

CALMET时空分辨率对CALPUFF模拟浓度场的影响

康凌^{1,†} 朱好² 黄倩倩³ 刘新建⁴ 蔺洪涛⁵ 蔡旭晖¹ 宋宇¹ 张宏升⁶

1. 北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 北京 100871; 2. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082;
3. 北京城市气象研究院, 北京 100089; 4. 国家核应急响应技术支持中心, 北京 100071; 5. 中国核电工程有限公司,
北京 100840; 6. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; † E-mail: lkang@pku.edu.cn

摘要 采用WRF输出的逐小时1 km分辨率预报风场作为CALMET诊断模式的输入,生成不同时空分辨率的CALMET诊断风场,耦合CALPUFF得到逐分钟50 m分辨率浓度场,在此基础上分析CALMET气象场时空分辨率对浓度场的影响,并统计不同气象时空分辨率方案的计算耗时。结果表明,当风向稳定且风速较大时,较粗的时空分辨率亦能得到满意的风场和浓度场;当风向转变且风速较小时,时空分辨率对诊断风场和浓度场影响显著,不同气象方案的浓度场差异可以高达40%;风场转变期间,当CALMET的时间步长大于30 min时,加密气象网格会降低浓度场的模拟精度,时间步长越长,浓度场偏离越显著。综合考虑计算耗时和浓度场模拟准确性,推荐在大气污染事故应急预案中采用10 min时间步长和400 m网格距的CALMET气象方案。

关键词 CALMET/CALPUFF模式系统; 时空分辨率; 风场; 浓度场; 计算耗时

Impact of Temporal and Spatial Resolution of CALMET on the Simulated Concentration Fields of CALPUFF

KANG Ling^{1,†}, ZHU Hao², HUANG Qianqian³, LIU Xinjian⁴, LIN Hongtao⁵, CAI Xuhui¹,
SONG Yu¹, ZHANG Hongsheng⁶

1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082; 3. Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089; 4. National Nuclear Emergency Response Technical Assistance Center, Beijing 100071; 5. CNNC China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840; 6. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; † E-mail: lkang@pku.edu.cn

Abstract The hourly WRF forecast wind fields with a resolution of 1 km is used as the input of the CALMET diagnostic model to generate wind fields with different temporal and spatial resolutions, which drive CALPUFF to obtain concentration fields with a resolution of 50 m per minute. The impact of the temporal and spatial resolution of CALMET meteorological fields on the concentration fields and the calculation time of each scheme are analyzed. The results show that satisfactory wind field and concentration field can be obtained even with coarse temporal and spatial resolution at stable wind direction and high wind speed conditions. The temporal and spatial resolution has a significant impact on the wind and concentration fields when the wind direction changes and the wind speed is low. The difference between concentration fields driven by various meteorological schemes can be as high as 40%. During the transition of the wind field, the accuracy of the concentration field will worsen with finer meteorological grid if the modeling time step of CALMET is greater than 30 minutes. The longer the modeling time step is, the more significant the deviation of the concentration field is. Considering the calculation time and the accuracy of the concentration field simulation, CALMET meteorological scheme with a time step of 10 min and a grid resolution of 400 m is recommended in the emergency early warning of air pollution accidents.

Key words CALMET/CALPUFF modeling system; temporal and spatial resolution; wind field; concentration field; computational time

CALMET/CALPUFF 模式系统是美国国家环境保护局推荐的适用于长距离输送和涉及复杂流动(如复杂地形、海岸、小静风、熏烟和环流情形等)近场应用的导则模式^[1],也是2018版《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 2.2—2018)^[2]推荐模型之一。CALMET 是一个包含诊断风场和水陆边界层微气象学模块的气象模式, CALPUFF 是一个用来模拟非稳态、多层、多物种污染的高斯烟团扩散模式。CALMET 与 CALPUFF 结合,可以处理许多重要的复杂地形效应,包括气象场的空间变化、弯曲烟羽轨迹以及烟羽地形的相互作用等。CALMET/CALPUFF 模式系统适合于粗糙、复杂地形条件下的大气扩散模拟^[3-4]。

近年来, CALMET/CALPUFF 模式系统在大气环境污染事件模拟中得到越来越广泛的应用。该模式系统利用中尺度气象模式预报场,经 CALMET 风场诊断模式降尺度得到高分辨率的气象场,作为 CALPUFF 等大气扩散模式的输入^[4]。该方法充分考虑地形动力学效应、坡度流及地形热力学阻碍效应,能够得到与局地地形相符的精细的风场^[5]。朱俊涛等^[6]采用 WRF-CALMET 模式模拟事故区域的高分辨率气象场,耦合随机模式模拟污染物的扩散过程。王娜等^[7]采用 WRF-CALMET 模拟得到的高分辨率气象场耦合 CALPUFF 扩散模型,模拟化工园区突发性大气污染事故。郑宇凡等^[8]使用 WRF 和 CALMET 模式,结合随机粒子扩散模式,比较并评估预报模拟偏差。黄昕等^[9]采用 WRF-CALMET-CALPUFF 模式系统,研发一套突发性大气环境污染事件应急预警系统,风场和浓度场的输出间隔可以精确至分钟。

鉴于风场模拟精度对污染物浓度场预报的重要作用,一些研究者对比分析 WRF-CALMET 模式对风场的模拟效果^[5,10-11],结果表明 WRF 与 CALMET 结合的方法既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,在最大程度上体现局部地形的影响,又能有效地提高风场预报数据的时空分辨率。但是, WRF 水平分辨率对 CALPUFF 短时间(如小时)浓度场有显著影响^[12],一些研究者推荐采用 1 km 分辨率的 WRF 预报场作为 CALMET 的输入进行诊断分析^[6,12],以期进一步获得时空分辨率更细的气象要

素场。

在突发性大气污染事故应急预警中,模拟的准确性和时效性是两个互相掣肘的因素。提高时效性往往需要降低网格分辨率,会造成模拟精度下降。Oleniacz 等^[13]通过研究局地尺度范围内 CALMET/CALPUFF 模式系统水平网格分辨率对空气质量预报结果的影响,指出降低网格分辨率会导致对高浓度值的低估。伯鑫等^[14]指出,在气象网格分辨率较粗时, CALPUFF 可采用多密度离散网格受体或嵌套因子生成更密的采样网格,以便获得空间分辨率更高的浓度场。

为了在突发性大气污染事故应急预警中及时做出尽可能准确的风险评估和救援决策,本文以华北地区某假想化工厂泄漏为例,以中尺度气象模式 WRF 输出的模拟区域逐小时 1 km 分辨率三维气象场作为 CALMET 诊断模式的初始猜测场,经过 CALMET 地形调整和时间插值,得到不同时空分辨率的气象场,并以此作为 CALPUFF 烟团模式的气象输入。采用嵌套因子生成 CALPUFF 烟团模式 50 m 分辨率的采样网格,进一步计算模拟区域逐分钟 50 m 空间分辨率(该分辨率可满足近场精细模拟的需求^[2])的浓度场。通过对比不同 CALMET 气象方案的计算耗时和网格浓度场,推荐满足模拟精度和预报时效性要求的气象方案。

