

对流尺度集合预报在复杂地形中的应用研究概述

刘侃 陈超辉 何宏让

(国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410073)

摘要: 复杂地形是导致数值天气预报不确定性产生的重要来源之一, 特别是陡峭且不连续的山峰和峡谷地形, 其形态和表面性质的差异对大气运动会产生极其复杂的影响, 而基于对流尺度的集合预报是减少地形引起的模式预报不确定性的有效手段。因此, 细致全面地梳理对流尺度集合预报在复杂地形背景下的应用研究至关重要。本文重点从模式地形的扰动设计出发, 围绕地形效应对数值模式的影响, 关注模式地形转换过程的不确定性, 全面梳理高分辨率数值模拟中处理复杂地形的办法, 涵盖构造不同垂直坐标系、使用平滑插值方法、搭建地形因子与降水之间的模型、考虑相同的初始场和侧边界条件并插值到不同地形高度等, 克服梯度、高度、起伏度等地形因子的背景误差缺陷, 从而改善预报质量。

关键词: 集合预报, 复杂地形, 对流尺度, 模式地形构造, 地形因子, 地形扰动设计, 降水预报

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.004

Application Research of Convective Scale Ensemble Prediction in Complex Terrain

Liu Kan, Chen Chaohui, He Hongrang

(Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Complex terrain is one of the important sources of uncertainty in numerical weather prediction, especially the steep and discontinuous mountain and canyon terrain. The differences in their shapes and surface properties have extremely complex effects on atmospheric motion, and the convection scale ensemble forecast is an effective means to solve the uncertainty of model forecast caused by terrain. Therefore, it is very important to thoroughly and comprehensively sort out the application research of convective scale ensemble forecast in complex terrain background. This article focuses on the disturbance design of the model terrain, considers the influence of terrain effects on the numerical models, pays attention to the uncertainty of the model terrain conversion process, and comprehensively reviews the methods of dealing with complex terrain in high-resolution numerical simulation. It covers constructing different vertical coordinate systems, using smooth interpolation methods, building a model linking terrain factors and precipitation, considering the same initial field and lateral boundary conditions and interpolating to different terrain heights and overcoming background error defects of terrain factors such as terrain gradient, height, and degree fluctuations, thereby improving the forecast quality.

Keywords: ensemble prediction, complex terrain, convective scale, model-based terrain construction, topographical factor, terrain disturbance design, precipitation forecast

0 引言

我国地形错综复杂, 东西跨度大且地形各异, 特别是山地地形的存在对地表风分布、降水分布以及大气重力波传播等造成影响^[1-3]。由于地形效应促成的异常降水事件给天气预报带来了极大困难, 针对复杂地形条件下发生在对流云系中的短时强降水、雷暴大风等灾害性天气事件受到越来越多的关注^[4-6]。同时, 由于数值天气预报模式中地表特征以及土壤状况等表征误差的存在, 以及部分地区缺乏观测资料, 针对复杂

地形带来的模式预报不确定性问题的总结变得十分重要^[7]。考虑到数值模式对于地形的处理始终存在误差, 因此如何在模式中更好地描述地形也成为了一个难点。

集合预报是一种用于量化预报不确定性的方法, 并已成为各地预报业务中的重要工具^[8], 国内外各气象业务中心已经发展出了一些高分辨率数值模式, 并使用对流可分辨尺度(水平分辨率 <4 km)集合预报系统(Convection-Allowing Ensemble Prediction Systems, CAEPS)开展了更为深入的研究^[9-11]。虽然模式分辨率在不断提高, 但对流尺度天气系统不仅受大尺度环境场影响, 同时也会反作用于大尺度环境场, 这些过程往往包含不同尺度系统之间的非线性相互作用, 因此通过单一地提高模式分辨率已难以提升

收稿日期: 2023年2月25日; 修回日期: 2023年9月13日

第一作者: 刘侃(1995—), Email: 760584542@qq.com

通信作者: 陈超辉(1983—), Email: chenchaoahui2001@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目(42275169, 42205045);
湖南省自然科学基金项目(2022JJ30660)

预报准确率。基于此,促进对流可分辨尺度预报模式与集合预报技术相互配合成为提高强对流天气预报准确率的最好选择。但由于高分辨率数值模式对地形的处理往往存在不足,模式地形的生成遇到了一系列问题,如垂直坐标系选取和真实地形测量误差对模式地形的影响等^[12],通过更好地描述模式地形可有效提高对流尺度天气预报能力^[13]。当前,对流尺度集合预报方向的研究重点主要集中在初始扰动、模式扰动、侧边界扰动^[14-19],考虑地形扰动的对流尺度集合预报研究非常少。李俊等^[12]基于对流尺度集合预报系统,通过使用不同插值平滑方案产生不同集合成员的预报效果对比,试验了地形扰动在集合预报中的可行性,由于试验采取的是基于初值扰动、物理过程以及地形扰动3种独立方案,没有将地形扰动与初值扰动或模式物理扰动相结合,因此集合离散度的演变基本能反映出较好的模拟效果;为消除这种局限性,陈良吕等^[20]基于WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式,在已有的初值、物理过程基础上采取了使用不同插值和平滑的方法对不同集合成员进行模式静态地形高度扰动,针对地形扰动对高空、地面要素预报的效果进行深入研究,在模式中选择5种插值方案和3种平滑方案的组合,试验结果表明不同插值平滑方案组合的地形扰动方法能够反映地形转换过程中的不确定性。同时,基于地形扰动对强降水个例的批量平行试验也很好佐证了统计上的最佳方案^[21]。为进一步探索地形扰动方案对强降水预报的影响,Li等^[22]在对流可分辨尺度集合预报系统中针对4次强降水过程,对比试验了4组地形扰动方法,研究表明,通过地形插值、平滑方案的不同组合和在基于地形生成方案中加入地形差异(扰动)的方法,对提高集合性能有积极的贡献。Wang等^[23]为研究地形处理给数值模式带来的不确定性问题,基于中国气象局对流允许集合预报系统(CMA-CPEPS),引入小尺度地形高度的标准差,通过空间相关的随机场对其进行扰动,然后将它们添加到原始地形高度以构建地形扰动集合成员,分析了小尺度地形扰动对降水预报的影响,结果表明,单一的地形扰动方案会导致集合成员离散度不够,后续应当结合初始扰动等多种扰动方法来构建对流尺度集合预报系统。目前针对复杂地形的大量工作是基于复杂地形的背景场进行一些敏感性试验,研究结论并不能完全代表现实中的复杂地形,且数值模式对地形的处理存在缺陷,因此引入对流可分辨尺度集合预报系统和对应的扰动方案能有效减少复杂地形带来的预报问题。

