

2020-06-22T19:30

WRF (Weather Research and Forecasting model) 动力框架设计先进、算法精确、求解高效, 具有很强可移植性、可扩展性, 以该模式框架为基础, 已经发展了诸多专用预报模式, 如热带气旋模式 WRF-TC、水文模式 WRF-Hydro、化学模式 WRF-Chem 等。该模式框架虽然适合众多中小尺度天气过程高分辨率解算, 但也存在一个明显的缺陷, 即地形追随 (Sigma) 坐标系非正交、坐标面不水平, 使得该坐标模式在刻画陡峭地形大气动力过程 (水平平流、扩散处理以及地形陡峭处气压梯度力计算) 时存在显著歪曲。特别是由于青藏高原复杂大地形的存在, WRF 动力框架在东亚地区的适用性更有提升空间。

然而, 阶梯地形坐标 (Eta) 因为其坐标面准水平, 从而没有坐标旋转导致的曲率效应, 气压梯度力的计算也不会有两大项之小差问题, 水平平流和扩散的计算也无需考虑垂直方向的订正, 因而该类型框架在陡峭地形区域表现良好, 如美国 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 的 Eta 模式成功模拟了背风气旋生成过程 (F. Mesinger, 1988), 中国科学院大气物理研究所 REM (Regional Eta-coordinate Model) 则成功模拟了“雅安天漏”现象 (宇如聪, 1994)。

由上述两种垂直坐标性质和性能的分析, 促使我们思考: 如果把 Eta 坐标模式 (如 AREM, Advanced REM) 和 Sigma 坐标模式 (如 WRF) 的优势组合起来, 那么有可能出现“1+1>2”的效果, 即既能较好处理复杂地形, 又具备先进软件框架特征和精确数值算法。本文即是以 WRF 动力框架为基础, 引入 AREM 阶梯地形坐标表达, 建立 Eta 垂直坐标 WRF 新动力框架, 并开展数值试验。

主要亮点工作是: 有效结合 AREM 和 WRF 两个中尺度数值模式的特色优势, 构造适用于复杂地形的高精度新动力框架; 通过模式气柱质量变换方法, 巧妙实现了 Sigma 坐标和 Eta 坐标控制方程形式的完全一致, 从而使 Eta 垂直坐标 WRF 新动力框架计算更加便利、高效。主要结论如下:

(1) 从动力框架形式来看, Eta 垂直坐标和 Sigma 垂直坐标下 WRF 的差别主要体现在模式顶与参考面之间气柱的质量定义。通过该质量变换设计, 使得两个动力框架形式完全一致, 从而使程序实现变得简单。

(2) 引入 AREM 参考大气状态用于构造 WRF 新动力框架阶梯地形, 虽然该大气状态仍有改进空间, 但其主要用于计算地表 Eta 的初估值, 对阶梯地形设

计和模式积分计算影响不大。此外，通过设计阶梯地形 2D 和 3D 网格表征量使模式循环迭代与高阶差分计算过程更加简洁、高效。

(3) 理想山脉波试验表明，Eta 坐标 WRF 动力框架运行稳定、计算合理。阶梯地形坐标动力框架可对静力地形波进行有效刻画，但前提是提高垂直分辨率或延长模拟时间。再考虑阶梯地形先判断再计算的额外时耗，相比 Sigma 坐标动力框架，新框架计算花费更大。

一个基于 Eta 垂直坐标的新 WRF 动力框架及其数值试验

程锐^{1,3} 宇如聪² 徐幼平³ 刘娟¹ 黄静¹

1 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054

2 中国气象局, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

摘 要 针对我国陡峭地形数值预报难题, 本文在国际先进 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式动力框架中引入阶梯地形垂直坐标, 以期改进复杂地形区域数值天气预报提供模式发展可选方案。设计气柱质量变换方法, 实现阶梯地形和追随地形 2 种垂直坐标下动力方程组的形式一致, 从而简化方程组离散及程序实现的复杂过程。阶梯地形的构造借鉴了 AREM (Advanced Regional Eta-coordinate Model) 的设计思路, 即首先构造参考大气, 而后定义阶梯地形网格特征量, 最后进行阶梯地形表达。在 Eta 坐标下的 WRF 动力框架搭建完成后, 采用山脉波理想试验和实例试验对新动力框架的正确性和有效性进行了检验。结果表明: 由于阶梯地形固有的孤立分布特征, 可造成不同台阶处气流的分离, 从而使得阶梯地形在较粗垂直分辨率情形下, 不能很好模拟山脉波; 但如果垂直分层足够精细, 或模拟时间足够长, 可通过减弱气流分离现象或调整气流分布状态, 对地形波进行有效刻画。

关键词 Eta 坐标、WRF、AREM、动力框架、山脉波、数值试验

A New Eta-Coordinate Based-WRF Dynamic Core and its Numerical Experiments

Cheng Rui^{1,3}, Yu Rucong², Xu Youping³, Liu Juan¹, Huang Jing¹

1 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054

2 Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This paper mainly focuses on numerical weather prediction problem in the steep orographic region of China. The step terrain vertical coordinate (known as Eta) is introduced into the dynamic core of Weather Research and Forecasting model (WRF) to improve numerical forecasting in the complex orographic region. We design atmospheric column mass transformation scheme to give the Eta WRF core the same formulation of model equation system as the Sigma WRF core, which can facilitate the discretization and programming. The design of step terrain follows the computational scheme of Advanced Regional Eta-coordinate Model (AREM) including introduction of the reference atmosphere, adoption of mesh descriptive indicators and representation of the step mountain. We carry out 2D idealized mountain wave simulation and 3D real-case experiments to test correctness and robustness of the new dynamic frame. It is also indicated that the inherent isolation of the step topography can result in the airflow separation, which accounts for inadequate simulation of the mountain wave with coarse vertical layering

using the new Eta-coordinate WRF core. Fortunately, the mountain wave simulation will be improved using the new dynamic frame either with fine vertical resolution or with long simulation time, which is believed as alleviation on the airflow isolation of the step mountain.

Keywords Eta-coordinate, WRF, AREM, dynamic core, mountain wave, numerical experiment

1 引言

开发动力框架和设计相应的求解算法是模式发展的焦点问题之一。WRF (Weather Research and Forecasting model) 动力框架考虑了更高阶数值精度和标量守恒为特性的数值算法, 物理过程选项丰富、计算高效, 同时具备可移植性、并行化、可扩展性; 用于封装模式的软件框架考虑了多层级软件架构以及应用程序编程接口 (API) 设计等功能 (Michalakes et al., 2001), 可组装动力框架、物理过程、I/O 等模式元素。可以看出, 该动力框架具备设计先进性、算法精确性和求解高效性, 既能把模式元素富有逻辑、高效科学地组织起来, 同时也确保了系统的可扩展、易于开发及大规模并行计算等功能, 是现今利用率较高的先进模式框架。

WRF 模式在东亚地区获得了广泛应用, 为中尺度天气预报机理研究和暴雨、台风等模拟预报提供了有力工具; 但和其他数值模式一样, 对于复杂地形下暴雨预报性能仍然不高。借鉴 Eta 坐标模式对陡峭地形有效处理 (Mesinger, 1983、2004; 宇如聪和徐幼平, 2004; 普业等, 2008; 程锐等, 2018、2019), 若能在 WRF 模式中采用阶梯地形垂直坐标进行复杂地形表达, 改善陡峭地形下气压梯度力、水平平流和扩散等过程的刻画, 则既是对该模式功能的有益提升, 也能够对解决复杂地形下暴雨预报问题提供一定参考。

1.1 垂直坐标设计

垂直坐标构造是数值模式的重要内容; 理论上, 在数值天气预报中, 凡与几何高度有单调关系的任何变量都可作为垂直坐标, 不同坐标变换仅仅带来方程组形式变化以及边界条件的改变。Richardson 最初进行数值天气预报设计时采用了几何高度坐标, 并由 Kasahara and Washington (1967) 实现利用高度坐标系进行数值天气预报。Eliassen (1949) 提出气压作为垂直坐标的概念, 并得到广泛应用; 后来, 为了更好地处理下边界, Phillips (1957) 使用了归一化坐标 ($\sigma=p/p_s$); 再后来, 由归一化坐标逐渐发展为基于高度 (Gal-Chen and Somerville, 1975) 和质量 (Laprise, 1992) 的地形追随坐标。基于 Egger (1972) 的地形障碍方法, 曾庆存 (1982) 提出一种改进的 Sigma 坐标, 与 Mesinger (1983) 提出的 Eta 坐标一致, 都为阶梯地形坐标。现在比较流行的垂直混合坐标的概念由 Sangster (1960) 提出, 他建议模式低层采用 Sigma 坐标, 高层逐渐采用气压坐标, 从而在高层避免气压梯度力大量小差问题。Steppeler (2002) 将模式地形表示为线性连续样条函数形式, 相当于倾斜阶梯地形坐标。

