

刘郁珏, 苗世光, 刘磊, 等. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响. 应用气象学报, 2019, 30(1): 70-81.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190107

修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响

刘郁珏¹⁾ 苗世光^{1)*} 刘磊²⁾ 胡非²⁾³⁾

¹⁾(中国气象局北京市城市气象研究所, 北京 100089)

²⁾(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

³⁾(中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要

复杂地形区域风场模拟的准确率一直是风能研究领域的难点和重点。WRF 模式是目前风能评估领域应用最广泛的天气数值模式之一, 但该模式在复杂地形区域存在对平原、山谷风速高估且对山顶风速低估的系统性误差, 并有研究建立次网格地形方案以订正误差。而次网格地形方案在不同水平分辨率下常出现错误的修正结果, 该文基于高精度地形高程数据分析了方案失效的主要原因, 发现其方程组中判断山体形态特征的阈值 -20 在过低和过高水平分辨率下均失去参考性。针对这一原因, 将方案中影响关键参数 C_t 的地形高度算子与模式水平分辨率进行拟合, 形成地形高度算子与水平分辨率相依赖的线性关系, 获得不同分辨率下更适合的山体形态阈值。通过与自动气象站 10 m 风速对比分析了修正前后 WRF 对低层风速的模拟效果, 结果显示: 修正后的次网格地形方案能够分别在较低和较高分辨率下, 部分矫正原方案错误的订正结果, 使低层风速模拟更接近实况。修正后的次网格地形方案可为复杂地形区域开展高分辨率风场模拟提供参考。

关键词: WRF; 复杂地形; 次网格地形方案; 高分辨率模拟

引 言

我国风能资源非常丰富, 了解风场信息是风能开发利用的关键前提。朱蓉等^[1]指出有效的风能资源评估技术是数值模拟技术与适当的测风塔观测相结合的方法, 因此, 需要进行高分辨率风能资源分布研究^[2-3], 尤其是气象站分布稀疏地区。但影响风场因素很多, 其中地形具有重要作用^[4]。复杂地形区域的风资源评估常利用数值模拟手段, 其模拟准确性一直是风能预报的难点和重点^[5-7]。而我国超过 2/3 的土地属于山地, 地形和地表特征复杂。中尺度数值预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting)^[8]是目前风能评估中应用最广泛的中小尺度天气数值模式之一。WRF 常用于直接模拟获得天气尺度背景风场, 或与计算流体力学类模式进行离线耦合开展中-微尺度风场模拟, 并已在全国各地

得到应用^[9-16]。由于计算流体力学模式不考虑大气物理过程, 在应用上仍受很大限制。随着计算机性能逐渐提升, 跨越“灰区尺度”^[17]直接利用 WRF 开展全物理方案的微尺度高分辨率风场模拟已成为新趋势^[18]。

但陆续有研究指出, 当模拟区域地形复杂崎岖时, WRF 对近地面风速模拟存在较大系统性偏差, 呈现出平原、山谷及风速较小地区模拟风速的高估, 山腰、山顶地区风速低估现象^[18-24]。针对这一问题, Jiménez 等^[25-26]通过在欧洲西南部的伊比利亚半岛开展密集风速观测试验, 对 WRF 的低层风速模拟进行了全面检验。不仅证实系统性误差的存在, 还指出误差源于 WRF 在模拟大气运动时对地形进行平滑处理, 而忽略了次网格地形作用影响所致, 尤其是平原等小风速地区。为弥补次网格地形带来的影响, Jiménez 等^[26]提出一种次网格地形方案, 即 Jiménez 次网格地形方案(以下简称 Jiménez 方案)。

2018-05-16 收到, 2018-08-10 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2016YFC0208802), 国家自然科学基金项目(41705006, 11472272), 北京市科技计划(D171100000717003)

* 通信作者, 邮箱: sgmiao@ium.cn

结果表明:该方案能有效减小山谷、平原风速,也能部分提高山顶风速,使近地面风速模拟更准确,并已加入 WRF3.4 以上版本的 YSU 边界层方案中。国内学者分别在京津冀太行山脉、黄土高原、云贵高原等复杂地形区域中尺度分辨率下验证了 Jiménez 方案^[27-29],结果显示:方案对 WRF 的系统性偏差有明显修正效果,能更好描述风速的空间分布特征。

但当模式分辨率提高后 Jiménez 方案出现失效情况,尤其是高分辨率中-微尺度的山顶地区修正结果明显错误。推测可能是因为原始 Jiménez 方案在设计之初只依据美国区域低水平分辨率地形资料,且只重点关注了平原、山谷等小风速地区,并未考虑模式网格水平分辨率及方案对山顶大风速区的影响。为证实猜想,本文选取京津冀西部太行山复杂地形区域进行系列模拟试验,基于高精度地形高程数据对原始 Jiménez 方案进行分析,找出原因并修正方案;同时利用自动气象站实测风速检验修正前后的模拟效果。结果表明:在复杂地形区域开展风场模拟时,不同分辨率下需谨慎开启 Jiménez 方案,而修正后的 Jiménez 方案可供参考。

1 研究区域及模式试验设计

1.1 研究区域及观测试验

北京市位于华北平原北部,地形复杂,其北、西北方向背靠燕山山脉和太行山脉,南、东南方向由山地逐渐过渡为平原。北京地区低层大气不仅受山谷风、城市热岛环流的相互作用,还受海陆风环流影响。其西北山区一带风能蕴藏极为丰富,建造有北京官厅风电场,其西北部为河北省张家口市,曾被誉为“风电第一市”。为分析 Jiménez 方案在不同分辨率下的效果,本文模拟区域选取北京西北部山区(如图 1 黑框所示,大小 $64\text{ km} \times 51\text{ km}$),并着重分析模拟区域内的小海坨山局地区域(图 1 和图 3 蓝框所示,大小 $7\text{ km} \times 5\text{ km}$)。通常山区自动气象站很少且海拔较低,分布相对稀疏,周边地形相对平坦。而北京城市气象研究所承担的冬季复杂地形气象观测试验项目 MOUNTAOM(MOUNTain Terrain Atmospheric Observations and Modeling)在小海坨山的山顶、山谷均设有自动气象站(图 2),采样周期为 10 min 。其中,小海坨站位于山顶($40^{\circ}33'15''\text{N}$, $115^{\circ}49'45''\text{E}$,海拔 2108 m);二海陀站位于山腰($40^{\circ}32'36''\text{N}$, $115^{\circ}49'10''\text{E}$,海拔 1805 m);西大庄科

站位于南部,其北、东、西三面环山,西大庄科站位于两条峡谷交界处($40^{\circ}31'13''\text{N}$, $115^{\circ}46'57''\text{E}$,海拔 900 m)。由于地形十分复杂,在同一个山体建立多个自动气象站试验较少,数据宝贵,对本文分析次网格地形方案处理高精度地形及评估方案非常有利。

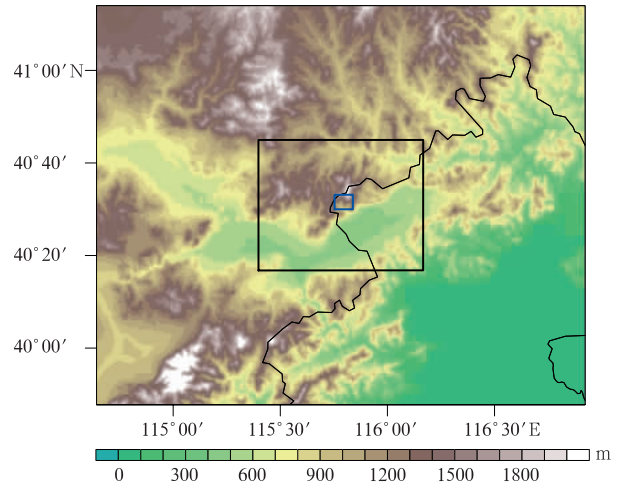


图 1 模拟区域和分析区域(填色为地形高度)
(黑框为模拟范围,蓝框为小海坨山所在区域)