鉴于此,梳理使用高分辨率数值模式集合预报方法处理复杂地形条件下天气气候事件的进展十分必要,有利于改善地形因素带来的预报不确定影响,促进集合预报理论发展创新与业务应用。根据当前研究现状,本文从模式地形构造、地形因子在模式降水中的作用、地形扰动设计在对流尺度集合预报中的应用3个方面进行介绍。

1 模式地形构造方法

模式地形通过影响模式预报过程初值的产生进而影响预报效果。WRF模式提供了3种地形平滑方案:平均地形、轮廓地形和包络地形^[24-26]。其中,包络地形方法是了解决大尺度大气环流模式中次网格地形作用提出的方法,刚开始起了一定作用,后来由于其和真实地形差异大,并引入很多物理意义不明的小尺度地形效应,被大部分数值预报中心放弃,并使用了物理意义更为明确的地形重力波、地形阻挡、地形湍流拖曳等参数化方案。当前流行的模式地形构造方法主要是采用高分辨率的地形高程数据,通过平滑和滤波处理,并考虑生成模式地形过程中的小尺度信息,从而生成有效模式地形^[27]。但目前针对高分辨率模式下的地形处理建模研究并不多,下面介绍国内外具有代表性的数值模式地形构造方法以及未来可供参考的模式地形建模。

1.1 WRF 模式地形构造

在复杂地形集合预报中,模式地形的构造通过影响初始场对集合成员的预报效果有直接影响,试验表明,引入合理的模式地形到数值模式中,是改善降水预报质量的有效方法之一。随着数值模式的发展、考虑地形因素的影响研究不断深入,地形辐射效应也成为模式地形构造的一个重要考虑方向。Arthur等^[28]通过研究地形对辐射的影响,包括地形遮挡和坡度效应,成功将浸没边界法(Immersed Boundary Method, IBM)应用到WRF模式中,并命名为WRF-IBM(基于WRF 3.6.1官方版进行改进),克服了WRF模式地形追随坐标相关的坡度限制,并通过了针对表面通量、温度场和速度场的验证,结果表明,只有在考虑复杂地形影响的情况下,模式才能较好地捕捉到入射太阳辐射和地表感热通量的空间变化。IBM是一种用来描述复杂地形的替代方法,通过沿浸没地形表面施加边界条件来表示地形,减小倾斜地形带来的模式误差,扩展了WRF模式地形的斜坡范围。图1a是WRF模式中使用的地形追随垂直坐标,其在斜坡上逐渐变得倾斜会导致数值模拟过程出现误差,且误差的严重程度取决于地形的坡度和网格纵横比(水平网格距除以垂直

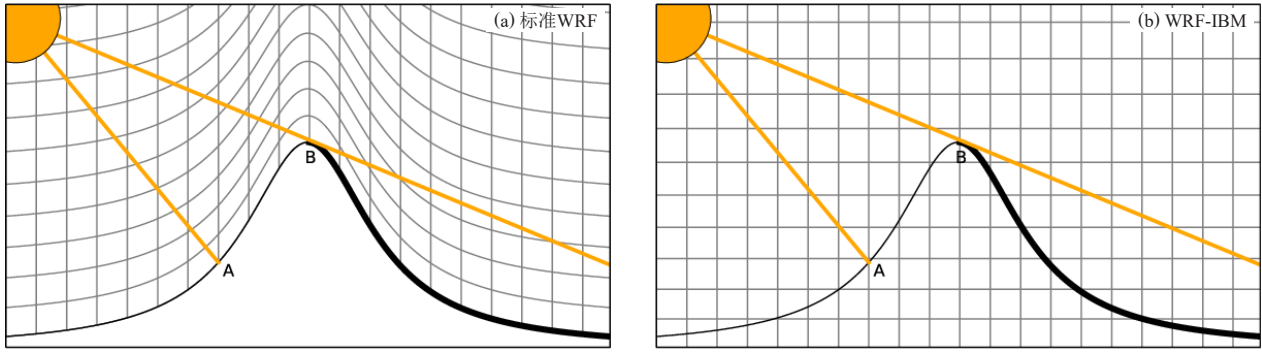


图1 标准WRF (a) 和WRF-IBM (b) 的示例网格和地形对辐射的影响^[28]
Fig. 1 Example grid and topographic effects on radiation for standard WRF (a) and WRF-IBM (b) ^[28]

