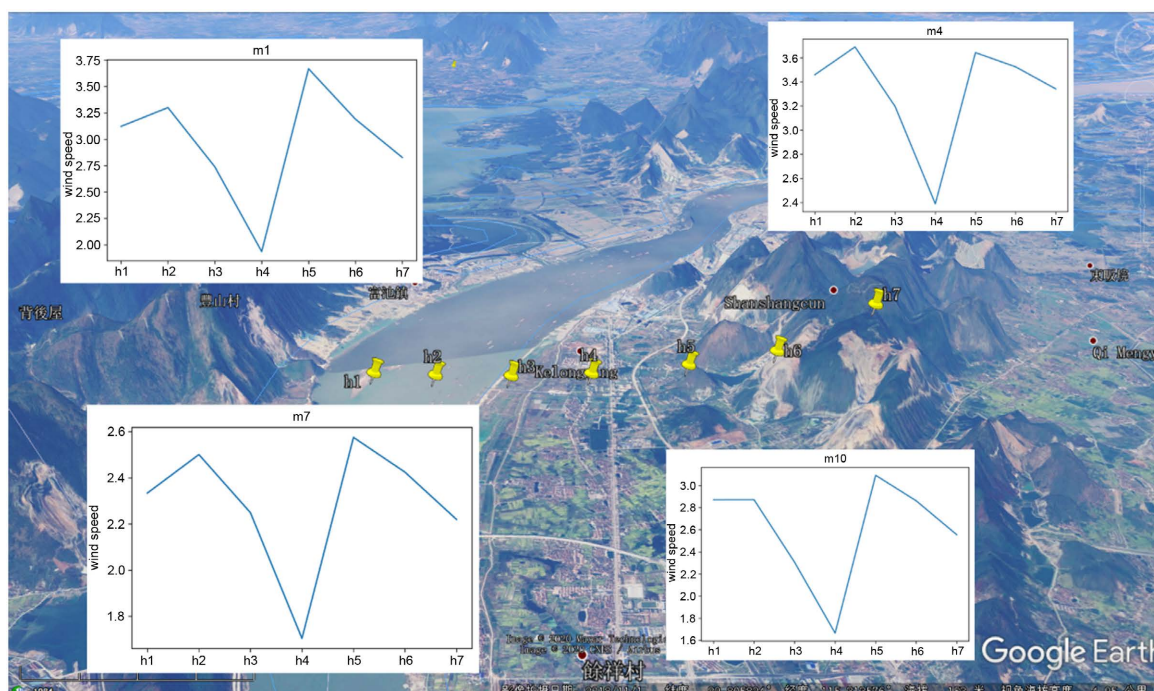


Figure 7. Intraday hourly scale wind speed variation at mountain sample sites averaged over 4 months of data
图 7. 4个月数据平均山体样点日内小时尺度风速变化

由图 8 可以看到, 在四月 UTC 0~9 时(北京时间白天 8~17 时), 在空间上风速变化较为平均, 波动较为平缓, 在 h5 样点处有小幅下降。从 UTC 10 时后, 风速在空间上波动开始加剧, 在 h4 样点处有下降, 在 h5 样点表现为上升。风速表现为水面风速较大, 比山脚平地的风速大, 但相对山顶的风速仍然较弱。