Fig. 1 Computational and analytical domains with the terrain elevation(the shaded denotes terrain)
(black frame denotes simulation domain, blue frame denotes Xiaohaituo mountain)

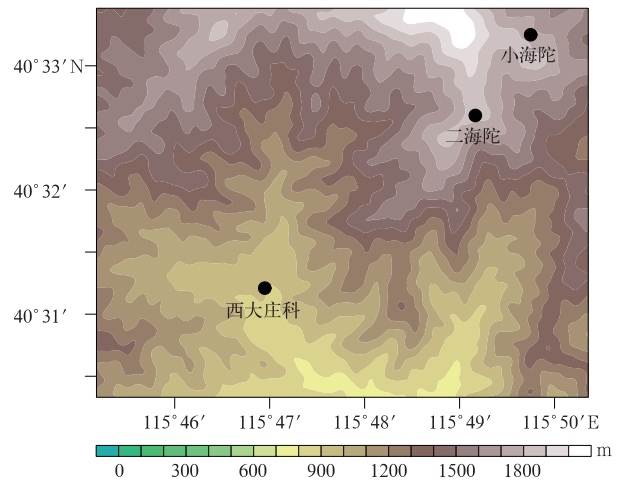


图 2 小海坨山地形(填色)

(黑色圆点为自动气象站)

Fig. 2 Analytical domain for Xiaohaituo Mountain(the shaded)
(black dots denote automatic weather stations)

1.2 模拟试验基本设置

模拟区域位于北京市延庆区西北部与河北省交

界处,既包含小海坨山所在军都山山系,也包含延怀河谷,是研究复杂地形对风速影响的一个具有代表性的局地区域。

模式初始场和侧边界条件来自北京市气象局数值预报业务系统 RMAPS-ST(睿图快速更新多尺度分析和预报系统-短时预报子系统)。其 D2 模拟区域预报起始时刻的预报分析场,分辨率为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 。RMAPS-ST 前身为 BJ-RUC V2.0^[30],预报分析场同化了 GTS 常规资料(探空、地面和飞机报)、北京地区自动气象站以及全国地基 GPSZTD 数据,RMAPS-ST D2 区域还同化了京津冀区域 7 部雷达径向风和 29 部雷达组网拼图数据。其中,用于径向风同化的京津冀 7 部雷达包括 5 部 S 波段和 2 部 C 波段雷达。29 部雷达是 RMAPS-ST 3 km 区域范围内的天气雷达,包括 S 波段和 C 波段雷达。雷达拼图数据是通过一种或多种客观分析方法来自多部雷达的反射率因子插值到统一的笛卡尔坐标后,将来自多个雷达的格点反射率因子拼接形成 3D 雷达拼图。由于 RMAPS-ST 同化了多种本

地观测,较美国国家环境预报中心提供的 FNL 全球分析数据或欧洲中期天气预报中心提供的再分析数据等其他全球场数据在本研究区域内更为准确,因此,本文使用经过同化的 RMAPS-ST $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 分辨率分析场。

为对比 Jiménez 方案效果,设计了 3 组模拟试验。其中 T0 为参照试验组,T1 和 T1C 为对照试验组,其中 T0 未采用任何次网格地形方案,T1 选用原始 Jiménez 方案,T1C 采用经本文修正的 Jiménez 方案。每个试验组均设有水平分辨率 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$, $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, $333\text{ m} \times 333\text{ m}$ 3 个单层模拟试验,并分别以 1,2,3 序号表示试验名称(表 1)。试验组区别在于是否开启 Jiménez 方案,其他物理方案相同,边界层方案为 YSU;微物理方案为 New Thompson;长波和短波辐射方案均采用 RRTMG,近地层方案为新 MM5;陆面过程方案为 Noah;积云方案不开启。静态数据中,地形高程数据采用 SRTM1 1 s (分辨率约 30 m)。

表 1 模拟试验设计

Table 1 Schemes of different experiments

试验组名称	试验名称	水平分辨率	时间积分步长/s	次网格地形方案
T0	T0_1	$3\text{ km} \times 3\text{ km}$	18	
	T0_2	$1\text{ km} \times 1\text{ km}$	6	
	T0_3	$333\text{ m} \times 333\text{ m}$	2	
T1	T1_1	$3\text{ km} \times 3\text{ km}$	18	Jiménez 方案
	T1_2	$1\text{ km} \times 1\text{ km}$	6	Jiménez 方案
	T1_3	$333\text{ m} \times 333\text{ m}$	2	Jiménez 方案
T1C	T1C_1	$3\text{ km} \times 3\text{ km}$	18	修正 Jiménez 方案
	T1C_2	$1\text{ km} \times 1\text{ km}$	6	修正 Jiménez 方案
	T1C_3	$333\text{ m} \times 333\text{ m}$	2	修正 Jiménez 方案

1.3 模拟时间段选取

用于 3 组试验检验、分析的模拟时间段并未选择连续模拟(不小于 30 d),而是挑选了 2017 年冬季和春季出现的 3 个大风天气个例。选择大风个例进行分析检验原因如下:①个例模拟可以选择中性条件、晴天少云天气,尽可能避免边界层、积云、辐射方案误差造成的影响,部分程度上削弱热力效应,使未使用次网格地形参数化方案的 T0 组中 WRF 近地面风速模拟结果更准确。再通过与实测风速进行对比,凸显复杂地形区域次网格地形对风场的影响,这样在对修正方案进行检验时更有针对性。②由于大风天气时风速较大,地形的动力因素占主导地位,使

地形对近地面风速影响作用凸显。此时,WRF 系统性偏差也达到最大,进而 Jiménez 方案对风速修正效果更显著^[26],在此基础上,本文对 Jiménez 方案再修正的效果也显著且有追踪性。而连续模拟将包含小风或静稳天气,使地形对风速的影响不显著,修正效果也不显著。在计算检验统计量时会出现平均小风和静稳天气结果,反而会掩盖 WRF 模式系统性偏差及 Jiménez 方案缺陷。另外,本文为消除个例巧合性,在易出现晴天大风天气的冬春季挑选了 3 个个例,分别为 2017 年 1 月 13—14 日、2 月 8—9 日和 3 月 5—6 日。其中在 3 个个例中西大庄科站、二海陀站、小海陀站平均风速分别为 $3.5\text{ m} \cdot$

s^{-1} , $9.4 m \cdot s^{-1}$, $6.0 m \cdot s^{-1}$; 最大风速分别为 $13.7 m \cdot s^{-1}$, $26.2 m \cdot s^{-1}$, $24.9 m \cdot s^{-1}$ 。每个个例连续模拟 48 h, 并提前 12 h 作为模式调整时间, 输出间隔为 10 min。