在选择垂直坐标时, 首先要考虑是否适合处理地形。地形是大气运动重要的强迫源, 既可将其看作阻滞气流的巨大障碍物, 也可看作是矗立在对流层的热岛和水汽供应源 (纪立人等, 2005); 地形还是对流活动的触发源。中尺度数值模式的主要目的是描写大气中与灾害天气有关的强对流活动, 而大陆上的对流灾害天气又往往和地形强迫作用密切相关。另外, 随着模式分辨率的提高, 陡峭地形坡度越来越大; 比如 2km 分辨率的中尺度模式, 地形坡度能达到 0.3 左右, 而一般的天气模式地形坡度小于 0.01 (胡江林和王盛兴, 2007)。因此, 精确、合理的构造模式地形是数值天气预报的重要问题, 尤其我国境内存在青藏高原等复杂地形, 与地形相关的数值计算与处理更值得深入研究。

1.2 地形追随坐标的问题及其改进

地形追随坐标下,因坐标系非正交,所以会产生虚假曲率影响;由于坐标面不水平,水平平流和扩散处理需要额外人为控制;尤其是陡峭地形下气压梯度力的计算精度不高(Mesinger, 2004a)。当然,地形追随坐标对陡峭地形处气压梯度力的求解误差可带来气象场模拟预报偏差(李兴良等, 2005; 李兴良和陈德辉, 2015)。选用该垂直坐标,对背风坡气旋、冷空气阻塞等山脉下风方天气事件的模拟和预报也存在困难。

对于地形追随坐标模式,提高水平气压梯度力计算精度有多种应对方案,包括设计协调的差分格式(如 Corby, 1972, 该格式在 MM5 中得到应用)、反插回等压面计算(如 Smagorinsky, 1967; 胡江林和王盘兴, 2007)、扣除法(如曾庆存, 1963、1979; 钱永甫和周天军, 1995; WRF 模式中也采用了这种方法)以及上下层平均法(如钱永甫等, 1978)等。另外,可将 σ 坐标变换为 p - σ 混合坐标,从而提高气象要素模拟精度。事实上,钱永甫(1985)就提出一个5层 p - σ 混合坐标原始方程模式;赵鸣和方娟(1996)将其发展为9层混合坐标模式。Steppeler(2002)将模式地形表示为线性连续样条函数形式,并使用 z 和 σ 混合坐标构造 LM- z (z -coordinate nonhydrostatic version of the Lokal modell)模式,其中动力框架在 z 坐标计算而物理过程在 σ 坐标计算。该方法是地形追随坐标和阶梯地形坐标的折衷方案,可以同时克服上述阶梯地形坐标及追随地形坐标的一些问题。WRF 模式也将混合坐标开发作为模式更新的重要内容,在其混合垂直坐标框架中,靠近地形的模式低层采用地形追随坐标,而地形之上逐渐向等压面坐标过渡松弛;这样既满足了易于地形处理的需要,同时也减小了地形对于模式高层的人为影响,从而使对流层顶的模式代表性得到增强。

上述修正主要针对动力计算层面,还可以通过减缓模式坐标面坡度,从而减小地形追随坐标计算误差的方式提高计算精度。Schar et al.(2002)提出一种新的平滑层垂直坐标(SLEVE),他们通过平滑复杂地形以上Sigma坐标面来提高计算精度,并成功将此方法运用于COSMO(Consortium for Small-scale Modeling)模式中;后来,Zängl(2003)将该方法推广到质量追随坐标模式中。美国跨尺度预报模式(MPAS, Model for Prediction Across Scales)采用平滑地形追随(STF)混合坐标(Klemp, 2011),通过控制地形对坐标面的影响使得高层坐标面逐渐水平,从而使气流更趋平滑,这种调制作用在模式分辨率提高时尤为重要。相比SLEVE方法,STF方法对地形追随坐标面平滑更大。李超等(2019)基于GRAPES模式对国际先进的平缓-混合坐标(Smoothed and Hybrid Terrain Following coordinate)进行了系统分析、试验,设计一种改进的余弦三角函数为基函数的平缓-混合坐标(COS坐标),使低层坐标面垂直分布更加均匀,低层地形作用衰减的垂直变化更加均匀,减小了计算误差,提高了计算稳定性。张旭等人(2015)也利用GRAPES区域模式,开展了Klemp(2011)和Schar et al.(2002)高度地形追随坐标理想试验研究,他们主要通过设定不同的地形衰减廓线或对坐标面地形高度进行平滑来减小小尺度地形影响。屠妮妮等(2012)、何光碧等(2015)通过滤波方案直接对模式地形进行处理,减缓地形坡度,提高模式预报性能。

为了解决追随地形坐标的非正交问题,很多人都尝试在陡峭地形之上使用数值网格生成方法设计正交的地形追随网格,从而减小模式截断误差,如Erdun et al.(1997)提出Schwarz-Christoffel正形变换方法并在复杂地形上产生2D正交网格, Li et al.(2014)则设计提出3D正交曲线地形追随坐标。

随着计算能力大幅提升, Eta 坐标模式在边界层内分层也能得到精细表述,对重力波和边界层特征的刻画能力得到提高,加之其对水平气压梯度力和平流的刻画优势,从而将 Eta 坐标的应用重新提上模式发展日程。Mesinger et al.(2012)设计了一种倾斜 Eta 坐标,较好清除了 Gallus et al.(2000)发现的在原 Eta 阶梯地形模式中存在的阶梯转角的虚假涡度。随后, Mesinger and Veljovic(2017)进行了该版 Eta 坐标模式和 Sigma 坐标模式比较试验,发现当 Eta 垂直分层加密后气流分离现象得到消除。另外, Eta 模式在云物理和辐射过程以及

资料同化改进后，其在降水评分上相对于 Sigma 模式保持较高水平；Eta 模式优势在美国西部特别明显，对于所有降水类型 Eta 模式性能更加优异，特别是较强降水。

1.3 山脉波的求解

山脉波的经典求解是给定稳定层结和平直西风情形下，分析钟形山脉激发的重力波解。实际钟形山脉可以进行阶梯地形近似，这种近似的准确性主要与地形的水平尺度以及垂直分辨率有关。1943 年，Lyra 推导了帽型山脉气流过山的分析解（Alaka, 1960）。Gallus et al. (2000) 在此基础上重新推导了旋转大气的山脉波解。

对于静力效应显著的波动，波动能量和动量垂直传播，并且波动局限于山脉上方区域，定常位相随高度向上游倾斜。此时，在转角之上产生的扰动的尺度比山脉强迫的尺度小好多，因此会产生明显的歪曲现象，也就使得每个阶梯转角之上的环流表现出强局地特征。虽然转角之上的扰动振幅与山脉宽度无关，但垂直速度随着山脉宽度增加而减小。因此，当山脉宽度增加时，这些阶梯转角扰动的相对振幅变得愈加明显。