网格距)^[29-30]。WRF-IBM描述了地形对辐射的影响与IBM的耦合,既考虑了与天空中太阳角度相关的局部坡度角,又考虑了可能拦截太阳辐射的周围地形的位。IBM方法的主要局限性在于其仅适用于复杂地形的小尺度模拟,目前并没有为中尺度模拟提供额外的功能;同时,WRF模式中相关的一些参数化方案都需要大量更新后,才能和IBM法兼容。

1.2 GRAPES 模式地形构造

由于地形的构造和地形影响因素构成极其复杂,研究难度较大,因此我国GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System, 现为CMA-GFS) 模式集合预报研究中,针对模式的地形尺度、地形平滑滤波方案等研究不是很多,最开始采取的是加权平均方法处理地形,后续经过滤波平滑处理试验,对模式地形进行了优化^[31-33]。刘一^[34]从GRAPES模式地形尺度出发,设计了高阶低通滤波器和五点平滑滤波方案,对参数进行调节并进行平滑处理,构造出模式有效地形,并在一定程度上提高了GRAPES模式预报能

力。其对模式原始地形处理主要选用了高阶低通滤波器及二维五点平滑方案。

一维低通滤波方程及 $2p$ 阶低通滤波器振幅响应函数分别为:

$$[S^{2p}]u_n^F + (-1)^p \varepsilon [L^{2p}]u_n^F = [S^{2p}]u_n, \quad (1)$$

$$H(x) = [1 + \varepsilon \tan^{2p}(\pi/x)]^{-1}, \quad (2)$$

式中, u_n 是地形初始值; u_n^F 是滤波后的值; S 为求和算子; L 为有限差分算子; x 表示波长,以网格间距为单位尺度; ε 为滤波参数; $2p$ 为滤波器阶数。

二维五点平滑滤波方程及其振幅响应函数分别为:

$$\tilde{F}_{i,j}^{xy} = F_{i,j} + \frac{S}{4} (F_{i+1,j} + F_{i,j+1} + F_{i-1,j} + F_{i,j-1} - 4F_{i,j}), \quad (3)$$

$$R(S, k, l)_5 = 1 - S \left(\sin^2 \frac{k\Delta x}{2} + \sin^2 \frac{l\Delta y}{2} \right). \quad (4)$$

图2a、2b分别选取了太行山区域和四川盆地进行试验,通过五点平滑地形和高阶低通滤波地形生成方案对模式地形处理得到的结果对比,可看出经过平滑滤波后地形坡度更小,高阶低通滤波地形效果表现最

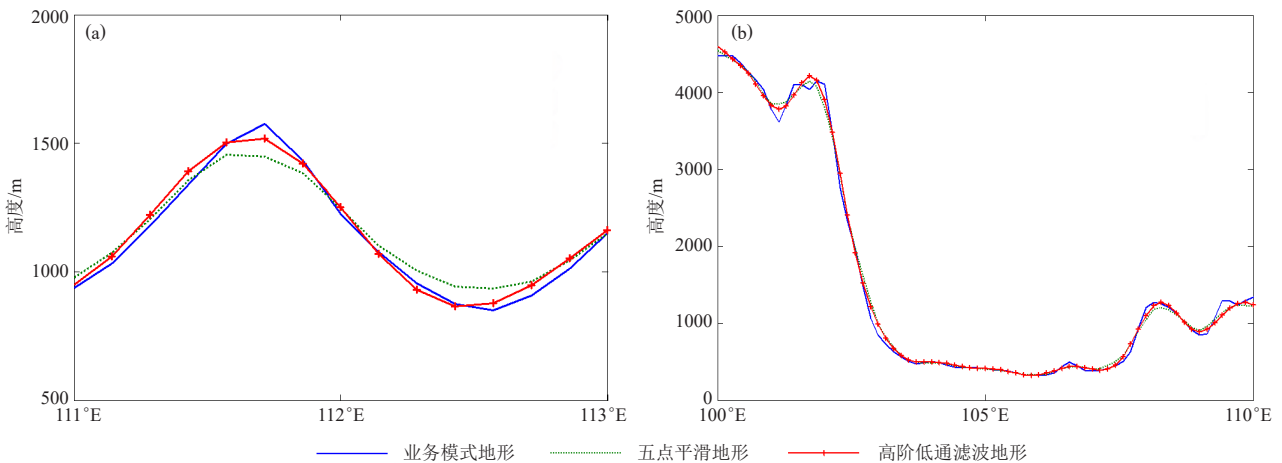


图2 太行山区域沿37.5°N, 110°—113°E地形高度剖面 (a), 四川盆地沿30°N, 100°—110°E地形高度剖面 (b)^[34]
Fig. 2 The topographic profiles of the Taihang Mountain region along 37.5°N, 110°—113°E (a), and of the Sichuan Basin along 30°N, 100°—110°E (b)^[34]

好,能保留复杂地形变化特征,经过五点平滑滤波处理后,山脊的高度和山谷的深度变化幅度较大,会对模式可分辨的尺度造成影响。

1.3 不连续 Galerkin 方法

随着对模式分辨率的需求程度不断提高,数值模式计算量不断加大,如何设计新模型来更加有效地减少计算资源变得非常重要。目前提出的数值方法包括有限差分法、有限元法、有限体积法、谱方法等^[35-36]。连续有限元法非常适合非结构化网格,已被提出来替代结构化网格上使用的谱方法^[37]。然而,这种方法对于平流扩散问题的处理是不稳定的,需要额外的稳定机制提供计算支撑。有限体积法不存在这个问题,已被选择用于建立多个大气模型^[38]。