2 次网格地形方案修正方法

2.1 Jiménez 方案简介

由于 WRF 在模拟中对地形采取平滑处理, 但并未考虑次网格地形阻力, 致使近地面风速模拟结果在平原、山谷及风速较小处偏大, 在高山和丘陵风速偏小。Jiménez 方案^[25-26]通过在动量守恒方程的动量下沉项中引入参数 C_t 订正地形调节与植被有关的地表拖曳力 F_{veg} , 以减小平原和山谷的风速, 并尽可能增加山顶风速:

$$F_{veg} = -C_t \frac{u_*^2}{\Delta z} \frac{u}{v} \quad (1)$$

式(1)中, u 和 v 分别代表模式第 1 层的水平风分量风速, u_* 表示摩擦速度, Δz 是模式第 1 层垂直网格厚度。 C_t 是与地形特征有关的地形高度 h 的算子 $\Delta^2 h$ (也写作 LapH) 和次网格尺度地形高度标准差 σ_{SSO} 的函数。当 $\Delta^2 h \geq -20$ 时, Jiménez 方案认为是山谷时将逐步过渡减小风速:

$$C_t = \begin{cases} \ln \sigma_{SSO}, & \Delta^2 h > -10 \text{ 且 } \sigma_{SSO} < e; \\ \alpha \ln \sigma_{SSO} + (1 - \alpha), & -20 \leq \Delta^2 h \leq -10 \text{ 且 } \sigma_{SSO} < e. \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha = (\Delta^2 h + 20) / 10. \quad (3)$$

$$C_t = \begin{cases} (\Delta^2 h + 30) / 10, & -30 < \Delta^2 h < -20; \\ 0, & \Delta^2 h \leq -30. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, 当 $\Delta^2 h < -20$ 时, 认为该地区为山地或者丘陵, 通过逐渐减小 C_t 建立与高空风速的关系补偿低估; 当 $\Delta^2 h \leq -30$ 时, 则完全不考虑地表拖曳作用。在模拟中 $\Delta^2 h$ 由读取的地形高度数据集通过式(5)在 WPS 预处理中计算获得, σ_{SSO} 为 WPS 直接读取 σ_{SSO} 数据集获得。在未开启地形订正方案或区域为平坦地形时, $C_t = 1$, 不进行任何修正。Jiménez 方案目前仅耦合在 YSU 边界层方案^[25]中, 可通过设置选项开启。具体参数化方案完整公式可参见文献^[25-26]。

$$\Delta^2 h_{i,j} = 0.25(h_{i+1,j} + h_{i,j+1} + h_{i-1,j} + h_{i,j-1} + 4h_{i,j}). \quad (5)$$

2.2 Jiménez 方案存在的问题

实际模拟中发现 Jiménez 方案在不同模式水平分辨率下, 原本 Jiménez 方案应起到减小山谷风速、增加山顶风速的效果, 却时常出现相反结果, 图 3 为

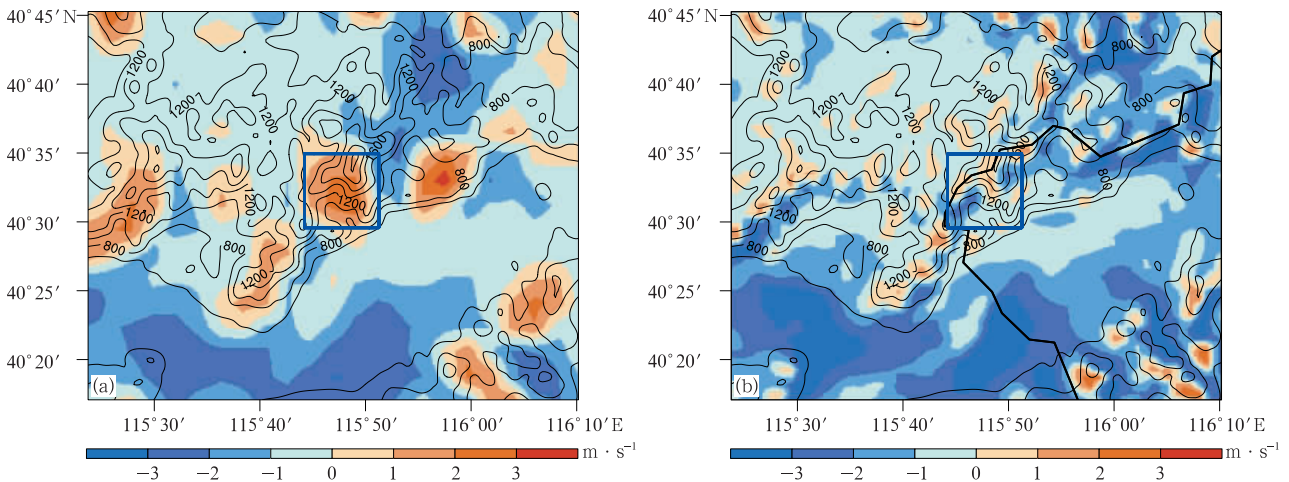
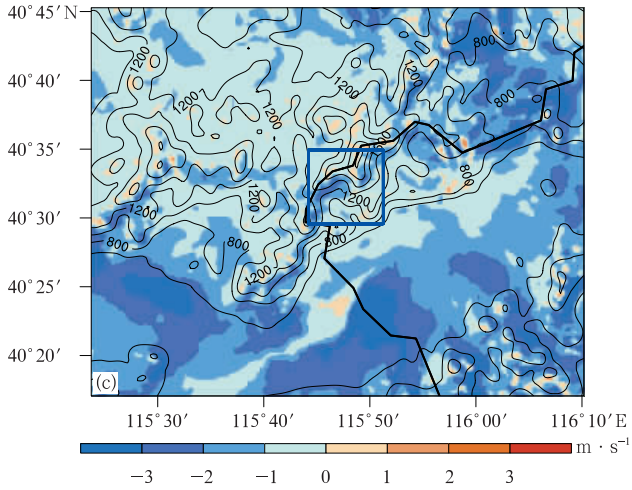


图 3 3 个个例 10 m 风速差值集合平均场(填色)(等值线表示地形高度,单位:m)
(a) T1_1 与 T0_1 的差值, (b) T1_2 与 T0_2 的差值, (c) T1_3 与 T0_3 的差值

Fig. 3 Ensemble averaged bias of 10 m wind speed of 3 cases (the shaded)
(the contour denotes the terrain height, unit: m)
(a) difference between T1_1 and T0_1, (b) difference between T1_2 and T0_2,
(c) difference between T1_3 and T0_3



续图3

T1 与 T0 试验组 10 m 模拟风速差值场,其差值场为 3 个个例的集合平均。

3 km×3 km 分辨率时,T1 与 T0 试验 10 m 风速差值在等高线密集的山区大多为正值,Jiménez 方案对 10 m 风速有明显增大作用。其中小海坨山范围全区风速增大最为显著,幅度高达 3 m·s⁻¹。相反,在等高线稀疏的平原和山体背风坡风速较小处的山谷,Jiménez 方案对风速有减小作用。仅从设计效果初衷看,Jiménez 方案有效(但在单站对比中仍存在较大问题,见图 4)。1 km×1 km 分辨率下,Jiménez 方案同样也达到减小山谷风速、提高山顶风速效果,但修正幅度明显小于 3 km 分辨率。其中在小海坨山范围,风速差值场不仅出现正值区