2 Eta 坐标下 WRF 动力框架

从原始方程出发，推导考虑地图投影变换和扰动变换的 Eta 坐标 WRF 湿动力框架如下：

a) 第一运动方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m_x \left(\frac{\partial Uu}{\partial x} + \frac{\partial Vu}{\partial y} \right) + \frac{\partial \Omega u}{\partial \eta} + \frac{m_x \alpha_m}{m_y \alpha_d} [P_d^2 \left(\frac{\partial \Phi'}{\partial x} + \alpha_d' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \alpha_d \frac{\partial p'}{\partial x} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial x} (\frac{\partial p'}{\partial \eta} - P_d'^2)] = F_U \quad (1)$$

b) 第二运动方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m_y \left(\frac{\partial Uv}{\partial x} + \frac{\partial Vv}{\partial y} \right) + \frac{m_y \partial \Omega v}{m_x \partial \eta} + \frac{m_y \alpha_m}{m_x \alpha_d} [P_d^2 \left(\frac{\partial \Phi'}{\partial y} + \alpha_d' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \alpha_d \frac{\partial p'}{\partial y} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial y} (\frac{\partial p'}{\partial \eta} - P_d'^2)] = F_V \quad (2)$$

c) 第三运动方程

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m_x \left(\frac{\partial Uw}{\partial x} + \frac{\partial Vw}{\partial y} \right) + \frac{\partial \Omega w}{\partial \eta} - \frac{g}{m_y \alpha_d} \left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - (q_v + q_c + q_r + q_i + \dots) \bar{P}_d^2 \right] + \frac{g}{m_y} P_d'^2 = F_W \quad (3)$$

d) 连续方程

$$\frac{\partial P_d'^2}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0 \quad (4)$$

e) 热力学方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial \Omega \theta}{\partial \eta} = F_\theta \quad (5)$$

f) 扰动位势方程

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial t} + \frac{1}{P_d^2} [m_x m_y (U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + m_y \Omega \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} - m_y g W] = 0 \quad (6)$$

g) 水物质方程

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m_x m_y \left(\frac{\partial U q_m}{\partial x} + \frac{\partial V q_m}{\partial y} \right) + m_y \frac{\partial \Omega q_m}{\partial \eta} = F_{Q_m} \quad (7)$$

h) 状态方程

$$p = p_0 \left(\frac{\theta_m R_d}{p_0 \alpha_d} \right)^\gamma \quad (8)$$

i) 静力近似方程

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial \eta} = -\bar{P}_d^2 \alpha_d' - P_d'^2 \alpha_d \quad (9)$$

上述(1)-(9)式 9 个方程共同组成了 Eta 坐标下 WRF 动力框架。其中，上标“'”表示扰动量，

下标“d”、“m”分别表示干、湿过程； η 表示Eta坐标， $\eta = \sigma \cdot \eta_s = \frac{\pi - \pi_t}{\pi_s - \pi_t} \cdot \eta_s = \frac{\pi - \pi_t}{p^2}$ ， $\eta_s =$

$\frac{\pi_{rf}(z_s) - \pi_t}{\pi_{rf}(z_b) - \pi_t}$ ， $p^2 = \frac{\pi_s - \pi_t}{\eta_s}$ ， π 表示静力气压， π_t 为模式顶静力气压， π_s 为地面静力气压，

η_s 表示地形处Eta值； π_{rf} 为参考静力气压； z_s 为地形高度， z_b 为平缓地形高度， α 表示大气比容， p_0 表示参考气压，一般取1000hPa； $\gamma = C_p/C_v$ ， C_p 、 C_v 和 R_d 分别表示定压比热、定容比热和干空气气体常数； $q_v + q_c + q_r + q_i + \dots$ 表示水汽和水凝物混合比之和；

$(U, V, W) = (P_d^2 u, P_d^2 v, P_d^2 w)$ ， $\Omega = P_d^2 \dot{\eta}$ ， $\Theta = P_d^2 \theta$ ， $Q_m = P_d^2 q_m$ ， q_m 表示水凝物混合比； F_U 、 F_V 、 F_W 主要为科氏力、曲率项力、混合项和物理过程转换项； F_Θ 、 F_{Q_m} 主要为混合项和物理过程转换项；其它变量使用气象常用符号表示，不再赘述。

3 Eta 垂直坐标设计

3.1 参考状态定义

标准层结近似由曾庆存先生提出，宇如聪（1989）在中尺度模式中应用该近似方法实现静力扣除计算。本文利用标准层结大气构造阶梯地形，具体形式如下：

$$\tilde{T} = \frac{C_0^2 C_p}{R^2} + \left(\tilde{T}_0 - \frac{C_0^2 C_p}{R^2} \right) \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \quad (10)$$

$$\tilde{\Phi} = \frac{1}{\kappa} \left(R \tilde{T}_0 - \frac{C_0^2 C_p}{R} \right) \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \right] - \frac{C_0^2}{\kappa} \ln \frac{p}{p_0} \quad (11)$$

$$\frac{\tilde{p}_s}{p_0} = \exp \left\{ \frac{\kappa}{C_0^2} \left[\frac{1}{\kappa} \left(R \tilde{T}_0 - \frac{C_0^2 C_p}{R} \right) \left(1 - \left(\frac{\tilde{p}_s}{p_0} \right)^\kappa \right) - \tilde{\Phi}_s \right] \right\} \quad (12)$$

其中， $\tilde{T}$ 、 $\tilde{\Phi}$ 和 $\tilde{p}_s$ 分别表示标准层结大气温、位势和地表气压， C_0 是定常重力波速， p_0 和 T_0 为标准海平面平均的气压和温度，具体推导和其他变量描述请见宇如聪（1989）。

3.2 阶梯地形表征

3.2.1 阶梯地形 2D 表征量

由于阶梯地形坐标具有准水平的性质，因此坐标面和地形存在交割关系，在不同的水平格点，大气变量在垂直方向的分布将会有3种情况：地形之下、地形表面或地形之上。在设计模式积分计算时，地形以下层次将不能参与。因此，需要对紧贴地形的Eta坐标层次进行判断。WRF水平网格分布为Arakawa-C型跳点，故设计变量ksh、ksu和ksv，分别对应质量点（不包括界面层变量垂直速度和位势高度）、纬向风点及经向风变量点紧邻地形的垂直层次编号。模式垂直方向采用Lorenz跳点形式，界面层和中间层交替分布，垂直速度和位势高度分布在界面层，其它变量分布在中间层，且从地表至模式层顶，垂直层次编号逐渐递增。

下面，我们将通过简单阶梯地形来分析ksh、ksu和ksv等2D表征量与阶梯地形之间的关系（见图1）。在试验中，钟形山脉实际最高高度为100m，山脉半宽10km，尺度系数选为 $z_{scale}=0.5$ 。从图中可以看到，在区域中心存在一个孤立地形，高约100m；与阶梯地形对应的区域中心附近ksh、ksu和ksv都为2，而在其它区域为1。我们以质量点（不包括界面层变量垂直速度和位势高度）表征量ksh为例来说明：通过阶梯地形设计，可使阶梯地形表面正好处于界面层，且紧邻阶梯地形之上的中间层和该界面层具有相同垂直层次编号；因此，“ksh=2”表示区域中心附近质量点阶梯地形所在层次为模式第2个界面层。

图 1 阶梯地形高度 (a, m) 及阶梯坐标模式 2D 表征量 ksh (b)、ksu (c)、ksv (d)

Fig.1 The step mountain height (m) a), and the 2D-mesh indicators of step coordinate model ksh b), ksu c) and ksv d).

3.2.2 3D 表征量

有了上述阶梯地形 2D 表征量，就能够开展阶梯地形坐标下动力计算。但对于 3D 格点空间的计算问题，首先进行水平网格判断，再进行垂直方向计算，会破坏数组的存取规则，影响计算效率。因此，为了方便高效开展 Eta 垂直坐标模式 3D 网格计算，需引入阶梯地形 3D 表征量 mph、mphi、mpu、mpv，分别表示模式中间层质量点所在 3D 网格与阶梯地形关系、界面层质量点所在 3D 网格与阶梯地形关系、纬向速度点所在 3D 网格与阶梯地形关系以及经向速度点所在 3D 网格与阶梯地形关系。

图 2 的计算方案与图 1 相同，为了方便刻画阶梯地形 3D 表征变量与 Eta 垂直层次的关系，以及 3D 表征量和 2D 表征量表达的一致性，我们利用图中填充的阴影部分表示阶梯地形以下的网格点(其值设置为 0)；此处 Y 轴表示 Eta 层次，而不是 3D 表征量的具体数值。从图中可以发现，在区域中心阶梯地形处，半层质量点和速度点第 2 层以下 mph、mpu、mpv 为 0，整层质量点第 3 层以下 mphi 为 0。再以 mph 为例进行说明：mph 在中心区域以外没有填充，表示中心区域以外没有阶梯地形存在，这和图 1a 是相互对应的；在中心附近区域，因为存在孤立阶梯地形，且其位于第 2 个界面层 (ksh=2)，因此中心区域附近第 2 个界面层以下 mph=0。对于界面层表征量 mphi (图 2b)，因为中心附近区域阶梯地形位于第 2 个界面层，因此第 3 个界面层以上才能保证存在阶梯地形以上网格点，也就是说第 3 个界面层以下 mph=0；而在中心以外区域无阶梯地形，故第 2 个界面层以上就能保证存在阶梯地形以上网格点，也就是说第 2 个界面层以下 mph=0。

图 2 阶梯坐标模式 3D 表征量，(a) mph，(b) mphi，(c) mpu，(d) mpv；颜色填充区域表示格点位于地形以下，即 mph、mphi、mpu、mpv 为 0

Fig.2 The 3D-mesh indicators of step coordinate model, a) mph, b) mphi, c) mpu, and d) mpv. The shaded area shows grid points are below the step mountain, with zero values for mph, mphi, mpu and mpv.