1 模式、资料与方法

本文的研究区位于我国华北地区,处于山区与平原的过渡地带,西部和北部被连绵的山脉环绕,沿东南方向渐入平原。本文研究范围为以假想厂址(39.73°N, 115.96°E)为中心的 10 km × 10 km 区域,地形起伏较大,西北高,东南低,西北角的海拔高度在 1000 m 以上,沿东南方向逐渐降低,最低海拔高度在 50 m 以下。采用中尺度气象模式 WRF 输出的模拟区域逐小时 1 km 分辨率气象场作为 CALMET 诊断模式的输入,经 CALMET 网格细化、地形调整和时间插值,得到不同时空分辨率的诊断风场,再耦合 CALPUFF 烟团模式,进行泄漏扩散模拟。

1.1 WRF 模式

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是美国国家环境预报中心开发的新一代高分辨率中尺

度天气预报模型, 包含湍流交换、大气辐射、积云降水、云微物理以及陆面等多种物理过程的参数化方案。水平方向采用高精度的 Arakawa C 格点, 垂直方向采用地形追随质量坐标系。由于引入非静力平衡效应, 可以模拟较小空间尺度的复杂的天气系统^[9]。

本研究采用 WRF V3.9.1 版本, 模拟使用的初始化数据来源于美国国家环境预报中心提供的时间间隔 6 h, 空间分辨率为 1°×1°的 FNL(Final Operational Global Analysis)全球分析数据, 地理信息数据采用美国地质勘探局地形高度和 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)地表分类资料。本文采用双向反馈四重嵌套网格, 外层网格覆盖京津冀、山西、山东、内蒙古东部以及河南北部地区, 网格数为 46×46, 网格距为 27 km。内层网格以厂址为中心, 网格数为 40×40, 网格距为 1 km。从地面至 50 hPa 高度, 垂直方向不等距地分为 37 层, 其中 2 km 以下的低层大气划分为 19 层, 以便精细地刻画大气边界层特征。表 1 列出 WRF 模式采用的参数化方案和相关参数设置。

1.2 CALMET/CALPUFF 模式

CALMET(California Meteorological Model)气象模式包括一个诊断风场模块和一个水-陆面边界层微气象学模块。诊断风场模块采用两步方案计算风场: 1) 初始猜测场经过地形动力学效应、坡度流和地形热力学阻碍效应, 产生第一步风场; 2) 第一步风场和观测资料通过客观分析, 产生第二步风场(最终风场)。第一步风场和第二步风场的计算过程均满足质量守恒约束^[4]。预报风场可分别作为初始猜测风场、替代第一步风场和客观分析时的“观测资料”引入 CALMET。本文将 WRF 输出的格点预报场作为初始猜测场, 即首先将预报风场插值到精细尺度的 CALMET 网格, 然后进行通常的细尺度地形诊断调整。该方案包含精细尺度地形效应。

CALMET 使用的地形高程资料是分辨率为 30

m 的 SRTM1 数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>), 土地利用数据是分辨率为 30 m 的 GLOBELAND30 V2010 数据^[15]。模拟区域地形和土地利用状况都较复杂, 西部和北部大部分地区为林地覆盖, 中东部农田和林地相间分布, 北部有水体分布(图 1)。

模拟范围内自地面至 3000 m 高度, 垂直方向不等距地分为 10 层, 各层的高度分别为 20, 40, 80, 160, 300, 600, 1000, 1500, 2200 和 3000 m。为了对比不同时空分辨率的气象场对模拟浓度场的影响, CALMET 模拟时间步长分别设为 1, 5, 10, 30 和 60 min, 水平网格分辨率分别设为 50, 100, 200 和 400 m。

CALPUFF(California Puff Model)扩散模式利用 CALMET 产生的时间和空间变化的气象场, 将从排放源释放出的烟团平流输送, 并模拟其在输送路径上的扩散和转化过程。根据输入数据的不同, CALPUFF 提供不同的扩散计算选项。本文采用默认扩散方案, 利用 CALMET 输出的微气象学参数, 根据相似性理论, 计算水平和垂直扩散参数。

本文采用一个假设的恒定释放源, 以便排除不同气象方案释放源的时间变化对浓度场的影响。假定释放源位于模拟中心, 高度为 1 m, 释放孔径为 0.1 m, 出口速度为 1 m/s, 释放速率为 3 kg/s。分别采用 CALMET 输出的不同时空分辨率的气象场, 计算模拟范围内逐分钟、50 m 分辨率采样网格的浓度场。由于各方案气象网格距不同, CALPUFF 浓度场计算范围与采样网格数略有差异(表 2)。本文采用的 CALMET 和 CALPUFF 版本分别为 v6.334 和 v6.42。

1.3 一致率统计方法

通常采用现场观测、解析求解或数值模拟方法获取流场和浓度场。研究区域地形和下垫面类型较复杂, 且无现场实测资料, 无法采用解析求解或实测数据进行对比。CALMET 模式为诊断模式, 无次网格参数化影响, 从理论上讲, 模拟时空分辨率越

表 1 WRF 模式物理方案及参数设置

Table 1 Physical schemes and parameter setting of WRF

区域	水平分辨率/km	水平网格数	垂直分辨率	长波辐射方案	短波辐射方案	微物理方案	边界层方案	近地面层方案	陆面过程方案
D01	27	46×46							
D02	9	46×46							
D03	3	34×34	37 层	RRTMG 方案	RRTMG 短波方案	New Thompson 方案	Shin-Hong 方案	Monin-Obukhov 方案	Noah 陆面过程方案
D04	1	40×40							

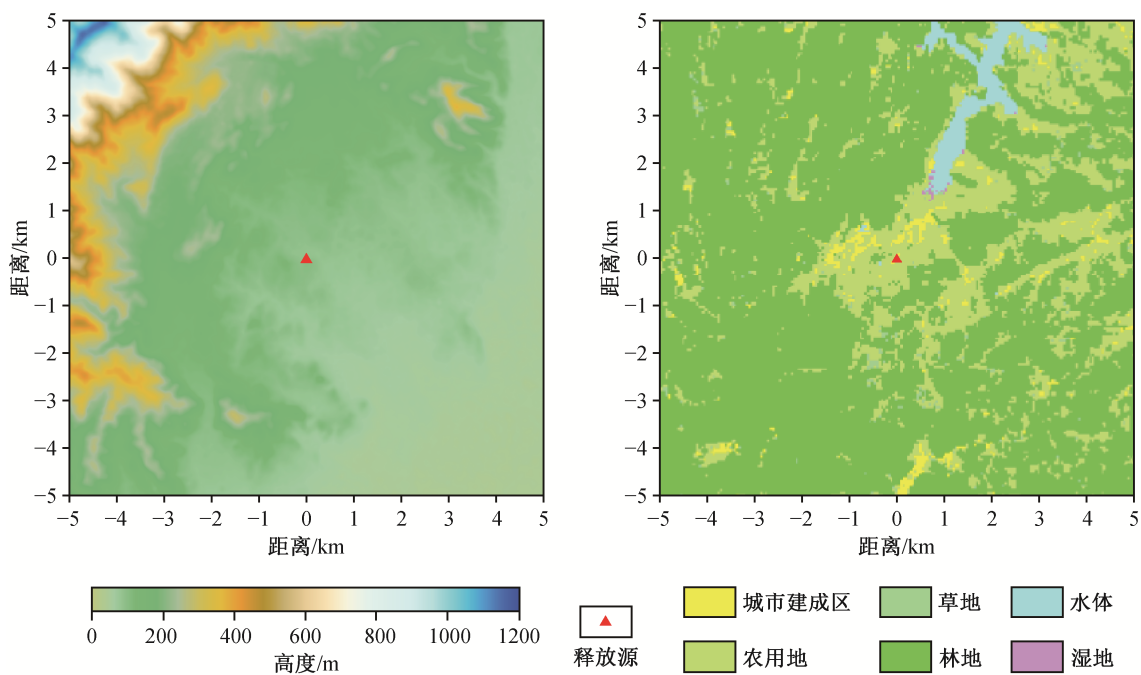


图 1 模拟区域内地形(左)和土地利用状况(右)