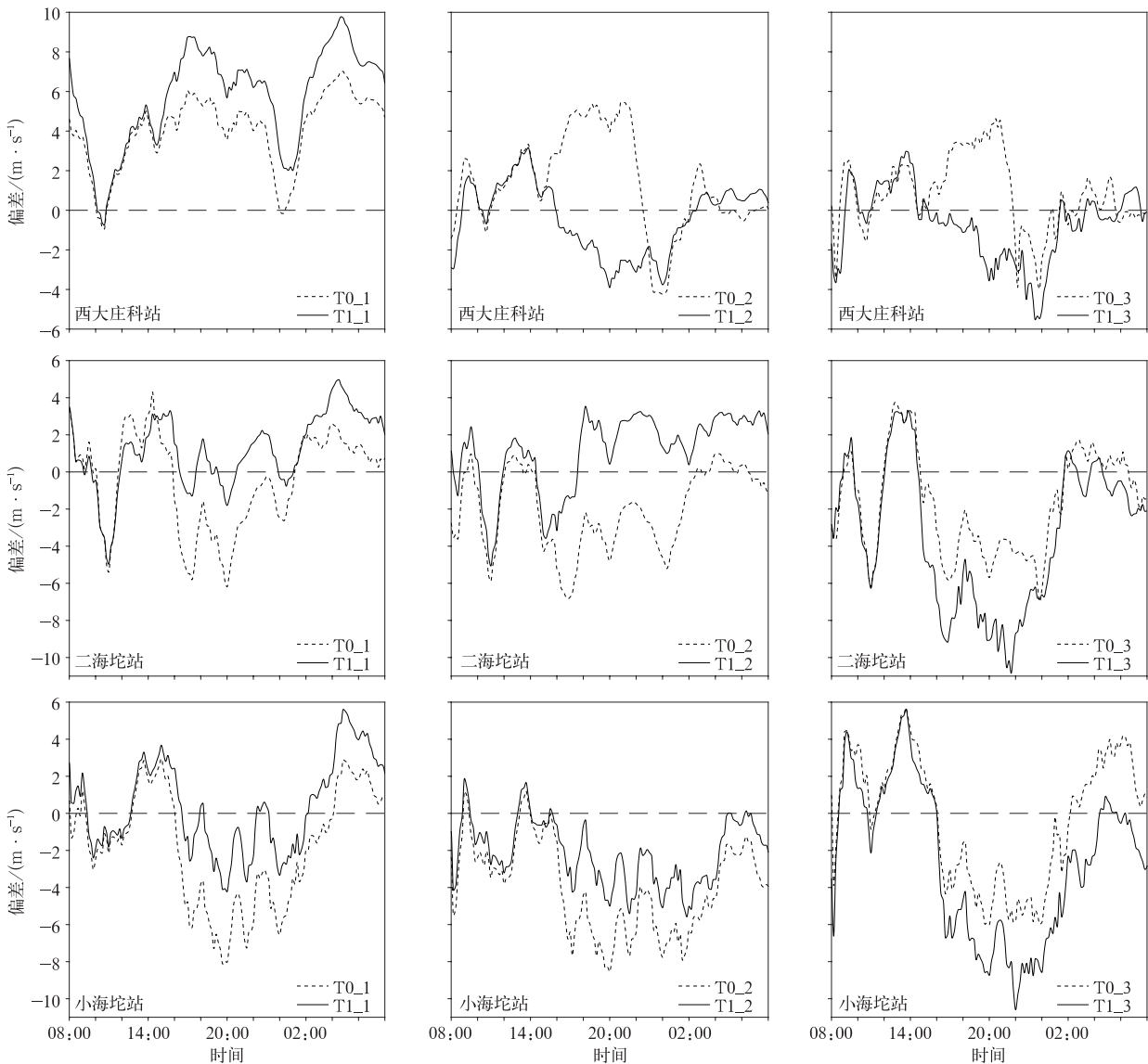


图4 3 个个例西大庄科站、二海坨站、小海坨站 T0 和 T1 试验 10 m 风速模拟与实测偏差的平均日变化

Fig. 4 Ensemble averaged daily bias of simulated and observed 10 m wind speed at Xidazhuangke, Erhaituo and Xiaohaituo of T0 and T1 from 3 cases

也出现负值区,且正负区域与实际地形对应较好,正值区对应小海陀山呈“M”型的山脉顶部,负值区为较平缓的山谷底部,说明 1 km 时高分辨率模拟在对地形描述上优势很大。同时随着水平分辨率提高,Jiménez 方案对次网格地形处理也随之精细化,仅通过 Δ^2h 水平分布就能很好地分辨出山体局部特征。而当分辨率进一步提高至 333 m \times 333 m,风速差值场在模拟区域全区内基本为负,Jiménez 方案不仅对山谷地区风速起到减小作用,也减小了山顶风速,Jiménez 方案修正结果出现明显错误。

为进一步与实测比较,图 4 给出西大庄科、二海陀、小海陀站点 T1 及 T0 模拟与实测 10 m 风速偏差的平均日变化。由于水平分辨率不同,模式在对静态数据、大气物理过程等计算精度上也不同,所以

低分辨率模拟风速插值到单站不如高分辨率,或更高分辨率模拟结果由于受其他物理方案在“灰区尺度”^[31]因不可分辨因素影响造成不及低分辨率,这均可以理解且暂不可避免。但本文关注重点并非不同分辨率对风速模拟准确性,而是不同分辨率下 Jiménez 方案对近地面风速修正的有效性及其原因。

图 4 中, T0 与实测风速偏差显示出 WRF 系统性偏差问题,表现为代表山谷的西大庄科站风速偏大,山顶站二海陀站、小海陀站风速偏小。14:00—22:00(北京时,下同),实际风速(图中未给出)较大时 WRF 的系统性误差较大,而此时 Jiménez 方案修正效果最明显,这也是本文挑选大风个例的原因。随着模式分辨率增加,系统性误差略减小,但仍存在(表 2)。

表 2 10 m 风速统计检验结果(单位:m \cdot s $^{-1}$)
Table 2 Statistic results of simulated 10 m wind speed(unit:m \cdot s $^{-1}$)

试验	平均偏差			均方根误差		
	西大庄科站	二海陀站	小海陀站	西大庄科站	二海陀站	小海陀站
T0_1	4.057	-0.411	-1.791	1.860	2.626	3.098
T0_2	1.270	-2.103	-3.955	2.499	2.136	2.473
T0_3	0.744	-1.838	-0.248	1.873	2.850	3.433
T1_1	5.813	1.191	0.420	2.497	2.021	2.458
T1_2	-0.461	1.062	-2.118	1.764	2.042	1.746
T1_3	-0.742	-3.506	-2.598	1.811	3.820	4.108
T1C_1	3.135	-0.588	-0.392	1.776	2.391	2.689
T1C_2	0.055	0.129	-1.200	1.644	1.565	1.591
T1C_3	0.279	-0.639	-0.016	1.300	1.583	1.791

山谷西大庄科站,除 T1_1 外,Jiménez 方案能按预期对风速有减小的修正效果。而在 T1_1 在西大庄科站对近地面风速却有明显增补,增幅平均达 1.8 m \cdot s $^{-1}$,但偏差较 T0_1 反而更大。1 km 分辨率下,Jiménez 方案分别减小山谷并提高山腰、山顶风速,能有效缩小与实测的偏差。而 333 m 分辨率下,同其他个例结论相似,同样存在 Jiménez 方案修正错误的现象,尤其对山顶站,使用 Jiménez 方案反而使原本低估的风速进一步减小。

为寻找 Jiménez 方案在 3 km 和 333 m 分辨率下失效原因,需从方案中引入的调整项 C_i 着手。从式(2)~式(4)可知 C_i 主要与 Δ^2h 和 σ_{SSO} 有关。对 σ_{SSO} 来说,只有在非常平坦的地区才可能小于 e ,且 σ_{SSO} 只参与对山谷地区做减小风速的修正,并不影响山顶区域。在模拟区域 333 m 分辨率下,其读取的 σ_{SSO} 基本大于 e , σ_{SSO} 对 C_i 的计算影响不大,失效主要问题来自 Δ^2h 变量,其分布如图 5 所示。

图 5 分别给出 3 km,1 km,333 m 3 种水平分辨率下在整个模拟区域和小海陀山区域 Δ^2h 水平分布。低分辨率时, Δ^2h 绝对值较大,随着分辨率提高, Δ^2h 绝对值逐渐向 0 靠近。就小海陀山局地区域而言,3 km 分辨率的 Δ^2h 值分布几乎无法分辨出山谷、山顶等局地山体形态。Jiménez 方案中用于区分山体形态判断阈值 -20,对于 3 km 下的小范围内几乎不起任何参考性。如代表山谷的西大庄科站所在网格内由于地形复杂程度大,平滑过滤的次网格地形海拔高度差大,其 $\Delta^2h < -20$ 而被 Jiménez 方案判定为山顶而进行了增幅修正。由此可知,-20 不适合作为 3 km 分辨率山体形态特征判断依据。但由于 3 km 网格分辨率低,也无法找到其他合适阈值,这也进一步说明复杂地形区域开展风场高分辨率模拟的必要性。1 km 分辨率时,阈值 -20 能较好地分辨局地山体的形态特征。当分辨率继续增加到 333 m 时,发现小海陀山范围内