4 山脉波试验

4.1 试验方案

原 WRF (即 Sigma 坐标下动力框架) 山脉波试验方案作为对照试验 (见表 1)，而将垂直坐标变换和积分时间延长作为比对试验 (具体方案见表 2)。通过数值试验，一方面检验更新的模式动力框架的正确性和有效性；另一方面通过对比试验考查垂直坐标选择对地形波模拟的影响。我们假定山脉地形最高为 100m，钟形山脉最高处位于区域中心，山脉半宽为 10 个格距 (20km，图略)，Brunt-Vaisala 频率设为 10^{-2}s^{-1} 。当前，大气背景场设置为稳定层结干大气，水平平直西风 10m/s。数值模式选用 2D 模型，模式区域水平延展 202 个格点，水平分辨率为 2km，垂直方向指数拉伸分 80 层，时间步长 20s，模拟时长 36000s。X 方向为辐射开边界，Y 方向为周期边界，Z 方向刚壁边界条件。水平平流采用 5 阶方案计算，垂直平流采用 3 阶方案计算。当前试验不考虑任何物理过程。不难看出，本方案模拟对象为典型静力特性的山脉波动，对这类波动的数值模拟也是 Eta 坐标模式的难点问题之一。

表 1 原 WRF 模式 (Sigma 坐标) 山脉波试验方案 (对照试验)

Table 1 The original WRF (Sigma coordinates) configuration for mountain wave simulation (control experiment)

模式选项	模拟方案
模式地形	$h_t = \frac{h_m}{1 + [\frac{z - i_{cm}}{\alpha a}]^2}$ 其中$h_m=100\text{m}$，为山脉最高地形高度，h_t为钟形山脉高度；i为格点下标，i_{cm}表示区域中心点 X 方向下标，$\alpha a = 10$
初始条件	0-30km，干大气， $\bar{u}=10\text{m/s}$ ， $\bar{v}=0$
模式分辨率	2km
水平网格	Arakawa-C 跳点，202 个网格点
垂直分层	Sigma 分层，指数拉伸分 80 层
时间步长	20s
模拟时长	36000s
侧边界	X 方向辐射开边界，Y 方向周期边界，Z 方向刚壁
水平平流	5 阶
垂直平流	3 阶
物理过程	无

表 2 Eta 坐标对比试验方案

Table 2 The configuration for comparative experiments with Eta coordinates

方案编号	方案描述
EXP01	对照试验（具体方案见表 1）
EXP01_	Eta 坐标、参考高度 100m，其它方案同对照试验
EXP02	Eta 坐标，参考高度为 50m，其它同 EXP01_
EXP03	Eta 坐标，参考高度为 0，其它同 EXP01_
EXP04	Eta 坐标，参考高度为 0，垂直分层提高到 400 层，其它同 EXP01_
EXP05	Eta 坐标，参考高度为 0，模拟时长加大 10 倍，其它同 EXP01_

注：表中参考高度为 Eta-Sigma 混合坐标中 Sigma 坐标层顶高度。

4.2 对照试验结果分析

图 3 给出 Sigma 坐标下 WRF 动力框架对山脉波的模拟（对照试验 EXP01）。从图 1 可以发现，积分 36000s 时，由于钟形山脉的动力强迫，出现了明显的地形驻波特征。从温度扰动可以发现，在钟形山脉山脊靠近背风坡一侧从低层到高层存在 3 个大值中心（最大约 0.45K，位于模式第 10 层左右），强度随高度减弱。气压扰动呈现高层弱而低层强、迎风坡弱而背风坡强的形势，最强扰动中心在背风坡靠近山脊附近，并位于模式底层，强度约 -12Pa。垂直速度分布和扰动位温相似，在山脊靠近背风坡一层从低层至高层存在交错分布的上升、下沉运动带，最大强度可达到 0.04m/s，中心强度随高度逐渐减弱。因此，从垂直速度和扰动位温分布可以发现存在明显静力地形波动特点，波动垂直传播，且主要分布于山脊上方区域，位相随高度向上游倾斜。需要说明的是，当参考高度选为 100m 时，Eta 坐标完全退化为 Sigma 坐标（见方案 EXP01_），与 EXP01 具有相同的模拟图像（图略）；伴随参考高度逐渐减小，垂直坐标变换为 Sigma-Eta 混合坐标，与 EXP01 模拟差异逐渐显现；当参考高度为 0 时，垂直坐标为纯 Eta 坐标，此时差异更加显著（具体结果见 4.3 节）。

图 3 EXP01 山脉背风波动结构, (a) 扰动位温 (K), (b) 扰动气压 (Pa), (c) 垂直速度 (m/s)

Fig. 3 The structure of mountain lee wave from EXP01: a) potential temperature anomaly (K), b) pressure anomaly (Pa) and c) vertical velocity (m/s)

4.3 对比试验结果分析

4.3.1 Eta 坐标 (参考高度 50m)

如果将参考高度下调到 50m (如图 4 所示), 此时垂直速度和位温扰动呈现明显的双中心结构, 中心强度明显下降 (约为 EXP01 的一半); 气压扰动中心强度亦有减小。因此, 当参考高度调整为 50m (钟型山脉最大高度的一半) 时, 模拟形态保持了向上游倾斜的山脉波动分布特征, 但波动强度减弱, 双中心结构明显。

图 4 如图 3, 但为 EXP02 结果

Fig. 4 Same as Fig. 3 but from EXP02

4.3.2 Eta 坐标 (参考高度 0)

如果取参考高度为 0, 则完全转变为 Eta 坐标。图 5 给出模拟结果, 可以发现模拟图像发生很大变化, 基本没有刻画出山脉波垂直传播、位相向上游倾斜等特征。其中, 扰动气压由负转正, 强度减弱; 垂直速度和扰动位温强度非常弱, 比对照试验减小约 2~3 个数量级; 另外, 迎风坡主要表现为弱上升气流, 背风坡主要体现为弱下沉气流。因此, Eta 垂直坐标动力框架在当前模拟方案条件下, 无法正确模拟静力特性山脉波动。

图 5 如图 3, 但为 EXP03 结果

Fig. 5 Same as Fig. 3 but from EXP03

4.3.3 Eta 坐标 (参考高度 0, 垂直分辨率提高)

从以上数值试验分析可以发现, Sigma 坐标和 Eta 坐标模式采用完全一致的数值计算方案, 但对山脉波的模拟却有很大差别: 前者较好刻画了山脉波特征, 而后者几乎没有模拟能力。本节将尝试通过提高垂直分辨率来改进 Eta 坐标 WRF 新框架对山脉波的模拟性能。当把垂直分层从 80 层提高到 400 层时 (见图 6), 山脉波动特征出现, 重力波垂直上传的特点比较明显, 位相向上游倾斜也得到体现。不足之处在于波动垂直向上衰减更快, 扰动强度虽比 EXP03 强, 但比起对照试验 (EXP01) 仍显著偏弱。

若将垂直分层继续提高到 600 层 (图略), 此时山脉波模态虽仍可显现, 但是波动分布较为零散, 系统性不强。因此, 当使用阶梯地形动力框架模拟山脉重力波时, 提高垂直分辨率可以提升模拟性能, 但也不是垂直分辨率越高越好。

图 6 如图 3, 但为 EXP04 结果

Fig. 6 Same as Fig. 3 but from EXP04

4.3.4 Eta 坐标（参考高度 0，模拟时长加大）

我们还发现，在垂直分辨率较低时（如 80 层），经过长时间积分调整，也能逐渐形成山脉波。从图 7 可以看出，该方案模拟出了地形波动的垂直传播及位相随高度向上游倾斜的特征，具有典型静力山脉波特征。进一步分析发现，80 层垂直分层情形下出现典型山脉波模态的时间约为 220000s，是相同垂直分辨率 Sigma 动力框架模拟生成山脉波模态所需时间的 6~7 倍。因此，对于 Eta 坐标动力框架而言，比起相同垂直分辨率的 Sigma 动力框架需要更长时间进行波动调整，才能在地形强迫下生成静力山脉波。

