一种垂直分层方案及其在地形复杂区域预报中的应用研究

# 陈婉仪<sup>1,2</sup> 徐国强<sup>1,2</sup> 于翡<sup>1,2</sup>

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

2 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081

摘要:为提高 CMA-MESO 在高分辨率和复杂地形区域的预报能力,基于连续函数开发了一种适用于 6 7 高度地形追随坐标的垂直分层方案。该方案允许灵活设置垂直层数和模式顶高,并通过 b 参数调整最 低层高度。方案稳定,经各种调节后,仍能保持分层厚度的连续和平滑,和上疏下密的特点。新方案 8 在 CMA-MESO V6.0 进行应用试验, 与现有业务分层方案(meso 71) 对比, 相同层数的新方案(xu 71) 9 总体分布与业务方案相似,但连续性更好。在批量预报对比试验中,评估了等压面层要素的 RMSE、2 10 米温度预报的 RMSE 及累积降水的 TS 评分;结果表明, xu\_71 方案略优于 meso\_71。进一步分析了分 11 层 b 参数对 2 米温度预报的影响,发现稳定和超稳定下相似函数的不确定性会增加 2 米温度的诊断误 12 差,尤其是在最低层高度较大的情况下;并且相比于平坦区域,复杂地形更容易放大这种影响。最后, 13 通过本方案进行强降水预报的加密分层数值试验表明,加密至 91 层的 xu 91 方案在预报中效果较好, 14 15 主降水区超过 100 毫米的预报结果最接近实况。与分层最疏的 xu 51 方案相比, xu 91 预报出更深厚上 升区、更明显的垂直环流和水物质分布,以及更高的边界层高度和更强的感热通量。总体来看,本研 16 究的垂直分层方案效果较好,应用简便,还可结合物理参数化等研究进一步提升应用潜力。 17

18 关键词:垂直分层,垂直加密,强降水,近地层,相似函数,复杂地形

19

1

2

3

4

5

20 文章编号: 2024084A

21 **doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2505.24084

22

收稿日期: 2024-08-12, 网络预出版日期:

**作者简介:**陈婉仪,女,2000年生,硕士研究生,主要从事数值模式物理过程研究,Email: <u>chenwycmas@163.com</u> **通讯作者:**徐国强,主要从事数值模式物理过程研究,Email: xugq@cma.gov.cn **项目基金:**国家自然科学基金项目(U2142213,42175167)、中国气象局能力提升联合研究专项项目(22NLTSZ006)、中国气 象局青年创新团队(CMA2023QN06) 23

# A Vertical Layering Scheme and Its Application in Forecasting Over Complex Terrain Areas

25

26

24

CHEN Wanyi<sup>1,2</sup> XU Guoqiang<sup>1,2</sup> YU Fei<sup>1,2</sup>

#### 1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of the Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

27 28

2 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing, 100081, China

29 Abstract: To enhance the forecasting capabilities of CMA-MESO in high-resolution and complex terrain 30 areas, a layering scheme suitable for height based terrain-following coordinates was developed based on continuous functions. This scheme allows for easy adjustment of vertical layers and model top height, and 31 32 includes a parameter b to adjust the bottom layer thickness. The scheme is stable and maintains continuous 33 and smooth layer thickness, with denser layers near the surface. Tested in CMA-MESO V6.0, the new xu\_71 34 scheme (71 layers) showed similar characteristics to the existing meso 71 scheme but with better continuity. 35 Batch forecast comparisons evaluated RMSE of isobaric surface elements, 2-meter temperature forecasts, and TS for accumulated precipitation. Results indicated that xu\_71 performed slightly better than meso\_71. The 36 37 influence of parameter b on 2 m temperature forecast was analyzed with surface layer parameterization, 38 revealing that uncertainty in stable similarity functions can increase diagnostic errors, especially with thicker 39 bottom layers and in complex terrain. Numerical experiments for dense layering in heavy rainfall forecasts 40 showed that the xu\_91 scheme (91 layers) had better performance, with forecasts closer to actual observations 41 for areas exceeding 100 mm. Compared to the xu 51 scheme (51 layers), xu 91 predicted deeper updraft 42 zones, more distinct vertical circulation, better water distribution, higher boundary layer heights, and stronger 43 sensible heat fluxes. Overall, the designed vertical layering scheme is effective, easy to apply, and has the 44 potential for enhanced application with physical parameterization studies.