$\Delta^2 h$ 值已均大于 -20, 此时 Jiménez 方案将整个区域判断为平原而减小其风速(图 4), 这也是图 4 和图 3 中风速偏小的原因。所以 333 m 分辨率以下阈值取为 -20 显然不适用。若将 $\Delta^2 h$ 以 0 为界限却能分辨山脊和山谷形态, 说明 333 m 分辨率以下存

在可作为山体形态判据的 $\Delta^2 h$ 值。需要人为重新依据区域地形特点在不同分辨率下设定合适的判据, 尤其是高分辨率下的阈值, 修正弥补 Jiménez 方案缺陷。

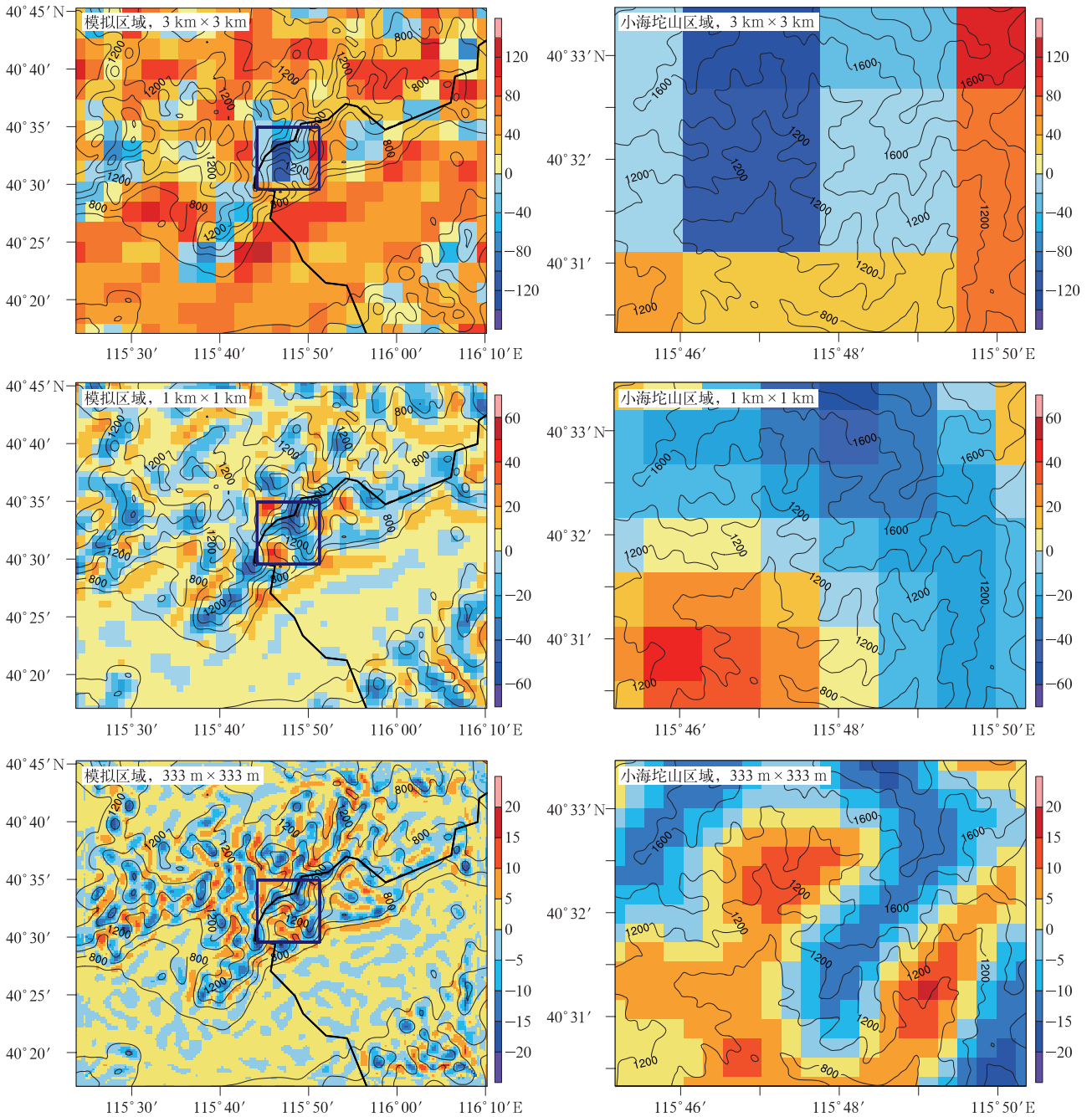


图 5 模拟区域和小海坨山区域不同水平分辨率 $\Delta^2 h$ 水平分布(填色)
(等值线表示地形高度, 单位: m)

Fig. 5 $\Delta^2 h$ distribution of computational domain and Xiaohaituo Mountain with different resolutions(the shaded)(the contour denotes the terrain height, unit: m)

2.3 Jiménez 方案的修正方法

为确定不同分辨率用于判断山体形态的阈值, 首先需找出 $\Delta^2 h$ 与模式水平分辨率之间的相关关系。本文分别在小海坨山的山顶、山腰和山谷处各挑选 10 个点(如图 6 所示)。依次获取各点从 3 km 至 100 m(分别为 3, 2.7, 2.4, 2.1, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 km)18 个不同水平分辨率下对应的 $\Delta^2 h$ 值。

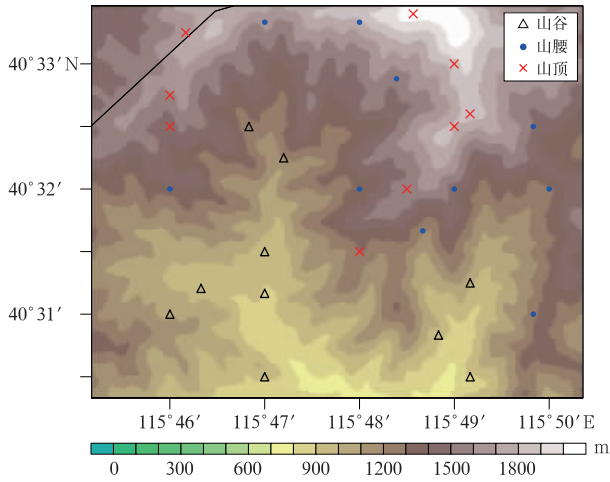


图 6 小海坨山区域 30 个点的分布 (填色表示地形)

Fig. 6 The distribution of 30 points in Xiaohaituo Mountain(the shaded denotes terrain)

$\Delta^2 h$ 散点图(图 7)显示当水平分辨率大于 2 km 时, 所选点无论位置如何 $\Delta^2 h$ 均小于 -20, 即所有点均判为位于山顶; 而当分辨率小于 500 m 时, 大部分山腰点 $\Delta^2 h$ 已大于 -20, 即将山腰以上点已误判为山谷。分辨率过高或过低都将导致 -20 的判据

做出错误判断。为修正山体形态的阈值, 将 30 个点 $\Delta^2 h$ 值与水平分辨率进行线性回归, 获得修正后的 $\Delta^2 h_c$:

$$\Delta^2 h_c = -0.033dx + 9.154. \quad (6)$$

式(6)中, dx 为水平分辨率, 单位为 m。

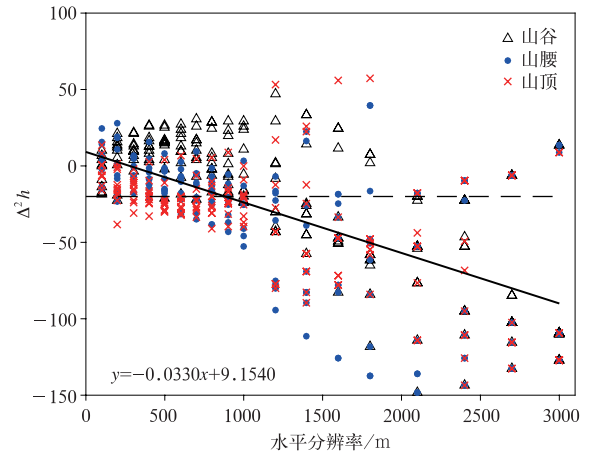


图 7 30 个点不同水平分辨率下对应的 $\Delta^2 h$ 及拟合曲线

Fig. 7 The corresponding $\Delta^2 h$ values of 30 points at different resolutions