图 7 如图 3，但为 EXP05 结果
Fig. 7 Same as Fig. 3 but from EXP05

5 实例试验

5.1 北美大陆西风槽的模拟

5.1.1 试验方案

本节将利用 Eta 坐标 WRF 新动力框架对北美大陆西风槽演变进行模拟，并和原 Sigma 坐标框架模拟结果展开对比。表 3 给出北美大陆西风槽演变模拟试验方案。当前，模式分辨率取为 30km，时步 180s，积分 24h；模式东西、南北和垂直方向分别为 74、61 和 28 个格点（对应的地理空间范围为：86.4 °W~108 °W，25.5 °N~43.2 °N，0~19km），侧边界选为时变边界，垂直方向刚壁；不考虑任何物理过程。

表 3 北美大陆西风槽演变模拟试验方案

Table 3 The numerical experiment scheme for simulation on evolution of westerly trough in the North American Continent

模式选项	模拟方案
模式地形	利用 WRF_INPUT 地形，构造阶梯地形
初始条件	原 WRF_INPUT 初值
模式分辨率	30km
模式范围	74×61×28; 86.4 °W~108 °W，25.5 °N~43.2 °N，0~19km
时间步长	180s
模拟时长	2000 年 1 月 24 日 1200UTC 起报，运行 24h
侧边界	时变侧边界，垂直方向刚壁
物理过程	无

首先分析 Eta 和 Sigma 两个动力框架生成的模式地形之异同。图 8 给出原 WRF 模式地形和我们构造的阶梯地形分布。可以看出，新构造的阶梯地形与原 Sigma 坐标下追随地形具有较好一致，如 100m 平缓地形范围及 500m 以上较陡地形分布等。从地形高度量值看，新构造阶梯地形与原 WRF 地形之差在-40m 和 160m 之间，100m 以上地形高度差主要分布在 500m 以上较陡地形区域。这种差别可能来自于阶梯地形构造时标准大气状态的选择、Eta 垂直分层以及模式水平分辨率等因素的影响。

图 8 原 Sigma 坐标下 WRF 模式地形（a）和 Eta 坐标下 WRF 模式地形（b）（单位：m）

Fig. 8 The model terrain height (m): a) the original Sigma coordinate core, b) Eta coordinate core

从风场的纬向-高度剖面（见图 9）可以发现，Eta 和 Sigma 模式模拟的风场分布都是低层弱而高层强，槽区小而槽前、槽后大，且槽后更大；但 Eta 坐标新框架模拟的槽前高空风速偏弱。图 10 给出两垂直坐标框架下模拟 24h 的 500hPa 风场分布。可以发现，选用 Eta 和 Sigma 垂直坐标，模拟出一致的流场形势，即相似的流场强度和相近的气旋性流场分布；主要差别在 Sigma 坐标模式在（94°W、36°N）附近模拟出局地中尺度气旋性涡旋，但 Eta 坐标模式模拟出一致的偏南气流分布。

图 9 Eta 坐标新框架（a）和 Sigma 坐标原框架（b）模拟 12h 过 32°N 的风场纬向-高度剖面（单位：m/s）

Fig. 9 The 12h-simulated horizontal velocity across 32°N (m/s): a) Eta coordinate core, b) the original Sigma coordinate core

图 10 Eta 坐标新框架（a）和 Sigma 坐标原框架（b）模拟的 24h 500hPa 水平风场（单位：m/s）

Fig. 10 The 24h-simulated horizontal wind at 500hPa (m/s): a) Eta coordinate core, b) the original Sigma coordinate core

5.2 中国大陆槽脊系统的模拟

5.2.1 试验方案

最后，我们来分析 Eta 坐标新框架对中国大陆低槽和副高系统的模拟情况。通过该方案，主要分析新框架对我国重要天气系统的模拟性能。2012 年 7 月 21 日 03 时至 22 日 08 时，受贝加尔湖高空冷涡和西太平洋副热带高压共同影响，华北地区出现了一次大范围强降水天气过程。本节主要关注相关形势场的模拟情况。表 4 给出模拟试验方案。可以看出，模拟方案与上节相同，不同之处主要体现在模式水平范围，本方案涵盖 109°E~144.7°E，15°N~44.7°N 的水平区域；另外，试验从 2012 年 7 月 21 日 0000UTC 起报，运行 12h。

表 4 中国大陆槽脊系统模拟试验方案

Table 4 The numerical experiment scheme for simulation on continental weather systems in China

模式选项	模拟方案
模式地形	NCAR 5'原始地形构造阶梯地形
初始条件	FNL 分析资料（0~30km）
模式分辨率	20km
模式范围	109°E~144.7°E，15°N~44.7°N，0~30km
时间步长	120s
模拟时长	2012 年 7 月 21 日 0000UTC 起报，运行 12h
侧边界	固定侧边界，垂直方向刚壁
物理过程	无

5.2.2 试验结果分析

图 11 给出 Eta 坐标新框架对中国大陆低槽及副高系统的模拟结果，并和分析场进行比较。从 700hPa 风场分布可以看出，在副高控制区域，模拟形势以西南风为主，而分析则以南风为主。

图 11 Eta 坐标新框架模拟的 6h 700hPa 风矢量 (a) 和 FNL 分析场 (b) (单位: m/s)

Fig. 11 The 6h-simulated horizontal wind at 700hPa (m/s): a) the Eta coordinate core simulation, b) the analysis

6 总结与结论

本文的主要工作是通过在 WRF 模式中引入阶梯地形坐标, 构造适用于复杂地形的高精度新动力框架; 通过模式气柱质量变换方法, 巧妙实现了 Sigma 坐标和 Eta 坐标下控制方程形式的完全一致, 从而使 Eta 坐标 WRF 新动力框架计算更加便利、高效。

Eta 坐标下 WRF 动力框架搭建完成后, 设计理想和实例试验对新框架进行检验。主要结论如下:

(1) 从动力框架形式来看, Eta 垂直坐标和 Sigma 垂直坐标下 WRF 的差别主要体现在模式顶与参考面之间气柱的质量定义, 前者为 $P^2 = (\pi_s - \pi_t)/\eta_s$, 后者为 $\mu = \pi_s - \pi_t$ 。通过该质量变换设计, 使得两个动力框架形式完全一致, 从而使程序实现变得简单。

(2) 引入 AREM 参考大气状态用于构造 WRF 新动力框架阶梯地形, 虽然该大气状态仍有改进空间, 但其主要用于计算地表 Eta (η_s) 的初估值, 对阶梯地形设计和模式积分计算影响不大。此外, 通过设计阶梯地形 2D 和 3D 网格表征量使模式循环迭代与高阶差分计算过程更加简洁、高效。

(3) 理想和实例试验表明, Eta 坐标 WRF 动力框架运行稳定、计算合理。阶梯地形坐标动力框架可对静力地形波进行有效刻画, 但前提是提高垂直分辨率或延长模拟时间。再考虑阶梯地形先判断再计算的额外时耗, 相比 Sigma 坐标动力框架, 新框架计算花费更大。

本文主要围绕 Eta 垂直坐标 WRF 动力框架设计、实现及其验证展开, 数值试验尤其是实例试验分析仍显初步, Eta 和 Sigma 垂直坐标的差异及其原因有待今后深入分析讨论。另外, 模式现有初始化仅由插值实现, 物理过程参数化也未接入框架, 也不利于实例试验开展。

致谢: 本文得到国家重点研发计划 (2018YFC1507200、2017YFA0604000、2017YFB1002702) 国家自然科学基金 (91637211、61572058) 的资助。

参考文献 (References)

- Alaka M A. 1960. The airflow over mountains[R]. WMO Tech. Note 34, 135 pp.
- 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2018. 非静力 AREM 模式设计及其数值模拟 I: 非静力框架设计[J]. 大气科学, 42(6):1286–1296.
- 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2019. 非静力 AREM 模式设计及其数值模拟 II: 数值模拟试验[J]. 大气科学, 43(1): 1–12.
- Corby G A, Gilchrist A, Newson R L. 1972. A general circulation model of the atmosphere suitable for long period integrations[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 98: 809–832.
- Egger J. 1972. Incorporation of Steep Mountains into Numerical Forecasting Models[J]. Tellus, 24: 324–335.
- Eliassen A. 1949. The Quasi-Static equations of motion with pressure as independent variable[J]. Geof. Publ. XVII, No.3.
- Erdun H. 1997. Two-dimensional atmospheric flow modelling by using Schwarz-Christoffel transformation over complex topography[D]. Ph.D. thesis, ITU.
- Gal-Chen T, Somerville R C J. 1975. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes Equations[J]. J. Comput. Phys., 17: 209–228.
- Gallus W A, Joseph J R, Klemp B. 2000. Behavior of flow over step orography[J]. Mon. Wea. Rev., 128: 1153–1164.
- 何光碧, 彭俊, 屠妮妮. 2015. 基于高分辨率地形数据的模式地形构造与数值试验[J]. 高原气象, 34(4): 910–