不连续 Galerkin 方法是由 Blaise 等^[39]提出,是连续有限元法和有限体积法的结合。采用规则网格的数值模拟方法无法精确刻画复杂地形的高低起伏和不连续性,而通过不连续 Galerkin 方法,考虑局部地形和重要的小尺度信息,针对数值模式中的地形进行重新设计,规避地形不连续这一现实缺陷,能够很好地提高模式预报效果。当前已经开发的几种不连续 Galerkin 法大气模型^[40-45]应用于数值模拟的研究还较少。

不连续 Galerkin 方法建立模型的连续方程描述如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{u} \\ \rho \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \rho g \hat{e}_z) \\ \nabla \cdot (\rho \theta \mathbf{u}) \end{pmatrix} = 0, \quad (5)$$

$$p = p_0 \left(\frac{\rho \theta R_d}{p_0} \right)^{\frac{c_p}{c_v}}, \quad (6)$$

式中, ρ 为密度; θ 为位温; \mathbf{u} 为速度矢量; 动量方程中的压力 p 通过状态方程 (6) 得到。

其空间离散化设计方法采取图3所示四边形 (2D) 或六面体 (3D), 这是水平网格的单个二维元素的示例图, 这种结构允许对水平和垂直动力学进行不同的处理^[46]。模型基于空间离散化的三阶多项式的模拟已经在不同分辨率的情况下运行 (图4), 模拟结果显示, 基于更高分辨率的模式运行会产生强烈而快速的波动, 证实了该模型模拟复杂地形的有效性。

2 地形降水机制及模式结果应用

复杂地形对致灾强对流天气的发生发展过程有重要影响。对河南“21·7”特大暴雨特征分析表明, 极端降水与郑州独特的地形关系密切, 特别是中小尺度地形对降水的增幅作用不可忽视^[47-48]。廖菲等^[49]从地

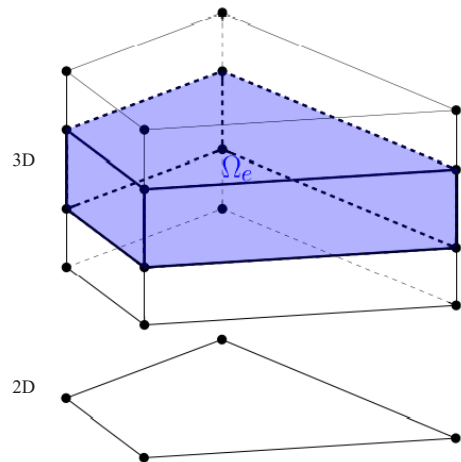


图3 二维四边形垂直挤压产生的六面柱体^[39]
Fig. 3 Sketch of a column of hexahedra resulting from the vertical extrusion of a two-dimensional quadrilateral element^[39]

形动力、热力效应引起的降水和云物理变化等方面综述了地形因素对降水的影响, 强调了地形对不同尺度云降水变化的作用, 表明地形主要从大气垂直运动、水汽供给、雨量增幅、静力稳定度四个方面对暴雨过程产生影响。Ntwali 等^[50]利用 WRF 模式对卢旺达地区雨季两次暴雨过程中地形高度对降雨分布的影响机制进行敏感性试验, 结果表明, 实际地形的降雨量远低于地形减半后的降雨量, 且几乎所有地形影响都源于地形驱动下的大气上升和下沉运动, 进而引起水汽凝结和蒸发。中小尺度地形通过影响大气环流对降水产生影响。Xie 等^[51]通过设计气流过山时各向异性的地形阻力方案, 提高了山地地形下模式对风速、温度等物理量的模拟效果。因此, 如果忽略了模式地形对预报初始场的影响, 最终会导致模式预报出现明显偏差。

随着高分辨率数值预报模式的发展, 基于不同分辨率的地形数据开展的模拟试验结果也是有差异的。Dan 等^[52]和 Liu 等^[53]将地表特征参数作为陆面过程模拟的不确定性来源之一, 借助地形因子建立回归模型用于研究降水与复杂地形之间的关系。研究基于对流尺度的动力降尺度方法, 通过引入高分辨率地形数据, 改善了复杂地形背景下的降水模拟效果, 高分辨率地形下降水模拟更接近实况。因此, 模式地形越接近真实地形, 模拟效果越佳。同时, 试验表明, 针对高分辨率模式下的地形因子与降水关系研究具有极大的业务应用前景 (表1), 能客观评估模式预报降水能力, 并且在对流尺度模式下的降水模拟效果更佳^[54]。