45 Keywords: regional model, vertical layering, vertical resolution, heavy rainfall, surface layer, similarity

46 functions, complex terrain





49 1 引言

近年来,国内外各数值预报中心提高模式(如 ECMWF、NCEP、CMA-GFS)预报性能的几大关 50 51 键技术基本相同,如卫星等稠密资料同化,模式动力框架和模式物理参数化技术改进。这些技术改进 无疑是很重要的,而大量的试验也表明提高模式分辨率也是非常重要的环节。提高模式分辨率,不仅 52 53 仅是提高模式水平分辨率,也包括模式垂直分辨率提高和垂直分层技术的改进。很多研究表明,垂直 54 分层技术改进确实可以很明显地影响模式的预报结果,合理的分层,不仅能减少模式积分误差,也可 以提高模式计算效率。关于垂直分层,最简单的莫过于均匀分层,但因为算力有限,均匀分层一般难 55 以取得好的效果。目前业务模式基本上采用下密上疏的非均匀分层方法,这种分层方法契合了大气质 56 量场的特点,得到了广泛应用。 57

近年来数值预报模式水平分辨率的不断提高,公里级甚至百米级的模式逐渐走入业务。然而,与 58 之相应,垂直分辨率也需要相应的提升,否则会导致虚假重力波增长,以及不稳定性和振幅的虚假增 59 长等问题,从而使得预报误差增长(Lindzen, Fox-Rabinovitz, 1989; Pecnick, Keyser, 1989)。随着模式技术 60 进步,提升数值模式垂直分辨率和垂直分层技术方面的研究也有很多进展(Bauer et al, 2013; 61 62 McTaggart-Cowan et al, 2019),提升模式的垂直分辨率可以在很多方面提高模式预报性能。例如在温度、 湿度或风的垂直梯度较大时,较低的垂直分辨率无法准确捕捉这些特征,增加垂直分辨率可以改善这 63 些问题,例如 Philip et al (2016)试验在较密的垂直分层下,由于夜间急流及边界层顶风切变被更好地刻 64 画,雾的模拟得到改善。 65

<sup>66</sup>增加垂直分辨率还可能对极端天气强度和分布有更好的呈现,其中热带气旋的模拟是很好的例子。
<sup>67</sup>Kimball, Dougherty (2006); Zhang, Wang, (2003)利用 MM5 模式模拟热带气旋的试验表明较高的垂直分
<sup>68</sup>辨率可更真实地再现热带气旋的强度、结构。邓莲堂,周嘉林 (2012)通过对台风"罗莎"的模拟发现
<sup>69</sup>垂直分辨率与水平分辨率相匹配时模式预报性能最佳。Zhang et al (2016)在 HWRF 中试验表明随着垂直
<sup>70</sup>层数的增加热带气旋的路径预报更加准确。麻素红等(2021)对 GRAPES\_TYM 实验表明,增加模式垂直
<sup>71</sup>分辨率显著减小强度预报负偏差,路径预报亦有改善。Xu et al (2022)在 TRAMS 模式试验将垂直分层
<sup>72</sup>从 65 层增加至 125 层,结果表明增加至 125 层后模式能够准确的捕捉到台风快速增强的过程。

73 在设计模式分层方案时,模式最低层高度的设置也十分重要。模式最低层高度的设置,不仅会影
74 响近地层气象要素诊断的精度,也会到影响模式近地层通量的计算是否准确。在模式积分过程中,近
75 地层要素诊断结果将直接影响到地面要素的预报精度,而由近地层参数化计算得到的动量通量、潜热
76 通量和感热通量等是否准确,将会显著地影响到模式积分效果。如 Ma et al. (2014)提出模式的层对热
77 带气旋的强度和结构有显著的影响,模式最低层高度放置过高会导致近地层通量被较严重地低估。因

78 此为了准确地计算模式的近地层动量、通量,模式的最低层高度必须放置在近地层以内(Aligo et al, 2009)。除此之外,模式积分过程中的近地层诊断量,如 2m 温度、10m 风等与分层设置也有很大关系, 79 (Jiang, Hu, 2023)试验认为,当模式最低层高度降低对于减小夜间2m温度,2m湿度的误差也有帮助。 80

CMA-MESO 模式(原 GRAPES-MESO)是我国自主发展的数值预报系统的区域模式版本。2004 81 年 CMA-MESO 2.0 版本模式开始投入业务应用,水平分辨率为 0.3°×0.3°。2016 年, GRAPES-MESO 82 升级到 4.0 版本(黄丽萍 等, 2017), 水平分辨率为~10km, 垂直层数从 31 层提升至 50 层, 垂直分层加 83 密后明显改进了对大到暴雨的预报(于翡 等, 2018)。CMA-MESO 5.1 版本,水平分辨率为~3km(黄丽萍 84 85 等, 2022)。2024年10月投入业务应用的CMA-MESO 6.0版本水平分辨率可达1km。

为了提高 CMA-MESO 的预报能力,开展针对性的研究是非常有必要的,特别是针对地形复杂区 86 87 域的地面要素预报难题,以及强降水等灾害性天气预报难题开展研究,研发性能好的垂直分层技术方 案是很关键的工作。本文基于连续函数发展了一个适应于高度地形追随坐标的分层方案。新方案简便 88 易用,满足下密上疏的特点,分层的厚度变化连续,单调增长;新方案是一连续函数,垂直层数可以 89 灵活设置,易于进行分层加密研究;方案也设置了调节参数,可以自由调节最低层的厚度,方便进行 90 近地层 比较研究。 91