- 胡江林, 王盘兴. 2007. 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, 31: 109–118.
- Janjic Z I, Gerrity J P Jr, Nickovic S. 2001. An alternative approach to nonhydrostatic modeling[J]. Mon. Wea. Rev., 129: 1164–1178.
- Janjic Z I, Black T L, Rogers E, et al. 2003. The NCEP Nonhydrostatic Meso Model (NMM) and first experiences with its applications[C]. EGS/EGU/AGU Joint Assembly, Nice, France, 6–11 April.
- 纪立人, 陈嘉滨, 张道民, 等. 2005. 数值预报模式动力框架发展的若干问题综述[J]. 大气科学, 29: 120–130.
- Klemp J B. 2011. A terrain-following coordinate with smoothed coordinate surfaces. Mon. Wea. Rev., 139: 2163–2169.
- Laprise R. 1992. The euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable[J]. Mon. Wea. Rev., 120: 197–207.
- 李超, 陈德辉, 李兴良, 等. 2019. 一种改进的平缓-混合地形追随坐标在 GRAPES 中尺度模式中的应用研究[J]. 气象学报, 77(6):1041–1052.
- 李兴良, 陈德辉, 沈学顺. 2005. 不同垂直坐标系对垂直速度计算的影响[J]. 热带气象学报, 21(3): 265–276.
- 李兴良, 陈德辉. 2005. 非静力中尺度高分辨率模式模拟中的垂直坐标影响研究[J]. 气象学报, 63(2): 161–172.
- Li Y, Wang B, Wang D, et al. 2014. An orthogonal terrain-following coordinate and its preliminary tests using 2-D idealized advection experiments[J]. Geoscientific Model Development, 7: 1767–1778.
- Mesinger F. 1983. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models, Res. Activities in Atmos. And Oceanic Modelling, Rep.5.WMO, Geneva, 4.9–4.10.
- Mesinger F. 2004. The steepness limit to validity of approximation to pressure gradient force: any signs of an impact? In: 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, Seattle. Am. Meteorol. Soc., p 1.19. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/71364.pdf>.
- Mesinger F, Chou S C, Gomes J, et al. 2012. An upgraded version of the Eta model[J]. Meteorol. Atmos. Phys., 116: 63–79.
- Mesinger F, Katarina V. 2017. Eta vs. sigma: review of past results, Gallus–Klemp test, and large-scale wind skill in ensemble experiments[J]. Meteorol. Atmos. Phys. doi: 10.1007/s00703-016-0496-3.
- Michalakes J, Chen S, Dudhia J, et al. 2001. Development of a next generation regional weather research and forecasting model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology. Reading, World Scientific Publishing: 269–276.
- Phillips N A. 1957. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting[J]. J. Meteorol., 14: 184–185.
- 普业, 王斌, 徐幼平, 等. 2008. 基于 MPI 技术的 AREM 模式并行开发及试验[J]. 气候与环境研究, 13: 675–680.
- 钱永甫, 颜宏, 骆启仁, 等. 1978. 一个有大地形影响的初始方程数值模式[J]. 大气科学, 2(2): 91–102.
- 钱永甫. 1985. 一个考虑地形的五层原始方程模式[J]. 高原气象, 4(2): 1–28.
- 钱永甫, 周天军. 1995. 有地形模式中气压梯度力误差扣除法[J]. 高原气象, 14: 1–9.
- Sangster W F. 1960. A method of representing the horizontal pressure force without reduction of station pressures to sea level[J]. J. Meteorol., 17: 166–176.
- Schar C, Leuenberger D, Fuhrer O, et al. 2002. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models[J]. Mon. Wea. Rev., 130: 2459–2480.
- Smagorinsky J, Strickler R F, Sangster W E, et al. 1967. Prediction experiments with a general circulation model[J]. Paper presented at Dynamics of Large Scale Atmospheric Processes, Moscow, USSR, 70–134.
- Steppeler J. 2002. Nonhydrostatic atmospheric modeling using a z-Coordinate representation[J]. Mon. Wea. Rev.,

130: 2143–2149.

屠妮妮, 陈静, 何光碧. 2012. 切比雪夫多项式展开滤波方案在模式地形的适用性研究[J]. 高原气象, 31(1): 47–56.

王斌, 赵颖. 2005. 一种新的资料同化方法[J]. 气象学报, 63: 694–701.

宇如聪. 1989. 陡峭地形有限区域数值预报模式设计[J]. 大气科学, 13: 139–149.

宇如聪, 徐幼平. 2004. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟[J]. 气象学报, 62: 715–724.

Zängl G. 2003. A generalized sigma-coordinate system for the MM5[J]. Mon. Wea. Rev., 131: 2875–2884.

张旭, 黄伟, 陈葆德. 2015. 一种新型高度地形追随坐标在 GRAPES 区域模式中的实现: 理想试验与比较研究[J]. 气象学报, 73(2): 331–340.

曾庆存. 1963. 大气运动的特征参数和动力学方程[J]. 气象学报, 33: 472–483.

曾庆存. 1979. 数值天气预报的数学物理基础[M]. 北京: 科学出版社.

曾庆存. 1982. 修改的 σ 坐标 (手稿).

赵鸣, 方娟. 1996. p- σ 混合坐标原始方程模式的改进和试验[J]. 高原气象, 15(2): 195–203.

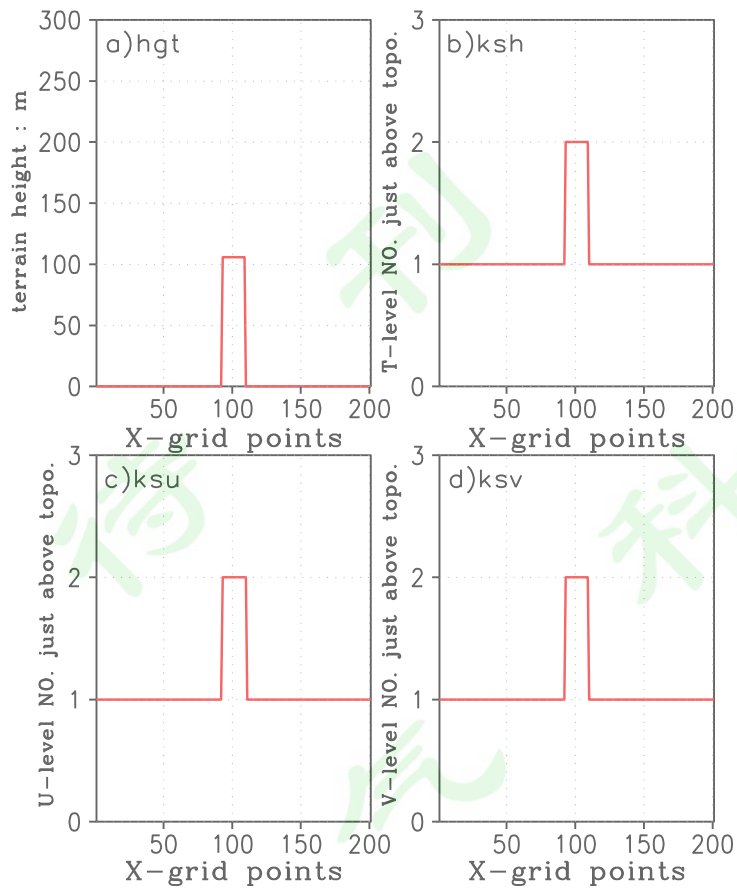


图 1 阶梯地形高度 (a, m) 及阶梯坐标模式 2D 表征量 ksh (b)、ksu (c)、ksv (d)
 Fig.1 The step mountain height (m) a), and the 2D-mesh indicators of step coordinate model ksh b), ksu c) and ksv d).