3 考虑地形扰动的集合预报试验

在全球、区域集合预报试验中, 对于模式不确定性的处理通常有多模式法、多物理过程法、多物

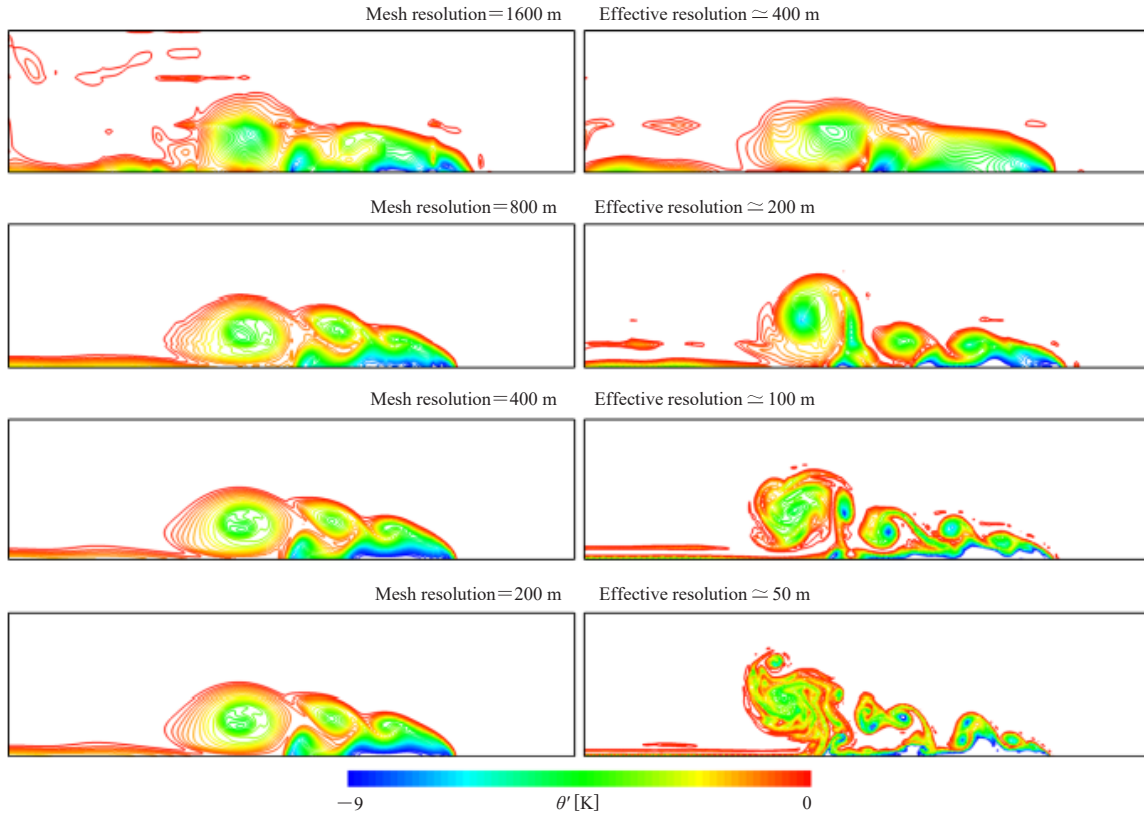


图4 不连续Galerkin方法不同分辨率下的模拟结果^[39]
Fig. 4 Simulation results at different resolutions with discontinuous Galerkin method^[39]

表1 地形因子与降水的回归模型
Table 1 Regression models for terrain factors and precipitation

回归模型	模型描述
多元全局回归方法建模	最小二乘回归模型 (OLS) ^[55] OLS是全局回归的经典方法之一，利用OLS法研究区域内所有站点的降水量与站点的地形因子间的关系，当回归结果得到的残差平方和达到最小值时，各站点的自变量回归系数则代表了该站点地形因子对降水的影响。该方法在研究范围较小、影响降水分布的因子明确且相互独立时效果较好，但在较大范围的降水空间分布时难以给出准确的估算和清晰的分析结果 ^[56]
	偏最小二乘回归模型 (PLS) ^[57] 基于PLS方法，能够有效克服变量多重相关性，出色的预测能力使得所有对因变量有重要解释意义的因子都能包含在模型中，保证了模型的精确性和稳健性 ^[58]
空间局部估计方法建模	普通Kriging模型 (OK) 基于变异函数及其结构分析，对有限区域内的区域化变量进行线性无偏估计并得到其空间分布特征
	回归Kriging模型 (RK) 是多元线性回归模型与普通Kriging模型的结合体，综合了各变量对因变量的解释作用，在残差存在空间自相关的情况下，对随机性变异进行解释
	地理加权回归模型 (GWR) ^[59] GWR模型在很大程度上解决了传统回归模型在执行地表温度降尺度时所忽略的空间异质性问题，揭示了局域模型的空间位置差异。GWR模型的参数通过加权最小二乘法进行局部估计，每一个空间位置处的权重是到周围特定模式下确定的观测位置的函数 ^[60]
	分层地理加权回归Kriging空间模型 (s-GWRK) ^[61] 是GWR的一种延伸，在残差存在空间自相关的情况下，分析其变异函数的结构并用普通Kriging进行插值，最后将趋势项和残差项相加，得到GWRK的估计值
多尺度地理加权回归模型 (MGWR) ^[62] MGWR模型能够区分不同变量间关系的局部、区域和全局过程，针对不同参数运用不同带宽求解，可以更准确地呈现不同参数估计对应的尺度特征	

理参数法以及包括SPPT方案、随机参数扰动方案等在内的随机物理法^[63]。针对模式地形处理的技术方法主要包括不同插值平滑方案组合、模式垂直坐标系的建立^[64-66]、计算气压梯度力相关设计^[67]以及地形分辨率设计方案^[68]。较常见的做法，一是针对地形进行算法设计或者针对不同地形引起的计算偏差进行去噪处理；二是直接对地形数据进行平滑处理。模式中大多

是通过 σ 坐标来考虑地形，当遇到陡峭地形时，由于 σ 等值面过于倾斜可能带来严重的计算误差，因此，使用 σ 坐标之前要使得地形充分平滑。若地形平滑方法使用不当，则不能过滤波动，从而使得地形平滑作用效果不佳。同时，复杂地形地区观测站点分布通常较稀疏，仅靠观测资料无法获取详细的信息，以至于在模式地形选取中要经常做调整，特别是在有陡峭斜坡

或孤立山体的地区, 由于地形的不连续性, 模式地形的效果不能达到最佳, 因此, 关于地形模型的构造上, 模式还不能做到全面覆盖。随着对复杂地形强降水的深入研究, 基于对流尺度的集合预报方法结合地形扰动方案是改善复杂地形强对流天气预报效果的突破口。