Fig. 1 Terrain (left) and land use (right) of the modeling domain

表 2 模拟方案及网格设置

Table 2 Modelling schemes and grid settings

方案编号	方案代码	CALMET 设置			CALPUFF 采样网格数
		时间步长/min	空间分辨率/m	网格数	
1	01min_050m	1	50	200×200	200×200
2	01min_100m	1	100	100×100	199×199
3	01min_200m	1	200	50×50	197×197
4	01min_400m	1	400	25×25	193×193
5	05min_050m	5	50	200×200	200×200
6	05min_100m	5	100	100×100	199×199
7	05min_200m	5	200	50×50	197×197
8	05min_400m	5	400	25×25	193×193
9	10min_050m	10	50	200×200	200×200
10	10min_100m	10	100	100×100	199×199
11	10min_200m	10	200	50×50	197×197
12	10min_400m	10	400	25×25	193×193
13	30min_050m	30	50	200×200	200×200
14	30min_100m	30	100	100×100	199×199
15	30min_200m	30	200	50×50	197×197
16	30min_400m	30	400	25×25	193×193
17	60min_050m	60	50	200×200	200×200
18	60min_100m	60	100	100×100	199×199
19	60min_200m	60	200	50×50	197×197
20	60min_400m	60	400	25×25	193×193

高,气象场和浓度场的精度越高。在突发大气污染事故应急响应中,污染物的空间分布和浓度值均是决策的重要考量。因此,本文以 1 min 时间步长和 50 m 空间分辨率(简称 01min_050m 方案)气象场及相应的逐分钟 50 m 空间分辨率浓度场为基准,表 2 中其他 19 种方案浓度场和气象场分别与该方案结果进行逐网格对比,统计网格浓度以及网格风向和风速的一致率。

在应急预案中,浓度场是主要评估要素,风场作为大气扩散驱动因子,直接影响浓度场分布。为了充分地评估不同方案的浓度场一致率,本文对不同方案的风场一致率也进行分析。风场一致率的评价方法参照文献[16],即分别将方案 2~20 的地面 10 m 高度气象网格的风向和风速与方案 1 同层网格的风向和风速对应地进行比较,将风速相差在 2 倍以内、风向偏差小于一个风向角(22.5°)分别作为风速和风向一致的判别标准,进一步统计符合标准的百分比,分别称为风速一致率和风向一致率。

表 2 显示,不同方案 CALMET 的气象网格数和时间步长均不同。从空间角度看,100 m 分辨率风场的一个格点值代表以该格点为中心、周围 2×2 个 50 m 分辨率的格点平均值,200 m 分辨率和 400 m 分辨率的一个格点值分别代表周围 4×4 和 8×8 个 50 m 分辨率的格点平均值。从时间步长角度看,某时刻 1, 5, 10, 30 和 60 min 风场分别代表该时刻之后 1, 5, 10, 30 和 60 min 风场平均值。为了进行不同方案之间风向和风速的时空对比,在时间方面,将 1 min 风场与包含该分钟的较长时间步长的平均风场进行逐分钟对比;空间方面,将 50 m 分辨率格点值与代表该格点平均值的粗网格格点值逐个进行对比。按照上述判别标准,统计逐分钟和总模拟时段内风速和风向一致率。

浓度场的定量评估分别采用 3 种统计量:两倍范围百分比 FAC2 (fraction within a factor of two)、部分偏差 FB (fractional bias) 和归一化均方根误差 NMSE (normalized mean square error)。FAC2 为满足 $0.5 \leq C_2/C_1 \leq 2.0$ 的数据占比,

$$FB = (\bar{C}_1 - \bar{C}_2) / (0.5(\bar{C}_1 + \bar{C}_2)),$$

$$NMSE = \frac{\overline{(C_1 - C_2)^2}}{\overline{C_1 C_2}},$$

其中, C_1 为 01min_050m 方案的逐分钟网格浓度模拟值, C_2 为其他方案的逐分钟网格浓度模拟值。FB 和 NMSE 分别为平均相对偏差和平均相对离散的程度。

量。由于不会过多地受异常值影响, FAC2 被认为是最可靠的统计指标。Chang 等^[17]通过总结前人的研究成果发现,当 $-0.3 < FB < 0.3$, $NMSE < 3$ 时,模式模拟效果良好。本文直接采用各方案分钟网格浓度模拟值进行逐分钟逐网格的统计量计算,统计逐分钟 FB 和 NMSE 满足上述条件的百分比以及逐分钟的 FAC2,分别称为 FB 一致率、NMSE 一致率和 FAC2 一致率。

2 模拟结果

本文采用 Intel i9-9900K 3.6GHz 处理器和 64G 内存进行模拟计算。由于 1 min 时间步长的 CALMET 气象场计算相当耗时,本文选取 2020 年 2 月 2 日 03:00—17:00 时共 15 个小时为气象场和浓度场模拟时段,包含风场典型日变化。图 2 给出经 CALMET 动力诊断后释放点处风速和风向的时间变化曲线,可见 1, 5 和 10 min 时间步长的风速和风向曲线一致性较好,11:00 左右,风向从偏南风转变为偏北风,风速降到最低值 1 m/s 以下。60 min 时间步长的风速和风向转折点出现在 10:00 左右,30 min 时间步长的风速和风向转变时间介于 1 min 方案与 60 min 方案之间,这与 CALMET 内部时间插值算法及风速和风向的时间代表性相关。总体而言,10:00—12:00 为风场转变时段,10:00 之前和 12:00 之后风向平稳,风速较大。因此,本文将模拟时段划分为风场转变前(03:00—10:00)、转变中(10:00—12:00)以及转变后(12:00—17:00)3 个时段,分别计算并且对比 3 个时段的浓度场一致率和风场一致率,以便了解各方案在不同气象条件下对风场和浓度场的模拟效果。

2.1 风场一致率对比

气象场(尤其风场)是驱动污染气体扩散的主要动力,风场模拟结果对浓度场预报的准确性有重要影响。从图 3 可见,风场转变前,各方案风速一致率均高于 93%,风向一致率为 68.8% (60min_400m 方案)~99.5% (05min_050m 方案);风场转变过程中,不同方案的风速和风向一致率差异较大,风速一致率为 71.2% (60min_400m 方案)~99.5% (05min_050m 方案),风向一致率为 57.8% (60min_400m 方案)~97.4% (05min_050m 方案);风向转变后,风速增大,风向平直,各方案的风向和风速一致率均高达 98% 以上。从全时段来看,风向一致率为 77.8%~99.3%,风速一致率为 91.9%~99.9%,风向和风速一