将原始 Jiménez 方案阈值 -20 带入新修正的式(6), 其对应的最佳网格水平分辨率应为 $883 \text{ m} \times 883 \text{ m}$, 接近 1 km, 所以上文中原始 Jiménez 方案在 1 km 分辨率较 3 km 和 333 m 效果更佳。而原始 Jiménez 方案制定之初适用的 2 km 分辨率在小海坨山区域也不适用, 2 km 对应的阈值应该为 -56, 小于 -20。按照上述关系进一步修正式(2)~式(4), 得到式(7)~式(9)为检验修正后 Jiménez 方案的模拟效果, 将修正式(6)~式(9)代入 WRF 的 Jiménez 方案中, 分别对 3 个个例进行重新模拟。

$$C_t = \begin{cases} \ln \sigma_{SSO}, \Delta^2 h > \Delta^2 h_c \times \frac{1}{2} \text{ 且 } \sigma_{SSO} < e; \\ \alpha \ln \sigma_{SSO} + (1 - \alpha), \frac{1}{2} \Delta^2 h_c \geq \Delta^2 h \geq \Delta^2 h_c \text{ 且 } \sigma_{SSO} < e. \end{cases} \quad (7)$$

$$C_t = \begin{cases} (\Delta^2 h - \Delta^2 h_c \times \frac{3}{2}) / (\Delta^2 h_c \times \frac{1}{2}), \Delta^2 h > \Delta^2 h_c \times \frac{3}{2}; \\ 0, \Delta^2 h_c \times \frac{3}{2} \geq \Delta^2 h. \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha = (\Delta^2 h - \Delta^2 h_c) / (\Delta^2 h_c \times \frac{1}{2}). \quad (9)$$

3 结果检验

图 8 给出小海坨山区域 3 个个例 T1C 与 T1 试

验风速差值平均场。T1C_1, T1_1 减小了小海坨山全区的风速, 尤其在山顶。原始 Jiménez 方案虽在 1 km 分辨率下, 效果最佳但仍略偏大, 而 T1C_2 较 T1_2 平均略降低 $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。333 m 分辨率下, 修

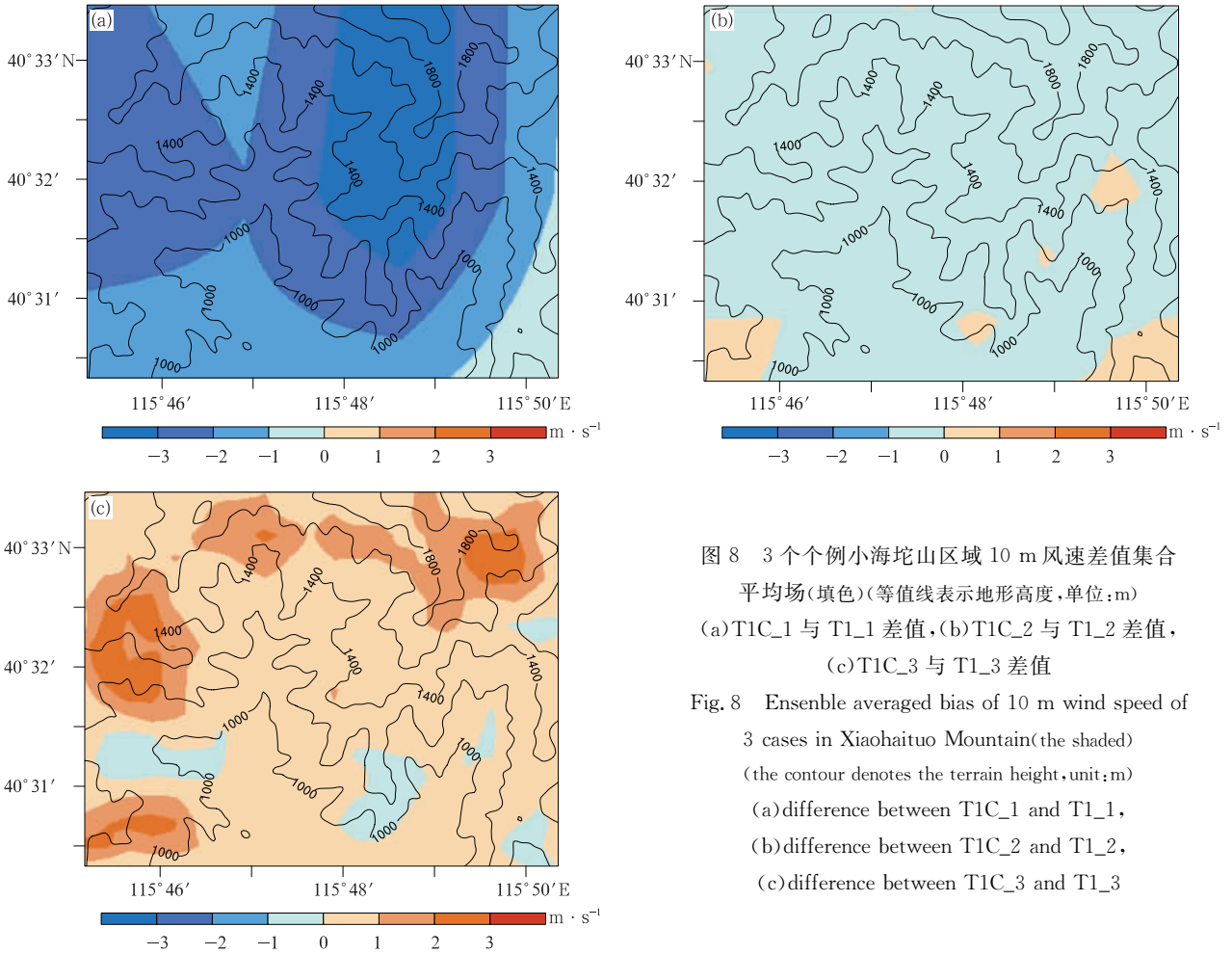


图8 3个个例小海坨山区域10 m 风速差值集合平均场(填色)(等值线表示地形高度,单位:m)(a)TIC_1与T1_1差值,(b)TIC_2与T1_2差值,(c)TIC_3与T1_3差值

Fig. 8 Ensemble averaged bias of 10 m wind speed of 3 cases in Xiaohaituo Mountain(the shaded)(the contour denotes the terrain height, unit:m)(a)difference between TIC_1 and T1_1,(b)difference between TIC_2 and T1_2,(c)difference between TIC_3 and T1_3

正后Jiménez方案使风速明显在“M”型山顶增加,在山谷等小风速地带略减小,弥补了由原Jiménez方案因阈值-20 过小而造成全区风速错误减小的效果。

为比对实测风速,图9 分别给出3 站点模拟与观测的偏差平均日变化情况,并在表2 中分别给出T0,T1 与T1C 3 组试验组所选3 个自动气象站10 m 风速的平均偏差和均方根误差。T0 试验组中,