Duda等^[69]通过对WRF模式中的陆地表面模式(LSM)进行一系列扰动, 研究模式分辨率为4 km的网格距上强雷暴和强降水预报的敏感性, 检验了这种扰动通过改变地表能量通量和近地表热力学场等对中小尺度天气过程的集合预报产生影响。Li等^[22]通过对流可分辨尺度集合预报对4种地形扰动方法进行试验, 研究地形扰动在暴雨中的作用。其主要工作包括两部分: 一是通过2种平滑方案和5种插值方案的组合, 形成具有9个成员的集合预报试验组(9Exp1), 检验地形扰动产生的扰动预报成员对暴雨过程的预报效果; 二是通过2种类型试验改进地形扰动方案, 第一种试验解决了扰动大小但具有随机结构, 第二种试验解决了扰动大小和结构, 从而使得扰动预报成员初始扰动大小与其所代表的误差大小相匹配, 具有合理的空间结构。通过24 h控制预报与基于地形扰动的9Exp1集合平均预报进行对比并进行误差分析, 得出9Exp1集合平均预报较控制预报误差显著减小。通过控制地形扰动大小, 可以得到9Exp2和9Exp3另外两组集合成员, 比较控制成员与9Exp1、9Exp2、9Exp3在小雨、中雨、大雨、暴雨4个降水阈值上的Bias评分, 结果表明, 控制预报和地形扰动预报9Exp1对4种降水阈值的概率预报都有较好的体现。该研究的局限性在于仅基于简单的地形平滑插值方案的不同组合来生成地形扰动, 并没有建立扰动地形模型用于集合预报研究。

为进一步揭示地形扰动在降水预报中的作用, Wang等^[23]在CMA-CPEPS中引入地形扰动方案, 对华南的7个降水案例进行集合预报研究。其采用分辨率为3 km的小尺度地形高度标准差描述小尺度地形特征, 用于克服真实地形到模式地形的小尺度地形误差。考虑相同的初始场和侧边界条件, 首先利用带通滤波器滤除2 km以下及10 km以上水平尺度的地形高度, 然后根据过滤后的地形场和地形谱计算地形高度的标准差, 通过空间相关的随机场对其进行扰动, 最终将它们添加到原始地形高度以构造出集合成员的扰动地形高度。通过控制地形扰动幅度和扰动标准差来开展两组敏感性试验, 分析降水案例中对流调整时间尺度和天气尺度的强强迫和弱强迫案例对地形扰动的敏感性, 结果表明, 单一地形扰动模型对降水预报的

影响取决于所选案例, 地形扰动对强强迫事件的降水预报贡献较小, 对弱强迫事件的影响较大。

4 讨论与总结

复杂地形的新型地形扰动模型设计用于集合预报是一项具有应用前景的研究。针对地形的滤波和插值平滑处理最终获得的是比较平滑的模式地形, 而对于孤立的山地和陡峭的高山地形, 由于其本身存在的地形梯度差异造成的地形不连续, 无法用这种平滑地形的方法来处理。考虑地形梯度的建模, 并将得到的地形扰动叠加到模式地形高度上形成集合预报成员, 能够更好地刻画从真实地形到模式地形的转化不确定性。

随着业务集合预报的发展, 对数值模式预报准确率的要求不断提高, 在业务中关于地形与灾害性天气发生发展相互作用的研究也层出不穷, 如何在业务集合预报中更好地处理复杂地形将越来越成为一个难点问题。当然, 地形建模也存在许多问题需要进一步探索解决, 如: 基于何种地形不确定性考量建模? 如何开展试验测试新型地形扰动模型的稳定性? 如何设计多组试验验证新的地形框架下, 水汽潜热释放和下垫面热通量等非绝热过程在地形降水增幅中的作用等? 如果通过新范式地形扰动生成的集合预报成员在不同地形地区预报效果发生变化, 那么在模型设计过程中需考虑区域差异。

伴随着集合预报扰动不确定性的研究不断深入, 对于新型模式地形稳定性的要求将会越来越高。同时, 随着机器学习方法的广泛应用, Martin等^[70]开发了基于复杂地形的机器学习统计降尺度模式用于预测高分辨率地表气候变化。未来可以尝试将人工神经网络、卷积神经网络等模型算法与地形集合预报研究相结合, 进一步提高对流可分辨尺度集合预报效果。关于对流尺度集合预报成员预报效果好坏与地形之间联系的研究并不多见, 未来需进行更多的相关研究。

参考文献

- [1] Smith R B. 100 Years of progress on mountain meteorology research[J]. *Meteorological Monographs*, 2019, 59(1): 20.1-20.73.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [4] 王凌梓, 苗峻峰, 韩芙蓉. 近10年中国地区地形对降水影响研究进展[J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 64-75.
- [5] Lagouvardos K, Dafis S, Giannaros C, et al. Investigating the role of extreme patterns and complex topography during two heavy rainfall events in Crete in February 2019[J]. *Climate*, 2020, 8(7): 87.
- [6] 陈静, 庞波, 吴政秋, 等. 华南复杂地形下GRAPES_Meso 3 km对流尺度模式前汛期精细化降水预报评估[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(1): 99-111.
- [7] Wendoloski E B, Stauffer D R, Suarez A. A Subkilometer-Gridlength ensemble for representing stable boundary layer forecast