Relation between 3D-mesh and topo. for hill2d_x

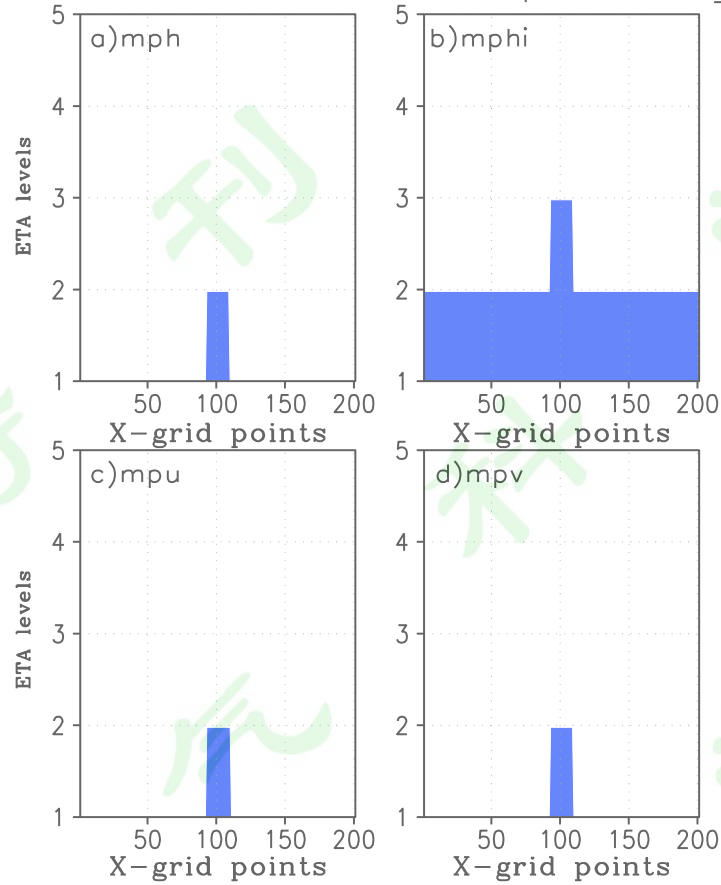


图 2 阶梯坐标模式 3D 表征量, (a) mph, (b) mphi, (c) mpu, (d) mpv; 颜色填充区域表示格点位于地形以下, 即 mph、mphi、mpu、mpv 为 0

Fig.2 The 3D-mesh indicators of step coordinate model, a) mph, b) mphi, c) mpu, and d) mpv. The shaded area shows grid points are below the step mountain, with zero values for mph, mphi, mpu and mpv.

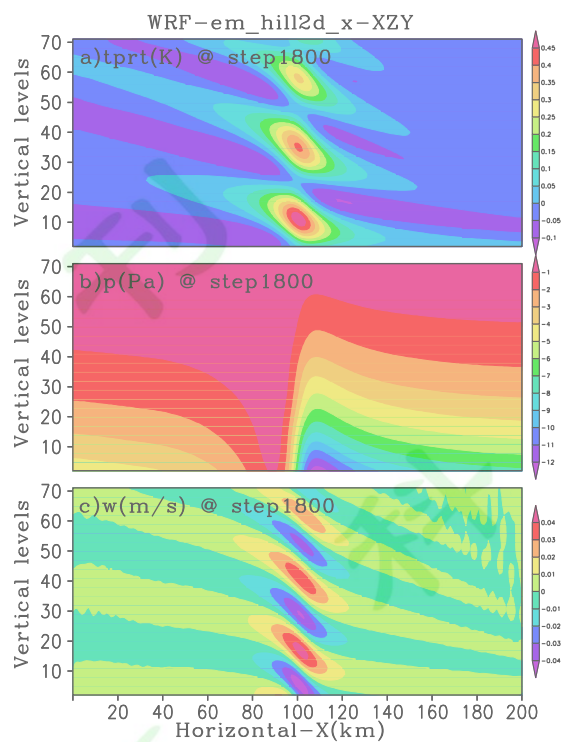


图 3 EXP01 山脉背风波动结构，(a) 扰动位温 (K)，(b) 扰动气压 (Pa)，(c) 垂直速度 (m/s)
 Fig. 3 The structure of mountain lee wave from EXP01: a) potential temperature anomaly (K), b) pressure anomaly (Pa) and c) vertical velocity (m/s)