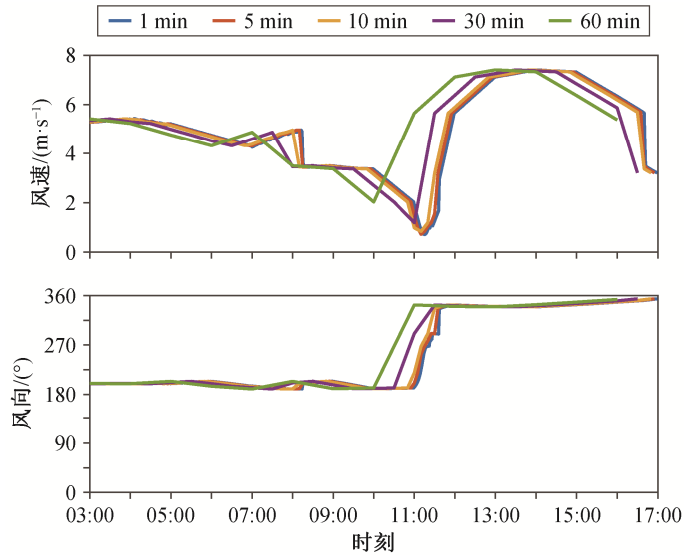


图 2 释放点处不同时间步长方案风向和风速随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of wind direction and wind speed with various time-step schemes at the release point

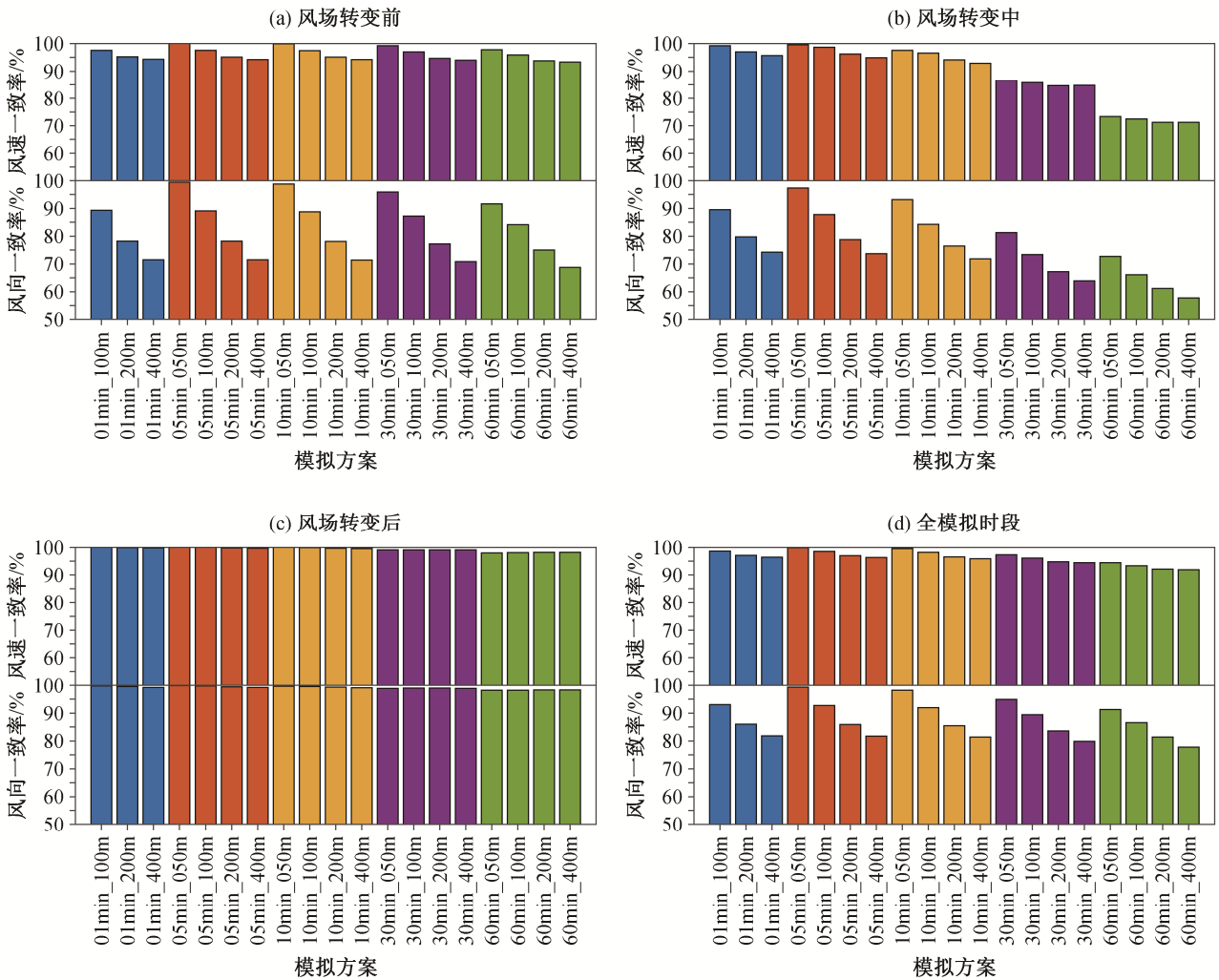


图 3 各模拟方案风场一致率对比

Fig. 3 Comparison of wind field consistency rates of various modelling schemes

致率最高的是 05min_050m 方案, 最低的是 60min_400m 方案。

对于同一时间步长, 随着网格距增加, 风向和风速一致率均降低, 风向一致率的降低更显著, 全模拟时段最大差异可达 18%, 风场转变期间, 风向一致率差异甚至高达 25%。对于同一网格分辨率, 1~10 min 时间步长的风向和风速一致率差异很小, 30~60 min 时间步长的风向和风速一致率略有降低, 各方案间风向一致率差异在 8% 以内, 但在风场转变期间, 由于 60 min 风场转变时刻比 1 min 风场提前约 1 小时(图 2), 导致该时段内 1 min 与 60 min 时间步长的风向和风速一致率差异高达 25% 左右。

为了探讨地形对 CALMET 诊断风场的影响, 图 4 给出假定平坦地形情况下风场转变期间各方案风向和风速的一致率。与考虑复杂地形情况(图 3 (b))相比, 平坦地形条件下风向一致率显著提高, 对于小于 10 min 步长的所有方案, 风向一致率均高于 85%; 对于 60min_400m 方案, 风向一致率也高于 70%。相对而言, 地形复杂程度对风速一致率的影响比较小。对于风场转变前后风速较大、风向较稳定时段, 平坦地形条件下各方案风向一致率均高于 95%, 风速一致率高于 98%。可见, 地形动力学、斜坡流以及热力学阻塞等地形调整对 CALMET 整体风场的影响较为显著, 尤其当风向转变和风速较小时。

2.2 浓度场一致率对比

在突发大气污染事故应急预警中, 需要给出时空分辨率尽量精细的浓度场, 以便对应急预案的制

定提供实时动态和尽可能精确的指导。本文采用不同的气象方案, 模拟计算 1 min 时间分辨率和 50 m 空间分辨率的浓度场, 并采用 3 种统计指标(FAC2, FB 和 NMSE)来对比不同方案在不同气象条件下模拟的浓度场。

图 5~7 分别对比风场转变前、转变中、转变后和全模拟时段各方案浓度场 3 种统计指标的一致率。从整体上看, 各时段 3 种指标一致率分布规律相近。风场转变前后, 各方案浓度场一致率均很高, 且不同方案之间的差异较小; 风场转变期间, 各方案浓度场一致率均降低, 尤其是 60 min 各方案的下降更显著。对于所有方案, FAC2 一致率均比 FB 一致率高, 全时段偏高幅度在 2.2%~3.2% 之间, 风场转变期间的偏高幅度在 1.4%~10.2% 之间; FAC2 一致率均比 NMSE 一致率低, 全时段各方案偏低幅度在 1%~3% 之间, 风场转变期间偏低幅度在 2.4~8.6% 之间。由于 3 种指标一致率的差异较小, 所有方案整体偏高或偏低趋势相同, 加上 FAC2 指标简便易用且可靠性强, 故下面的分析以 FAC2 一致率为主。