- uncertainty over complex terrain[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(8): 2769-2792.
- [8] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革[J]. *气象*, 2010, 36(1): 1-6.
- [9] 陈超辉, 李湘, 何宏让, 等. 基于对流尺度集合预报特性的局地增长模培养算法[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 510-520.
- [10] Ma S J, Chen C H, He H R, et al. An analysis on perturbation features of convection-allowing ensemble prediction based on the local breeding growth mode[J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(2): 289-304.
- [11] Li K, Chen C H, He H R, et al. Application of Gaussian weight to improve perturbation features of convection-permitting ensemble forecast based on local breeding of growing modes[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(3): 490-504.
- [12] 李俊, 杜钧, 刘羽, 等. 不同扰动方法集合离散度演变的异性暨地形扰动初探[J]. *气象学报*, 2017, 75(1): 123-146.
- [13] Zhang X B. Multiscale characteristics of different-source perturbations and their interactions for convection-permitting ensemble forecasting during SCMREX[J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(1): 291-310.
- [14] Li H B, Luo L F, Wood E F, et al. The role of initial conditions and forcing uncertainties in seasonal hydrologic forecasting[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D4): D04114.
- [15] Caron J F. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: a case study[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 356-374.
- [16] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(5): 6-20.
- [17] Luo Y L, Chen Y R X. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: an ensemble approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(20): 10593-10618.
- [18] Keresturi E, Wang Y, Meier F, et al. Improving initial condition perturbations in a convection-permitting ensemble prediction system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 145(720): 993-1012.
- [19] Duan W S, Ma J J, Vannitsem S. An ensemble forecasting method for dealing with the combined effects of the initial and model errors and a potential deep learning implementation[J]. *Monthly Weather Review*, 2022, 150(11): 2959-2976.
- [20] 陈良吕, 吴钰, 高松. 对流尺度集合预报中模式地形扰动对其预报技巧的影响研究[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(6): 649-657.
- [21] 陈良吕, 夏宇, 庄潇然. WRF模式不同地形平滑方案对降水预报的影响[J]. *气象科技*, 2020, 48(5): 664-674.
- [22] Li J, Du J, Xiong J, et al. Perturbing topography in a convection-allowing ensemble prediction system for heavy rain forecasts[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(14): e2020JD033898.
- [23] Wang J Z, Chen J, Xue H L, et al. The roles of small-scale topographic perturbations in precipitation forecasting using a convection-permitting ensemble prediction system over southern China[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2022, 148(746): 2468-2489.
- [24] Wallace J M, Tibaldi S, Simmons A J. Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1983, 109(462): 683-717.
- [25] Tibaldi S. Envelope orography and maintenance of the quasi-stationary circulation in the ECMWF global models[J]. *Advances in Geophysics*, 1986, 29: 339-374.
- [26] 张凯, 何宏让, 肖辉. 一次暴雪过程地形方案的敏感性试验研究[J]. *气象科学*, 2009, 29(6): 815-820.
- [27] 何光碧. 数值模式地形处理方法与地形降水影响模拟研究回顾[J]. *高原山地气象研究*, 2021, 41(3): 1-8.
- [28] Arthur R S, Lundquist K A, Mirocha J D, et al. Topographic effects on radiation in the WRF model with the immersed boundary method: implementation, validation, and application to complex terrain[J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(10): 3277-3292.
- [29] Klemp J B, Skamarock W C, Fuhrer O. Numerical consistency of metric terms in terrain-following coordinates[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(7): 1229-1239.
- [30] Daniels M H, Lundquist K A, Mirocha J D, et al. A new vertical grid nesting capability in the Weather Research and Forecasting (WRF) model[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(10): 3725-3747.
- [31] 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. GRAPES新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. *科学通报*, 2008, 53(20): 2396-2407.
- [32] 王光辉, 陈峰峰, 沈学顺, 等. 数值模式中地形滤波处理及水平扩散对降雨预报的影响[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1642-1650.
- [33] 刘一, 陈德辉, 胡江林, 等. GRAPES中尺度模式地形有效尺度影响的理想数值试验研究[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(1): 53-62.
- [34] 刘一. GRAPES模式有效地形生成方法的影响试验研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [35] Taylor M, Tribbia J, Iskandarani M. The spectral element method for the shallow water equations on the sphere[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 130(1): 92-108.
- [36] Machenhauer B, Kaas E, Lauritzen P H. Finite-volume methods in meteorology[J]. *Handbook of Numerical Analysis*, 2009, 14: 3-120.
- [37] Dennis J M, Edwards J, Evans K J, et al. CAM-SE: a scalable spectral element dynamical core for the community atmosphere model[J]. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 2012, 26(1): 74-89.
- [38] Rauscher S A, Ringler T D, Skamarock W C, et al. Exploring a global multiresolution modeling approach using aquaplanet simulations[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(8): 2432-2452.
- [39] Blaise S, Lambrechts J, Deleersnijder E. A stabilization for three-dimensional discontinuous Galerkin discretizations applied to nonhydrostatic atmospheric simulations[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2016, 81(9): 558-585.
- [40] Nair R D, Thomas S J, Loft R D. A discontinuous Galerkin global shallow water model[J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(4): 876-888.
- [41] Giraldo F X, Restelli M. A study of spectral element and discontinuous Galerkin methods for the Navier-Stokes equations in nonhydrostatic mesoscale atmospheric modeling: equation sets and test cases[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(8): 3849-3877.
- [42] Nair R D, Choi H W, Tufo H M. Computational aspects of a scalable high-order discontinuous Galerkin atmospheric dynamical core[J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38(2): 309-319.
- [43] Giraldo F X, Restelli M, Läuter M. Semi-implicit formulations of the Navier-Stokes equations: application to nonhydrostatic atmospheric modeling[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2010, 32(6): 3394-3425.
- [44] Kelly J F, Giraldo F X. Continuous and discontinuous Galerkin methods for a scalable three-dimensional nonhydrostatic atmospheric model: limited-area mode[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(24): 7988-8008.
- [45] Brdar S, Baldauf M, Dedner A, et al. Comparison of dynamical cores for NWP models: comparison of COSMO and dune[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2013, 27(3): 453-472.
- [46] Comblen R, Blaise S, Legat V, et al. A discontinuous finite element baroclinic marine model on unstructured prismatic meshes. Part II: implicit/explicit time discretization[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(6): 1395-1414.
- [47] 张霞, 杨慧, 王新敏, 等. “21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 672-687.
- [48] 梁旭东, 夏茹娣, 宝兴华, 等. 2021年7月河南极端暴雨过程概况及多尺度特征初探[J]. *科学通报*, 2022, 67(10): 997-1011.
- [49] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. *气象科技*, 2007, 35(3): 309-316.
- [50] Ntwali D, Ogwang B A, Ongoma V. The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF model[J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2016, 6(2): 145-157.