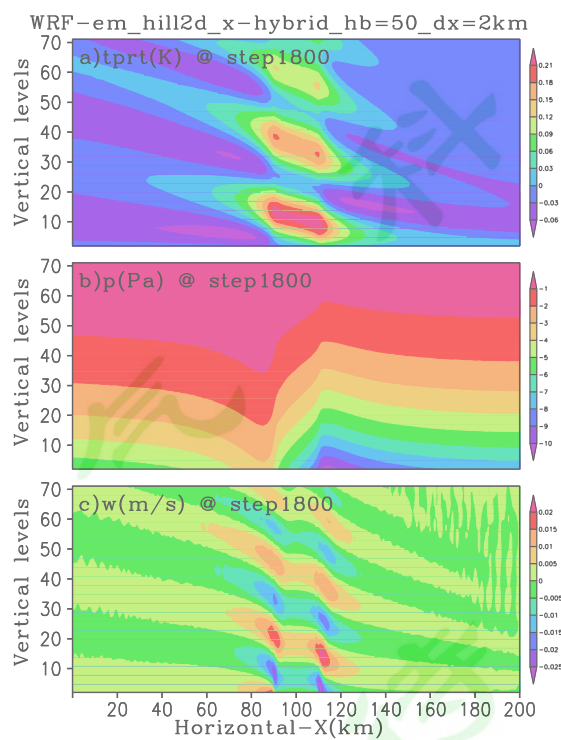


图 4 如图 3，但为 EXP02 结果
 Fig. 4 Same as Fig. 3 but from EXP02

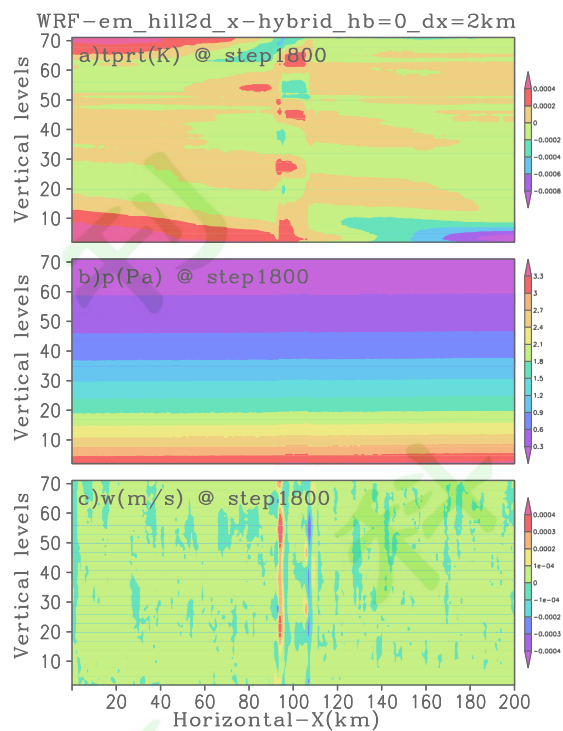


图5 如图3，但为EXP03结果

Fig. 5 Same as Fig. 3 but from EXP03

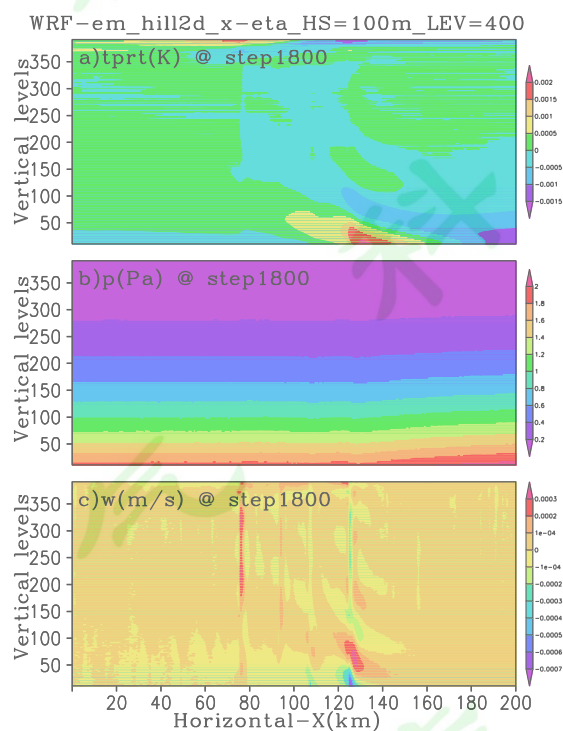


图6 如图3，但为EXP04结果

Fig. 6 Same as Fig. 3 but from EXP04

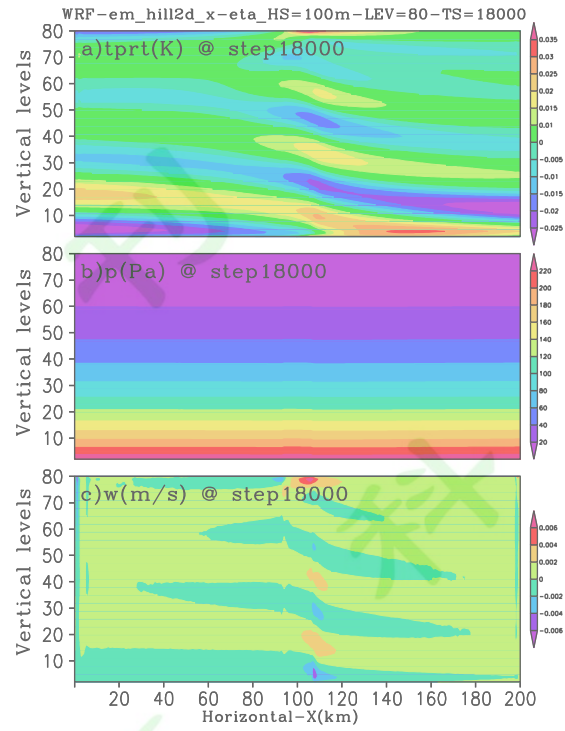


图7 如图3，但为EXP05结果

Fig. 7 Same as Fig. 3 but from EXP05

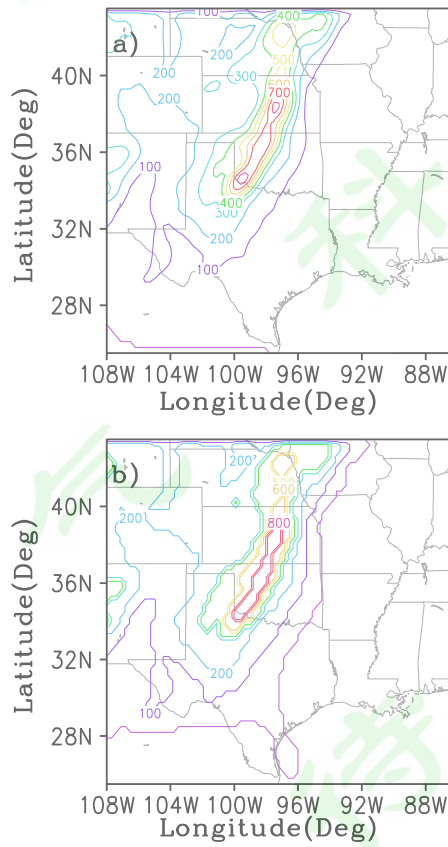


图8 原 Sigma 坐标下 WRF 模式地形 (a) 和 Eta 坐标下 WRF 模式地形 (b) (单位: m)

Fig. 8 The model terrain height (m): a) the original Sigma coordinate core, b) Eta coordinate core

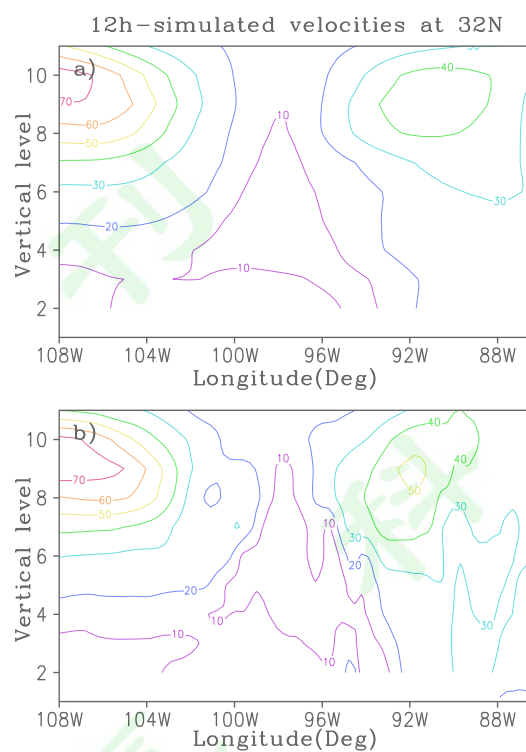


图 9 Eta 坐标新框架 (a) 和 Sigma 坐标原框架 (b) 模拟 12h 过 32°N 的风场纬向-高度剖面 (单位: m/s)

Fig. 9 The 12h-simulated horizontal velocity across 32°N (m/s): a) Eta coordinate core, b) the original Sigma coordinate core

24h-simulated wind vectors at 500hPa(m/s)

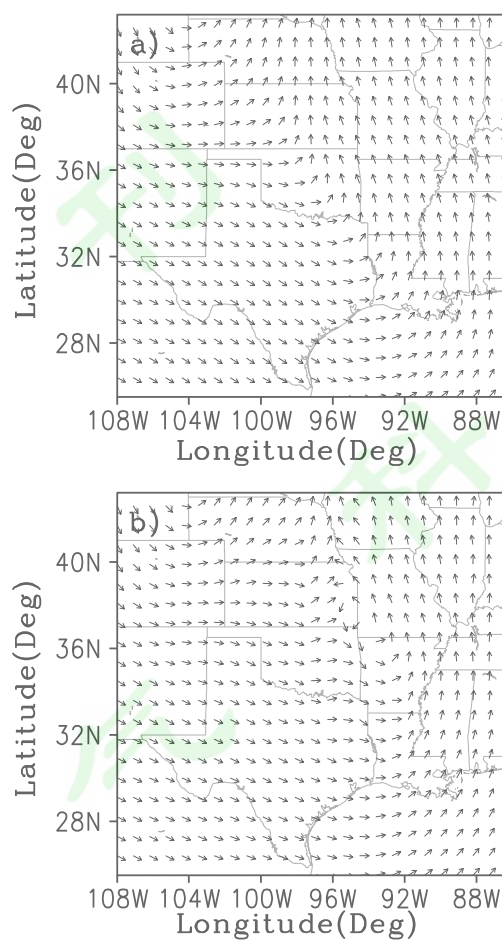


图 10 Eta 坐标新框架 (a) 和 Sigma 坐标原框架 (b) 模拟的 24h 500hPa 水平风场 (单位: m/s)

Fig. 10 The 24h-simulated horizontal wind at 500hPa (m/s): a) Eta coordinate core, b) the original Sigma coordinate core

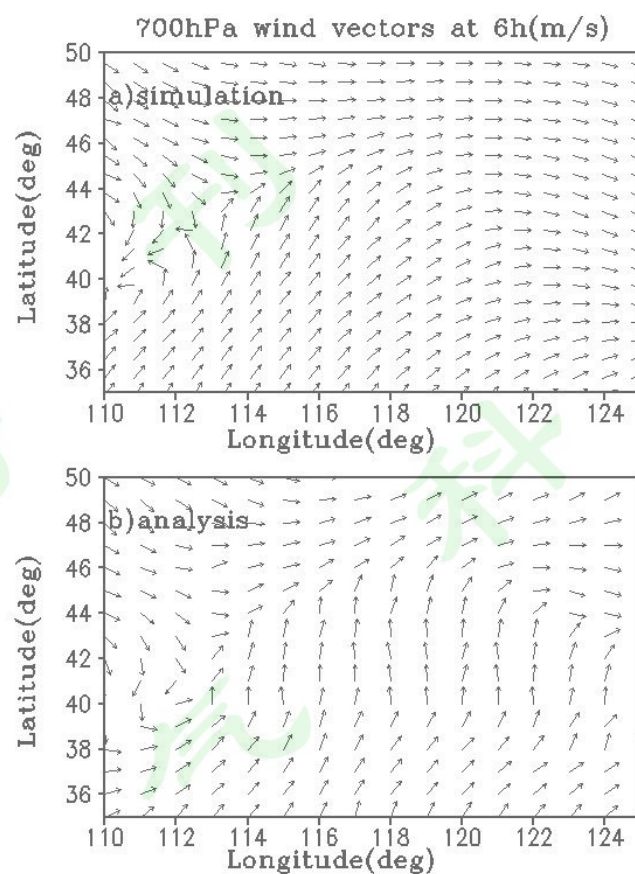


图 11 Eta 坐标新框架模拟的 6h 700hPa 风矢量 (a) 和 FNL 分析场 (b) (单位: m/s)

Fig. 11 The 6h-simulated horizontal wind at 700hPa (m/s): a) the Eta coordinate core simulation, b) the analysis