从图 5 可见, 对于全模拟时段, 各方案浓度场的 FAC2 一致率为 88.4%(60min_200m 方案)~98.2%(05min_050m 方案)。风场转变前后, 各方案浓度场的 FAC2 一致率分别高于 90% 和 96%。其中, FAC2 一致率最高的是 05min_050m 方案, 分别为 98.9% 和 99.7%, 最低的是 60min_400m 方案。风场转变前后, 在同一时间步长下, 随着气象网格距的增加, FAC2 一致率略有降低。风场转变期间, FAC2 一致率的变化范围为 52.3%(60min_050m 方案)~91.9%(05min_050m 方案)。对于 1 min 和 5 min 步长, FAC2 一致率随着气象网格距的增加而降低; 对于 10 min 步长, 变化不显著; 随着时间步长增加, 对于 30 min 和 60 min 步长, FAC2 一致率呈现随气象网格距增加而增大的趋势, 且 60 min 步长更加显著, 与风场一致率的变化趋势相反。

为了进一步考察上述现象, 图 8 给出各方案浓度场的 FAC2 一致率的时间变化曲线。可见, 随着时间步长的增加, 风场转变期(10:00—12:00) FAC2 一致率谷值越来越低。对于 1 min 和 5 min 风场, 气象网格分辨率越粗, 一致率越低; 对于 10 min 风场, 转变期不同气象网格距的几条曲线几乎重合; 对于 30 min 和 60 min 风场, 气象网格分辨率越细, FAC2 一致率曲线开始下降的时间越早, 4 条曲线在谷值

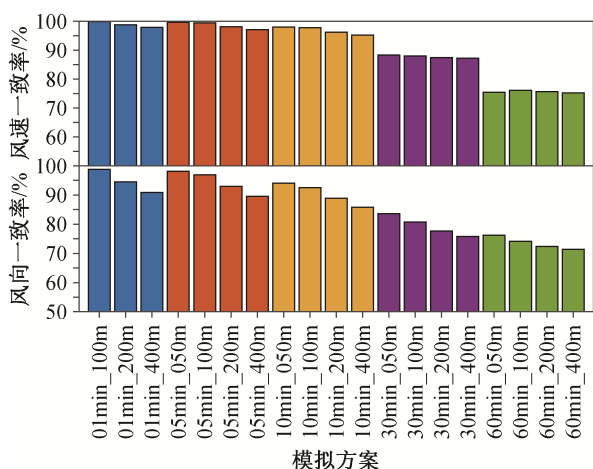


图 4 均一平坦下垫面风场转变期间的风场一致率
Fig. 4 Wind field consistency during wind shift period over uniform and flat underlying surface

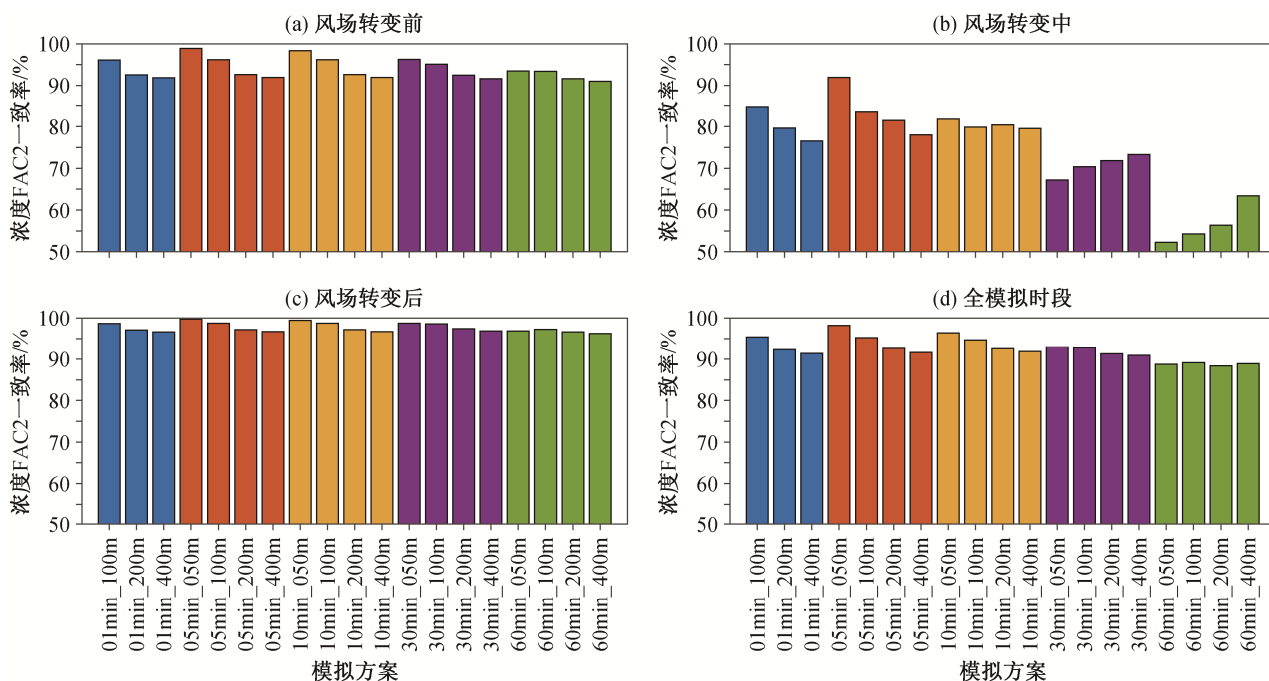


图 5 各模拟方案浓度场 FAC2 一致率对比

Fig. 5 Comparison of concentration FAC2 consistency rates of various modelling schemes