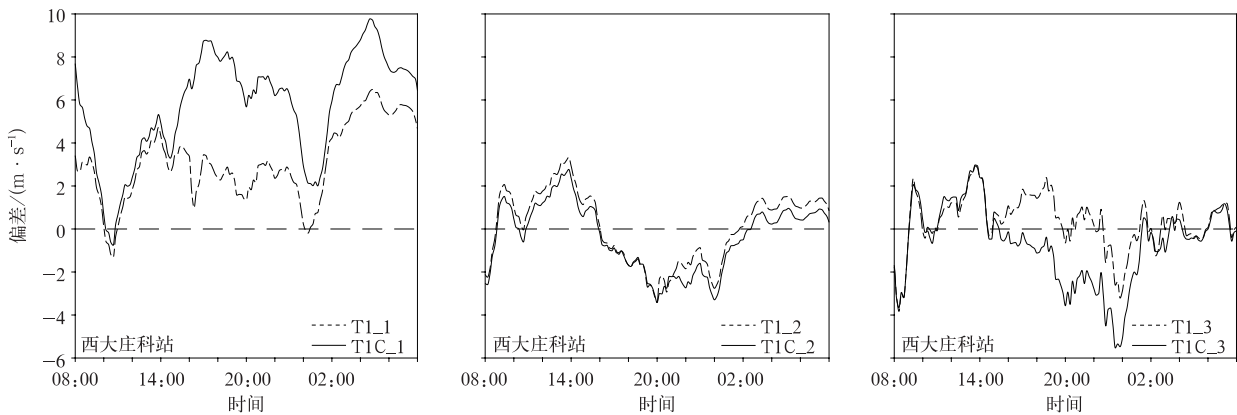
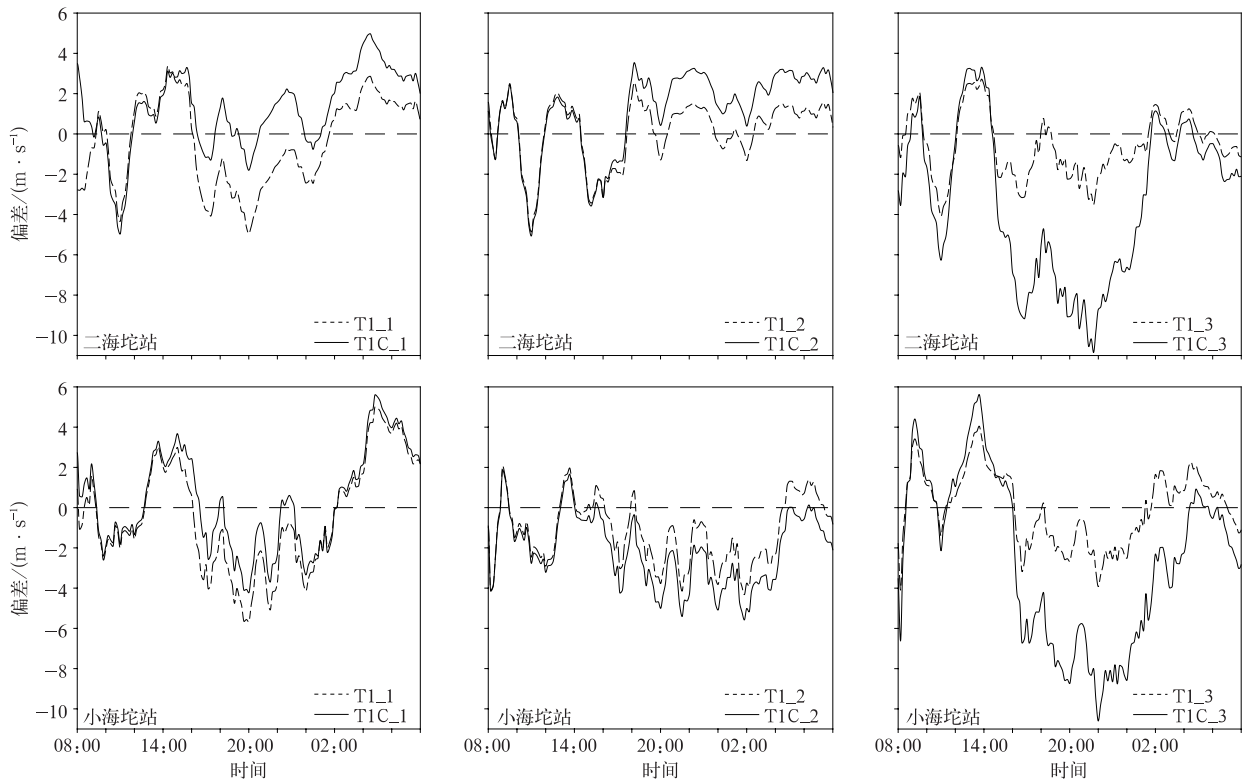


图9 3 个个例西大庄科站、二海陀站、小海坨站 T1C 和 T1 试验 10 m 风速模拟与实测偏差的平均日变化

Fig. 9 Ensemble averaged daily bias of simulated and observed 10 m wind speed at Xidazhuangke, Erhaituo and Xiaohaituo of T1C and T1 from 3 cases



续图 9

随着分辨率提高,平均偏差数值在减小,但333 m分辨率下均方根误差值略大,这是由于高分辨率增加了风速脉动的模拟,使其风速分布更离散。T1 试验组中,1 km 分辨率统计检验结果明显好于 3 km 和 333 m,而 3 km 和 333 m 反而差于 T0,这也与上文结果一致,表明原始 Jimémez 方案失效。在 T1C 试验组中,在山谷站修正后的 Jimémez 方案较修正前降低了 3 km 分辨率风速,且在不同实际风速下修正效果不同,大风速时效果较差,但整体平均偏差和均方根误差绝对值数值上较 T1 更好。在山谷站,修正后的 Jimémez 方案分别提高了 1 km 和 333 m 风速,效果很好。在山顶站,尤其 333 m 分辨率下,较原始 Jimémez 方案,修正后 Jimémez 方案大幅度增加风速,弥补原始 Jimémez 方案把山顶当作山谷错误的减小风速的修正效果。T1C 较 T1 在山顶站平均偏差和均方根误差绝对值数值上也分别减小,使模拟更接近观测。总之,修正后的 Jimémez 方案能很好地弥补原始 Jimémez 方案存在的缺陷,使其能适应不同网格分辨率模拟。

4 结论与讨论

本文基于高精度地形高程数据对 Jimémez 方案

进行修正,分析了不同水平分辨率下 $\Delta^2 h$ 变化,找出合适的山体形态判断阈值,使其能适应不同分辨率,尤其是高分辨率模拟。在京津冀西部太行山复杂地形区域开展大风个例模拟,并利用 3 个自动气象站实测风速对比分析 Jimémez 方案修正前后对近地面风速模拟效果,得到以下结论:

1) WRF 在复杂地形区域对近地面风速的模拟存在系统性误差,表现为平原、山谷等小风速地带偏高,山腰、山顶等大风速地带偏低的现象,且实际风速越大系统性误差越大。误差会随着模式分辨率的增加而减小,在复杂地形开展风场高分辨率模拟非常必要。

2) 原始 Jimémez 方案在不同网格分辨率下呈现错误的修正效果:在较低分辨率下,高估的平原、山谷地区风速被进一步增补;在高分辨率下,低估的山腰、山顶风速被进一步降低。因此,在复杂地形区域,尤其是高分辨率下是否开启次网格地形方案需慎重选择,必要时应提前评估。

3) Jimémez 方案失效的主要原因来自方程中判断山体形态特征的 $\Delta^2 h$ 值并不适用于不同网格分辨率所致。通过高精度地形数据,本文建立小海坨山区域不同分辨率下 $\Delta^2 h$ 与网格分辨率的拟合关系,并修正原始 Jimémez 方案。发现修正后 Jimémez

方案在不同分辨率下能有效弥补原始方案缺陷,其低层风速平均偏差和均方根误差统计值均较原始 Jiménez 方案更优,能起到减小 WRF 系统性误差、使近地面风速更接近实测的效果。