(下转70页)

供精准的、高质量的档案溯源信息服务，真正体现档案的价值和作用。

致谢：感谢全国数字气象档案技术组对安徽省数字气象档案馆关键技术研究的大力支持。

深入阅读

蔡学美, 2014. 数字档案馆发展阶段和建设内容[J]. 档案管理(1): 26-27.
曹明宇, 李青青, 杨志豪, 等, 2019. 基于知识图谱的原发性肝癌知识问答系统[J]. 中文信息学报, 33(6): 88-93.
江双五, 温华洋, 盛绍学, 等, 2021. 智慧档案馆背景下安徽省气象档案业务系统[J]. 计算机系统应用, 30(9): 128-137.
江双五, 刘惠兰, 温华洋, 等, 2022. 气象记录档案知识图谱构建[J]. 计算机系统应用, 31(1): 73-82.
江双五, 刘惠兰, 华连生, 等, 2023. 基于知识图谱技术的安徽省数字气象档案馆智能物联系统设计[J]. 长江信息通信, 36(9):

132-136.
蒋建峰, 金怿, 2019. 智慧档案馆建设的实践与探索[J]. 档案与建设(2): 46-50.
李贺, 刘嘉宇, 李世钰, 等, 2021. 基于疾病知识图谱的自动问答系统优化研究[J]. 数据分析与知识发现, 5(5): 115-126.
田雷, 2015. 物联网技术在智慧档案馆建设中的应用研究[J]. 档案学通讯(1): 60-64.
杨靖, 朋礼青, 2019. 人工智能对智慧档案馆的驱动作用研究[J]. 北京档案(1): 9-13.

(作者单位: 安徽省气象信息中心)

(编辑: 卢冰)

(上接28页)

- [51] Xie J B, Zhang M H, Xie Z H, et al. An orographic-drag parametrization scheme including orographic anisotropy for all flow directions[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, 12(3): e2019MS001921.
- [52] Dan J Y, Gao Y H, Zhang M. Detecting and attributing evapotranspiration deviations using dynamical downscaling and convection-permitting modeling over the Tibetan Plateau[J]. Water, 2021, 13(15): 2096.
- [53] Liu Z Y, Gao Y H, Zhang G. How well can a convection-permitting-modelling improve the simulation of summer precipitation diurnal cycle over the Tibetan Plateau?[J]. Climate Dynamics, 2022, 58(11-12): 3121-3138.
- [54] Gao Y H, Chen F, Jiang Y S. Evaluation of a convection-permitting modeling of precipitation over the Tibetan Plateau and its influences on the simulation of snow-cover fraction[J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(7): 1531-1548.
- [55] Basist A, Bell G D, Meentemeyer V. Statistical relationships between topography and precipitation patterns[J]. Journal of Climate, 1994, 7(9): 1305-1315.
- [56] 曾礼, 高艳红, 蒋盈沙, 等. 地形因子对华东地区降水影响的尺度效应研究[J]. 地球科学进展, 2022, 37(5): 535-548.
- [57] Wang Y. The upper airflow prediction by PLS (Partial Least Square) model[C]//The Scientific Conference on the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). Shanghai, 2001.
- [58] 舒守娟, 王元, 熊安元. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1703-1712.
- [59] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [60] 杨顺华. 基于空间回归模型的土壤有机质区域分布特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [61] Kumar S, Lal R, Liu D S. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock[J]. Geoderma, 2012, 189-190: 627-634.
- [62] Fotheringham A S, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [63] 王璐, 沈学顺. 对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J]. 气象, 2019, 45(8): 1158-1168.
- [64] Eliassen A. The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable Geofys[J]. Publikasjoner, 1949, 17(3): 1-44.
- [65] 宇如聪, 曾庆存, 彭贵康, 等. “雅安天漏”研究II. 数值预报试验[J]. 大气科学, 1994, 18(5): 535-551.
- [66] 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 一个基于Eta垂直坐标的新WRF动力框架及其数值试验[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 237-250.
- [67] 胡江林, 王盘兴. 地形跟随坐标下的中尺度模式气压梯度力计算误差分析及其改进方案[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 109-118.
- [68] 张朝林, 季崇萍, Kuo Y H, 等. 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 572-578.
- [69] Duda J D, Wang X G, Xue M. Sensitivity of convection-allowing forecasts to land surface model perturbations and implications for ensemble design[J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(5): 2001-2025.
- [70] Martin T C M, Rocha H R, Perez G M P. Fine scale surface climate in complex terrain using machine learning[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(1): 233-250.

(编辑: 郑秋红)