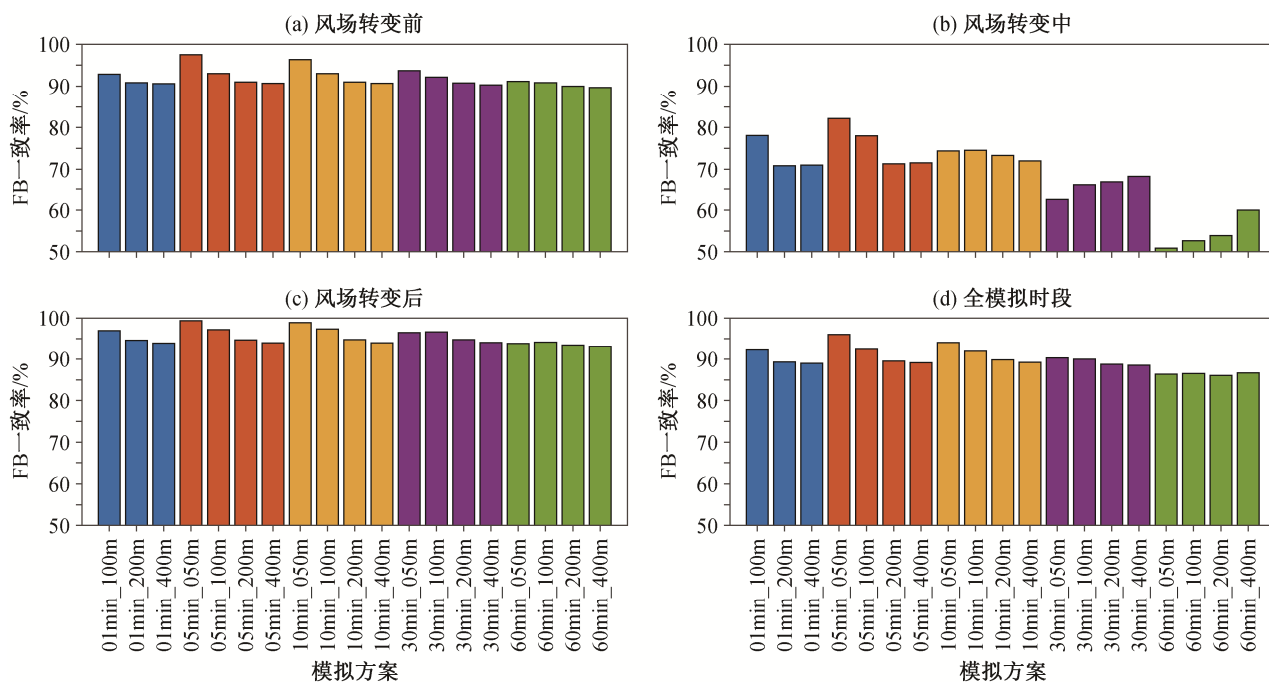


图 6 各模拟方案浓度场 FB 一致率对比

Fig. 6 Comparison of concentration FB consistency rates of various modelling schemes

处几乎重合，随着风场转变期的结束，一致率同时升高。因此，对于不同时间步长的风场，转变期间一致率随气象网格距的变化趋势不同。

从图 9 可见，对于 60 min 时间步长的各方案，

随着气象网格加密，烟羽扩散更加向东偏转，即当气象场时间步长较大而浓度场时间步长较小时，加密气象网格能加快浓度场的转变。这一现象的成因有待进一步研究，初步判断，一方面与 CALPUFF

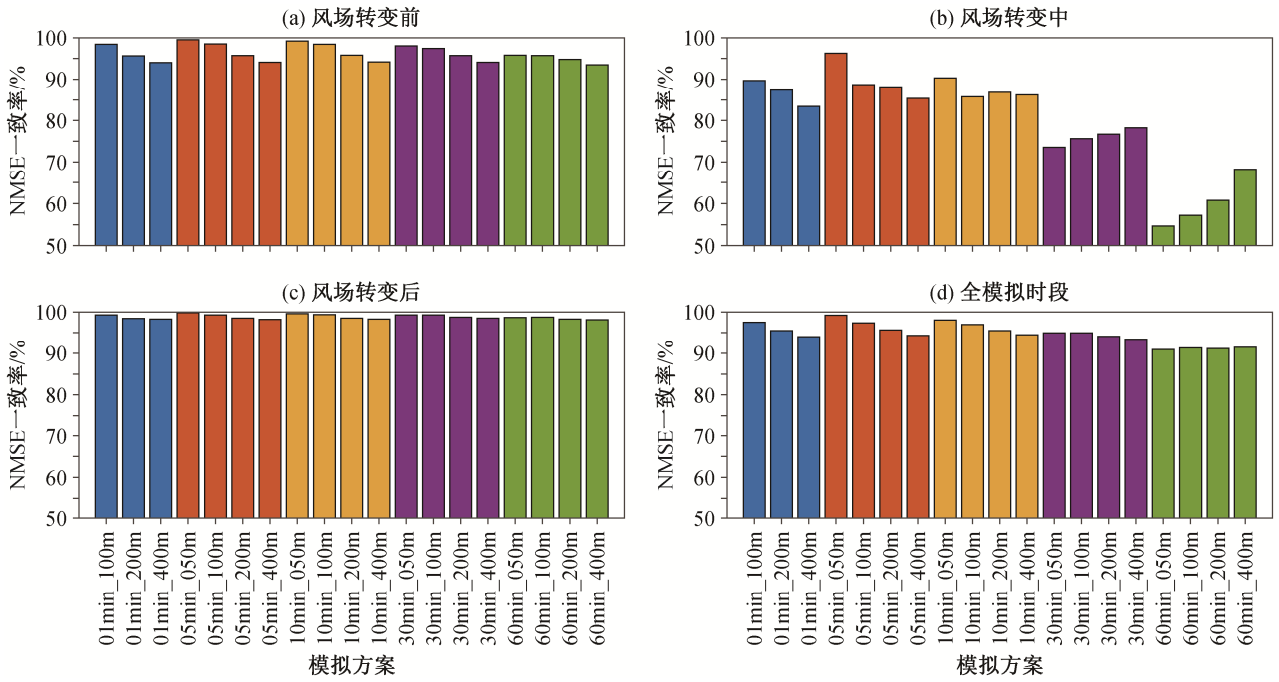


图 7 各模拟方案浓度场 NMSE 一致率对比

Fig. 7 Comparison of concentration NMSE consistency rates of various modelling schemes

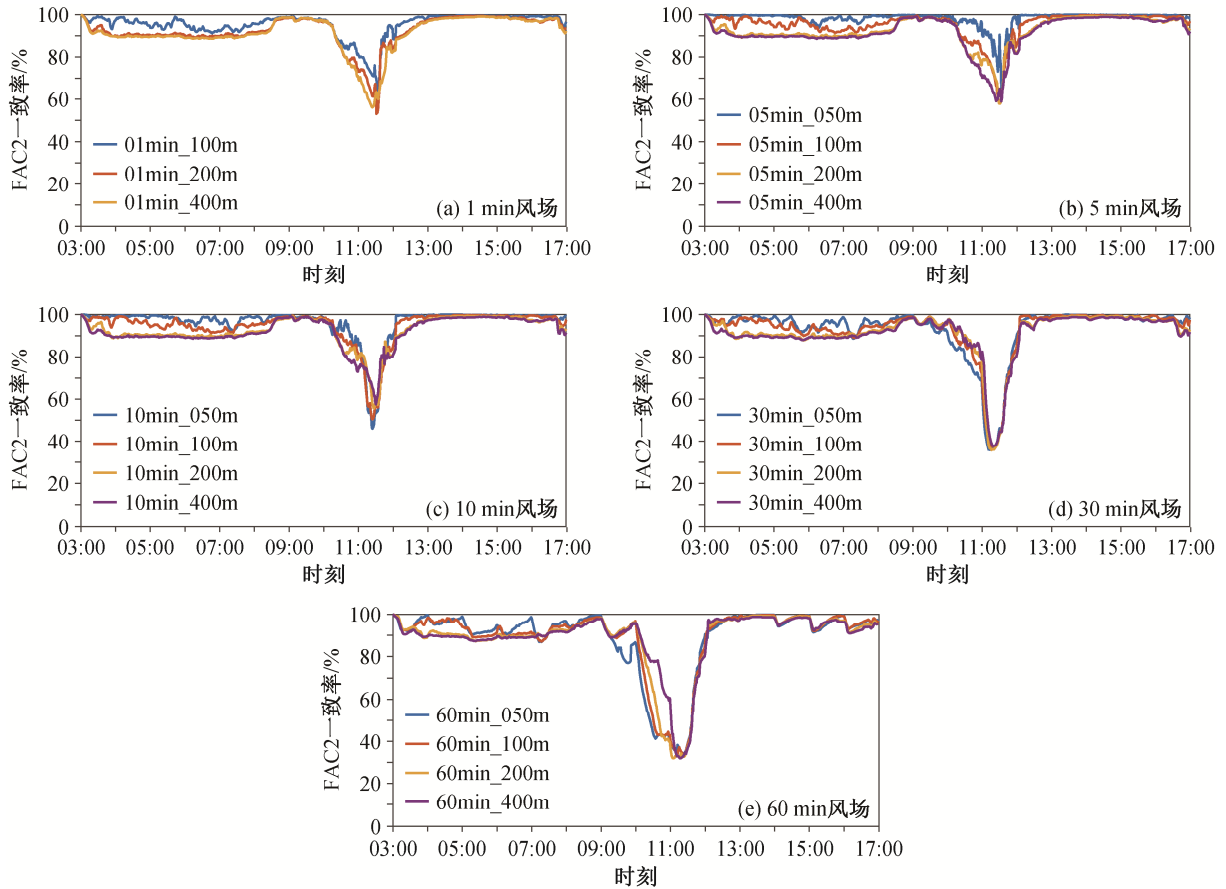


图 8 各模拟方案浓度场 FAC2 一致率时间序列

Fig. 8 Temporal variation of concentration FAC2 consistency rates of various modelling schemes