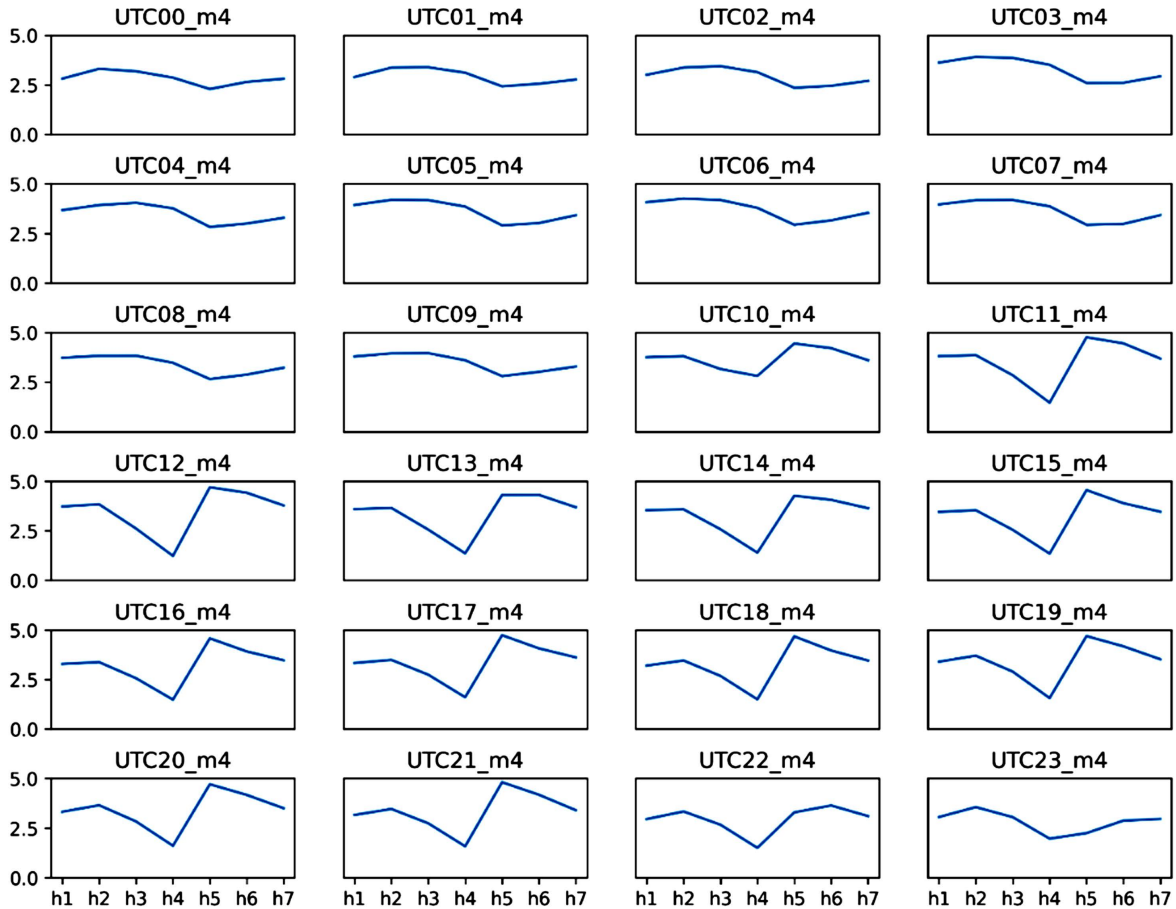


Figure 8. Intraday hourly scale wind speed variation at mountain sample sites in April
图 8. 4 月山体样点日内小时尺度风速变化

4. 结论与讨论

CALMET 是诊断模式, 它的模拟精度很大程度上受制于驱动数据的精度(1 km 分辨率的 WRF), 因此驱动数据质量的好坏直接影响 CALMET 的结果。并且 CALMET 模式是依据高程数据进行风场的诊断模式。所以模拟结果与地形有较好的关系。这是人为假定了这种关系, 是否自然风场真实存在这样的规律还需要进行大量的数据进行评估工作。

本文使用 WRF/CALMET 模式对武穴地区进行 30 m 高分辨率的气候态模拟, 得到以下主要结论:

1) 不论是月平均小时风速, 还是月最大小时风速, 均存在两个大风速分布区, 河流上游北岸山地区和河流中下游南岸区, 风向和地形走势一致; 大面积水体水面处有较大风速变化率; 西北角和河流下游北岸, 由于植被和耕地交错, 引起风场空间分布不连续。四个月中七月风速较其余几个月偏小, 四个月均存在中旬比上旬风速大的现象。