本文主要目的是指出原始 Jiménez 方案在阈值拟定上存在的错误,不适于全尺度模式分辨率的模拟试验。由于原方案方程组中的 $\Delta^2 h$ 随模式网格分辨率增高而趋于零,本文再修正方法的要点是找出 $\Delta^2 h$ 趋于零的速率,虽然一元回归方法较为简单,但通过线性速率修正 $\Delta^2 h$ 后对模拟结果改进明显,也进一步说明 $\Delta^2 h$ 这一参数对模式分辨率有极大的敏感性,读者在开启该方案时需谨慎处理。另外,本方法在其他复杂地形区域理论上也能有利改善,尤其是进行高分辨率模拟时可供参考。但值得注意的是,由于本文修正主要源自小海坨山区域的地形高程数据,其他复杂地形区域其 $\Delta^2 h$ 随模式分辨率变化速率(斜率)是否一致,还需要在各地进一步开展模拟研究。但可以参考本文方法,制定适合所关注区域的修正方案关系。Jiménez 方案在设计时用到的次网格地形参数仍较为主观,下一步可考虑引入代表地形起伏程度的参数,如地形分形特征,地形高度的功率谱特征等更客观且具有物理意义的参数,发展出更普适的次网格地形修正方案。

参考文献

- [1] 朱蓉,何晓风,周荣卫,等. 风能资源评估技术进展及中国发展现状//全国工业空气动力学学术会议,2009:66-78.
- [2] 朱蓉,何晓风,周荣卫,等. 区域风能资源的数值模拟评估方法. 风能,2010(4):52-56.
- [3] 刘郁珏,李军,胡非,等. 一种考虑海拔高度的风速测量相关推测法. 应用气象学报,2013,24(1):109-116.
- [4] Whiteman C. Mountain meteorology: Fundamentals and applications. *Mountain Research & Development*, 2000, 21(2): 200-201.
- [5] 李磊,张立杰,张宁,等. FLUENT 在复杂地形风场精细模拟中的应用研究. 高原气象,2010,29(3):621-628.
- [6] 穆海振,徐家良,柯晓新,等. 高分辨率数值模式在风能资源评估中的应用初探. 应用气象学报,2006,17(2):152-159.
- [7] 许杨,陈正洪,杨宏青,等. 风电场风电功率短期预报方法比较. 应用气象学报,2013,24(5):625-630.
- [8] Skamarock W, Klemp J. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(7): 3465-3485.
- [9] 徐晶晶,胡非,肖子牛,等. 风能模式预报的相似误差订正. 应用气象学报,2013,24(6):731-740.
- [10] 方艳莹,徐海明,朱蓉,等. 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究. 气象,2012,38(11):1378-1389.
- [11] 苗世光,孙桂平,马艳,等. 青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统研制与应用. 应用气象学报,2009,20(3):370-379.
- [12] 杨薇,苗峻峰,谈哲敏. 太湖地区湖陆风对雷暴过程影响的数值模拟. 应用气象学报,2014,25(1):59-70.
- [13] 王麟. WRF 模式在云南省风能资源评估中的适用性研究. 昆明:云南大学,2014.
- [14] 刘桂艳,高山红,王永明,等. 台风外围下沉区大气波导成因的数值模拟. 应用气象学报,2012,23(1):77-88.
- [15] 徐敬,马志强,赵秀娟,等. 边界层方案对华北低层 O_3 垂直分布模拟的影响. 应用气象学报,2015,26(5):567-577.
- [16] 马文通,朱蓉,李泽椿,等. 基于 CFD 动力降尺度的复杂地形风电场风电功率短期预测方法研究. 气象学报,2016,74(1): 89-102.
- [17] Wyngaard J C. Toward numerical modeling in the "terra incognita". *J Atmos Sci*, 2004, 61:1816-1826.
- [18] Henckes P, Knaut A, Obermüller F, et al. The benefit of long-term high resolution wind data for electricity system analysis. *Energy*, 2018, 143:934-942.
- [19] Cheng W, Steenburgh W. Evaluation of surface sensible weather forecasts by the WRF and the eta models over the Western United States. *Wea Forecasting*, 2015, 20(5):812-821.
- [20] Roux G, Liu Y, Monache L, et al. Verification of High-resolution WRF-RTFDDA Surface Forecasts over Mountains and Plains. 10th WRF Users' Workshop, 2009:20-23.
- [21] Mass C, Ovens D. WRF Model Physics: Problems, Solutions, and a New Paradigm for Progress//Preprints, 2010 WRF Users' Workshop, 2010.
- [22] Mass C. Improved Subgrid Drag of Hyper PBL Vertical Resolution? Dealing with the Stable PBL Problems in WRF. WRF Users' Workshop, 2012.
- [23] Mass C. Fixing WRF's High Speed Wind Bias: A New Sub-grid Scale Drag Parameterization and the Role of Detailed Verification//Preprints, 24th Conf on Weather and Forecasting/20th Conf on Numerical Weather Prediction. 2011.
- [24] Shimada S, Ohsawa T. Accuracy and characteristics of offshore wind speeds simulated by WRF. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 2011, 7(1):21-24.
- [25] Jiménez P, Dudhia J. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2012, 51(2):300-316.
- [26] Jiménez P, Dudhia J. On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2013, 52(7):1610-1617.
- [27] 郑亦佳,刘树华,缪育聪,等. YSU 边界层参数化方案中不同地形订正方法对地面风速及温度模拟的影响. 地球物理学报, 2016, 59(3):803-815.
- [28] 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. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(5):766-772.
- [29] 马晨晨,余晔,何建军,等. 次网格地形参数化对 WRF 模式在复杂地形区风场模拟的影响. 干旱气象, 2016, 34(1):96-105.

- [30] 张亦洲, 苗世光, 李青春, 等. 北京城市下垫面对雾影响的数值模拟研究. *地球物理学报*, 2017, 60(1): 22-36. with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Wea Rev.* 2006, 134: 2318-2341.
- [31] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package

Effects of a Modified Sub-grid-scale Terrain Parameterization Scheme on the Simulation of Low-layer Wind over Complex Terrain

Liu Yujue¹⁾ Miao Shiguang¹⁾ Liu Lei²⁾ Hu Fei²⁾³⁾

¹⁾ (Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

²⁾ (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

³⁾ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Due to the limited representation of observation over complex terrain, high resolution model becomes a favorable tool. Fine numerical simulation of wind field is quite important for micro-siting wind farms and wind energy resources assessment, especially in the complex terrain area. The accuracy of low-layer wind simulation over mountain area is one of the difficulties and key points in the field of wind energy research. The state-of-the-art WRF (Weather Research and Forecasting) model is one of the most widely used mesoscale numerical weather models for wind energy assessment in recent years. However, effects of sub-grid-scale topographic shape on surface wind field are not considered. With the new WRF version 3.4.1, a sub-grid-scale terrain parameterization scheme named Jiménez scheme is added into the YSU (Yonsei University) planet boundary layer parameterization scheme. The Jiménez scheme is designed aiming to reduce the systematic error of wind speed overestimation over valleys or plains and underestimation over hills conversely. However, correction effects of original WRF simulated 10 m wind speed by Jiménez scheme show great differences under different horizontal resolutions, particularly when over high hills. A series of sensitive numerical experiments are carried out under windy days for the Taihang Mountains in the west of Beijing-Tianjin-Hebei area. The main purpose of these experiments is to address some of issues regarding Jiménez scheme and try to solve the existing problems by establishing a relationship between the key topographic parameter C_t and the model grid spacing (dx/dy) to fit different numerical simulation for high resolution based on secondly SRTM topographic dataset. The simulated 10 m wind speed results of WRF without Jiménez scheme, with original Jiménez scheme and modified Jiménez scheme version are compared with observations of 3 automatic weather stations during the MOUNTAOM (MOUNTain Terrain Atmospheric Observations and Modeling) campaign which is prepared for 2022 winter Olympic Games. Results show that the modified Jiménez scheme can partially correct the error of the original Jiménez scheme at lower and higher resolutions. The simulated 10 m wind speed near the ground by modified version is closer to the actual condition. The correction method for Jiménez sub-grid-scale terrain scheme can provide reference for high resolution wind simulations over complex terrain and help users to obtain more detailed information on the surface wind field for wind energy related researches and applications.

Key words: WRF; complex terrain; sub-grid-scale terrain parameterization scheme; fine-resolution simulation