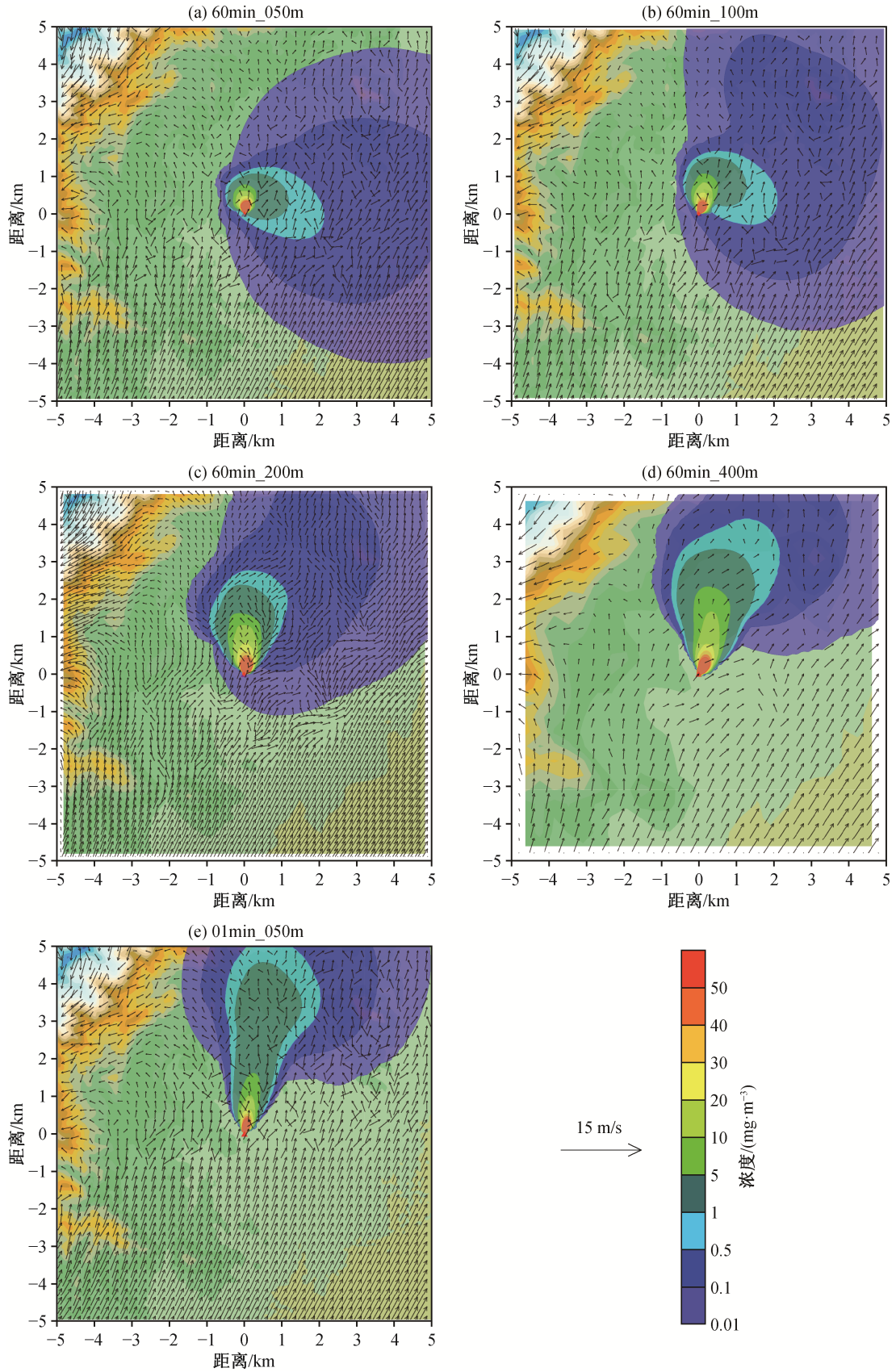


图 9 60 min 时间步长不同气象网格距方案 10:30 的浓度场与 01min_050m 方案浓度场对比
 Fig. 9 Comparison of concentration fields between 60 min time-step schemes and 01min_050m scheme at 10:30

表 3 各方案模拟机时及浓度场一致率
Table 3 Computational time and concentration consistency rates for various modelling schemes

方案	CALMET 计算耗时/min	CALPUFF 计算耗时/min	总耗时/min	浓度场 FAC2—致率/%		浓度场 FB—致率/%		浓度场 NMSE—致率/%		是否为 可选方案
				全时段	风场转变期	全时段	风场转变期	全时段	风场转变期	
01min_050m	1412.20	0.83	1413.03	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	否
01min_100m	100.75	0.33	101.08	95.4	84.7	92.2	78.1	97.5	89.7	否
01min_200m	9.20	0.27	9.47	92.3	79.7	89.3	70.9	95.5	87.4	否
01min_400m	1.48	0.23	1.71	91.4	76.5	89.0	71.0	94.0	83.4	是
05min_050m	281.90	0.52	282.42	98.2	91.9	96.0	82.2	99.2	96.2	否
05min_100m	20.12	0.32	20.44	95.3	83.5	92.4	78.0	97.4	88.6	否
05min_200m	1.85	0.25	2.10	92.7	81.5	89.5	71.3	95.6	88.1	否
05min_400m	0.30	0.23	0.53	91.7	78.0	89.1	71.5	94.3	85.4	是
10min_050m	144.05	0.53	144.58	96.4	81.8	94.1	74.4	98.1	90.3	否
10min_100m	10.35	0.32	10.67	94.7	79.8	91.9	74.5	96.9	85.8	否
10min_200m	0.95	0.25	1.20	92.5	80.4	89.8	73.3	95.5	86.8	是
10min_400m	0.17	0.22	0.39	91.9	79.6	89.2	72.0	94.5	86.2	是
30min_050m	48.50	0.52	49.02	93.0	67.2	90.3	62.6	95.0	73.5	否
30min_100m	3.47	0.30	3.77	92.8	70.3	90.0	66.1	95.0	75.6	否
30min_200m	0.33	0.27	0.60	91.3	71.9	88.8	66.8	94.1	76.7	是
30min_400m	0.07	0.25	0.32	90.9	73.3	88.5	68.3	93.4	78.2	是
60min_050m	25.82	0.43	26.25	88.8	52.3	86.4	50.9	90.9	54.6	否
60min_100m	1.82	0.27	2.09	89.2	54.3	86.6	52.6	91.3	57.2	否
60min_200m	0.18	0.22	0.40	88.4	56.3	86.1	53.9	91.2	60.7	否
60min_400m	0.05	0.22	0.27	88.9	63.4	86.7	60.0	91.5	68.2	否