2) 模拟区的风场存在显著的季节变化趋势。7 月风速是相对最弱的月份。4 月风速强度是最强的月

份。4月和10月的风速变化格局，类似但不同，属于季节交替。

3) 在模拟区，富池镇南部的大岭山和长江北岸的土山的风速强度，由于地形原因，为模拟区平均风速和小时最大风速的高值区。对于长江水域，富池镇附近的水域相对于其他水域风速较高。

基金项目

高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目、国家自然科学基金资助项目(32260294)、海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083)。

参考文献

- [1] 魏后凯, 成艾华. 携手共同打造中国经济发展第四极——长江中游城市群发展战略研究[J]. 江汉论坛, 2012(4): 5-15.
- [2] Rife, D.L., Davis, C.A., Liu, Y., *et al.* (2004) Predictability of Low-Level Winds by Mesoscale Meteorological Models. *Monthly Weather Review*, **132**, 2553-2569. <https://doi.org/10.1175/MWR2801.1>
- [3] Fernández-González, S., Martín, M.L., García-Ortega, E., *et al.* (2018) Sensitivity Analysis of the WRF Model: Wind-Resource Assessment for Complex Terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **57**, 733-753. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0121.1>
- [4] Jiménez, A.P., González-Rouco, *et al.* (2010) Surface Wind Regionalization over Complex Terrain: Evaluation and Analysis of a High-Resolution WRF Simulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49**, 268-287. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2175.1>
- [5] 郁永静, 刘志远, 熊万能. WRF 气象模式在高海拔复杂山地风电场中的应用研究[J]. 水力发电, 2019, 45(1): 103-106.
- [6] 王文勇, 陈楠. 山区风场的 WRF/CALMET 模式模拟[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 990-996.
- [7] Wang, W., Shaw, W.J., Seiple, T.E., *et al.* (2008) An Evaluation of a Diagnostic Wind Model (CALMET). *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, **47**, 1739-1756. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1602.1>
- [8] Ludwig, F.L., Miller, D.K. and Gallaher, S.G. (2006) Evaluating a Hybrid Prognostic-Diagnostic Model That Improves Wind Forecast Resolution in Complex Coastal Topography. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, **45**, 155-177. <https://doi.org/10.1175/JAM2329.1>
- [9] Gioli, B., Gualtieri, G., Busillo, C., *et al.* (2014) Aircraft Wind Measurements to Assess a Coupled WRF-CALMET Mesoscale System. *Meteorological Applications*, **21**, 117-128. <https://doi.org/10.1002/met.1419>
- [10] Lu, Y.X., *et al.* (2012) Validation of Near-Surface Winds Obtained by a Hybrid WRF/CALMET Modeling System over a Coastal Island with Complex Terrain. *Journal of Tropical Meteorology*, **18**, 284-296.
- [11] 李俊徽, 耿焕同, 谢佩妍, 等. 基于 WRF-CALMET 的精细化方法在大风预报上的应用研究[J]. 气象, 2017, 43(8): 1005-1015.
- [12] 张弛, 王东海, 巩远发. 基于 WRF/CALMET 的近地面精细化风场的动力模拟试验研究[J]. 气象, 2015, 41(1): 34-44.
- [13] 张华, 陈永访, 何贵成, 等. 基于 WRF/CALMET 模型的河谷地形近地面风场的数值同化研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 125-131.
- [14] 张侠, 程路, 王琦, 等. 基于 WRF/CALMET 的关中盆地中部典型风场模拟[J]. 陕西气象, 2019(4): 8-12.
- [15] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [16] Cerralbo, P., Grifoll, M., Moré, J., *et al.* (2015) Wind Variability in a Coastal Area (Alfacs Bay, Ebro River Delta). *Advances in Science and Research*, **12**, 11-21. <https://doi.org/10.5194/asr-12-11-2015>
- [17] 姜创业, 孙娴, 徐军昶. MM5/CALMET 数值模拟在陕北风能资源评估中的应用[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1606-1610.
- [18] 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.
- [19] Morales, L., Lang, F. and Mattar, C. (2012) Mesoscale Wind Speed Simulation Using CALMET Model and Reanalysis Information: An Application to Wind Potential. *Renewable Energy*, **48**, 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.048>