说明: 粗体字为推荐的 6 种可选方案。

浓度场计算的时间插值方案有关,另一方面可能与 CALMET 诊断风场的地形调整及不同粗细网格上的微气象学参数计算有关,微气象学参数决定烟团扩散参数,上述因素的叠加影响使得风场转变期间不同气象网格距方案对应的某时刻地面浓度场有较显著的差别。从图 2 可见,60 min 风场转变时间比 1 min 风场提前,浓度场对风场变化的响应加快,使得 60min_050m 方案浓度场与 01min_050m 方案偏离较大,而慢响应的 60min_400m 方案浓度场分布特征与 01min_050m 方案吻合较好,烟羽均呈现向北扩散的形态。

3 模拟方案推荐

计算时间是大气污染事故应急预案评估的重要考虑因素,国家重点研发计划项目《突发事件大气预警模型开发与集成及事故溯源技术》(2017YFC0209904)中要求,若大气扩散预报模块的预报时效为 72 小时,则扩散模式计算时间不超过 10 分钟。本文案例的模拟时长为 14 小时,根据上述要求,扩散模拟的计算时间应不超过 2 分钟。

因风向平直且风速较大时,各方案网格浓度的 FAC2 一致率均高于 90%(图 5),本文重点考虑风场转变期间各方案浓度场模拟的准确度。如前所述,FB 一致率比 FAC2 一致率总体上略偏低,NMSE 一致率比 FAC2 一致率总体上略偏高。从应用角度考虑,以含义直观明了且与 FB 和 NMSE 一致率具有相同变化趋势的 FAC2 一致率作为模拟准确度的度量指标。

综合考虑计算耗时和浓度场模拟准确性两方面的要求,以风场转变期间浓度场 FAC2 一致率高于 70%,CALMET/CALPUFF 模式系统计算耗时不超过 2 分钟(14 小时模拟时长)为方案筛选要求,表 3 列出推荐的 6 种可选方案,其中模拟准确度最高的是 10min_200m 方案,转变期间浓度场 FAC2 一致率为 80.4%,计算耗时 1.2 分钟;耗时最短的是 30min_400m 方案,总耗时为 0.32 分钟,转变期间浓度场 FAC2 一致率为 73.3%。从总体上看,10min_400m 方案最优,耗时 0.39 分钟,转变期间浓度场 FAC2 一致率接近 80%,FB 和 NMSE 一致率分别为 72.0% 和 86.2%,满足实际应用需求。

4 结论

本文以华北地区某假想化工厂泄漏为例,采用

WRF 输出的逐小时 1 km 分辨率预报风场作为 CALMET 诊断模式的输入,生成 1, 5, 10, 30 和 60 min 5 种时间步长,50, 100, 200 和 400 m 4 种空间分辨率,共 20 种时空分辨率组合的 CALMET 风场,将这 20 种方案的风场结合 CALPUFF 模式,模拟计算逐分钟 50 m 分辨率的浓度场。通过统计和评估不同方案的气象场、浓度场一致率及计算耗时,结合突发事件大气预警模型对大气扩散模块预报时效性和准确性的要求,给出推荐方案,主要结论如下。

1) 逐小时 1 km 的 WRF 预报场经过 CALMET 时空细化插值以及动力诊断后,不同的时间步长会出现风场转变时刻不一致的现象。诊断风场的时间步长越短,风场转变时刻越滞后。这一现象的产生可能与 CALMET 内部时间插值算法以及风速和风向时间代表性相关。后续工作中,可以结合实际观测进行对比验证。

2) 风向稳定且风速较大时,较粗的时空分辨率亦能得到满意的风场;当风向转变且风速较低时,时空分辨率对诊断风场的影响较大,随着空间分辨率降低,风向和风速一致率均降低,风向一致率的降低更显著。地形调整对 CALMET 整体风场的影响较显著,对风向的影响大于风速,尤其当风向转变且风速较小时。

3) 各方案中, FAC2, FB 和 NMSE 一致率的分布规律相近。所有方案中, FAC2 一致率比 FB 一致率均略为偏高,比 NMSE 一致率均略为偏低。风向稳定且风速较大时,各方案中浓度 FAC2 一致率均高于 90%;风场转变期间,浓度一致率变化幅度较大,在 52.3%(60min_050m 方案)~91.9%(05min_050m 方案)之间。

4) 当采用 30 min 或逐小时风场计算逐分钟浓度场时,加密气象网格不一定能得到更精确的浓度场,尤其在风场转变期间,甚至出现加密气象网格后浓度场反而偏离更大的情形,可能与 CALPUFF 浓度场计算的时间插值方案、CALMET 诊断风场的地形调整及不同粗细网格上的微气象学参数计算等因素有关。

5) 以风场转变期间浓度场 FAC2 一致率高于 70%,CALMET/CALPUFF 模式系统计算耗时不超过 2 分钟(14 小时模拟时长)为方案筛选要求,综合考虑计算耗时和浓度一致率,10min_400m 方案最优,耗时 0.39 分钟,转变期间浓度场 FAC2 一致率接近 80%。

参考文献

- [1] US EPA. Revision to the guideline on air quality models: adoption of a preferred general purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions, 40 CFR part 51 [EB/OL]. (2005-11-09) [2012-07-20]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw_05.pdf
- [2] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 大气环境(HJ 2.2—2018). 北京: 中国环境科学出版社, 2018
- [3] Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (version 5). Concord: Earth Tech Inc, 2000
- [4] Scire J S, Robe F R, Fernau M E, et al. A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5.0). Concord: Earth Tech Inc, 2000
- [5] 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. 气象, 2017, 43(8): 1005-1015
- [6] 朱俊涛, 龚有国, 肖凯涛. 危险化学品大气污染事故模拟. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 621-625
- [7] 王娜, 张越非, 龚有国, 等. 化工园区大气污染事故风险模拟研究. 企业科技与发展, 2020(1): 56-59
- [8] 郑宇凡, 蔡旭晖, 康凌, 等. 大气扩散应急预报的风场不确定性影响研究. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 878-886
- [9] 黄昕, 李蒙蒙, 张振州, 等. 突发性大气环境污染事件应急预案技术开发及应用. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 252-257
- [10] 庄文兵, 章涵, 王建, 等. 基于中尺度和微尺度的复杂地形大风预报方法研究. 气象科技进展, 2017, 7(2): 13-19
- [11] 张侠, 程路, 王琦, 等. 基于 WRF/CALMET 的关中盆地中部典型风场模拟. 陕西气象, 2019(4): 8-12
- [12] 舒璐, 杨宏, 马丹阳, 等. WRF 水平分辨率对 CALPUFF 模拟污染物浓度的影响. 环境保护科学, 2019, 45(6): 84-91
- [13] Oleniacz R, Rzeszutek M. Intercomparison of the CALMET/CALPUFF modeling system for selected horizontal grid resolutions at a local scale: a case study of the MSWI plant in Krakow, Poland. Applied Sciences, 2018, 8(11): doi: 10.3390/app8112301
- [14] 伯鑫, 吴忠祥, 王刚, 等. CALPUFF 模式的标准化应用技术研究. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊 2): 530-534
- [15] Chen J, Ban Y, Li S. China: open access to Earth land-cover map. Nature, 2014, 514: 434
- [16] 康凌, 陈家宜, 蔡旭晖. 核事故应急条件下风场的实时预报. 辐射防护, 2003, 23(4): 193-203
- [17] Chang J C, Hanna S R. Air quality model performance evaluation. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87: 167-196