本文将首先介绍分新分层方案的技术特点,并与 CMA-MESO 同类方案进行对比:接着介绍试验 92 93 中所采用的模式设置及数据。在此基础上评估新方案与 CMA-MESO 同类方案的性能; 进一步, 探讨 了分层设置对近地层要素诊断的影响,并结合近地层参数化分析分层参数设置对复杂地形区域 2m 温 94 度预报的作用;最后,开展了加密分层对强降水预报影响的研究。 95

垂直分层方案设计与应用 2 96

#### 2.1 垂直分层方案介绍 97

垂直分层方案基于 CMA-MESO 模式的技术特点进行设计, CMA-MESO 是 GRAPSE 模式(陈德辉, 98 沈学顺, 2006)的区域模式版本,为采用全可压非静力模式,采用半隐式半拉格朗日时间积分方案,采 99 用 Arakawa-C 和垂直 Charney-Philips 跳点设置。本文提出了一个可灵活调节垂直层数,模式顶、模式 100 101 底可调的,适应高度地形追随坐标的分层函数,其表达式如(1.1)(1.2):

102
$$\begin{cases} 0 \\ Z(k) = \Delta h_{U}(k-1) + \frac{(k_{\max} - b)\Delta h_{U}}{\pi} \sin\left(\frac{k_{\max} - 2 + k}{k_{\max} - 1}\pi\right) , 1 < k < k_{\max} \quad (1.1) \\ Z_{top} \\ k = k_{\max} \end{cases}$$
103
$$\Delta h_{U} = Z_{top} / (k_{\max} - 1) \quad (1.2)$$

 $\Delta h_U = Z_{top} / (k_{max} - 1)$ 

104 其中,  $k_{max}$  为总层数,  $Z_{top}$  为模式顶高度,  $\Delta h_U$  为均匀分层时模式每层的厚度, b 调节参数, 可以 105 调控模式最低层高度。

106 实际计算中可以先确定模式最低层高度,即Z(2),反算得到b,计算公式如(1.3)

107

$$b = k_{\max} + \frac{\left[1 - Z(2)/\Delta h_U\right]\pi}{\sin\left(\frac{k_{\max}}{k_{\max} - 1}\pi\right)}$$
(1.3)

108 由分层函数 Z(k)的分层得到的各层厚度,基本满足上疏下密的特征,根据其一阶导数 Z'(k),如
 109 式(1.4)

110 
$$Z'(k) = \frac{Z_{top}}{k_{max} - 1} \left[ 1 + \frac{k_{max} - b}{k_{max} - 1} \cos\left(\frac{k_{max} - 2 + k}{k_{max} - 1} \pi\right) \right]$$
(1.4)

111 首先,当b>1时,Z'(k)恒大于0,Z(k)保持单增对应地根据(1.3)式可以推导得到Z(2)满足(1.5)
112 式时,Z(k)保持单增。

(1.5)

113 
$$Z(2) < Z(2)_{\min} = Z_{top} \left[ \frac{1}{k_{\max} - 1} + \sin\left(\frac{k_{\max}}{k_{\max} - 1}\pi\right) / \pi \right]$$

114 通过分析 Z'(k)可以更详细地展示分层函数 Z(k)的性质。图 1 展示了不同 Z(2)下 Z'(k)的表现。
115 根据前文,分层函数 Z(k)在满足(1.5)式,即满足 Z(2) < Z(2)<sub>min</sub>,可以保持 Z(k)单增,即本分层方案
116 能正确的分层。即 Z(2)的设置不能小于图 1 中灰色实线的情况,否则会出现 Z(k)在小范围内单减。
117 然而根据试验, Z(2)<sub>min</sub>一般不会超过 2.5m,这在一般的中尺度模式分层设置中可以完全被满足。因此
118 可以认为在绝大部分情况下,可以保证 Z(k)单增。

119 进一步分析 Z'(k) 的性质,易得在  $k_{max} > b$  的条件下,Z'(k) 在  $[1,k_{max}]$  保持单增,此时分层厚度 120 可以保证上疏下密。结合(1.3)式,可知等价的条件是  $Z(2) < \Delta h_U$ 。当 $Z(2) = \Delta h_U$ 时,Z(k) 退化成均匀 121 分层 (如图 1 浅灰色虚线)。从不同 Z(2)的 Z'(k) 可以看出,Z(2)越小,Z'(k) 整体跨度更大;而Z(2)122 越大 Z'(k) 整体跨度越小,当Z(2) 越接近均匀分层厚度  $\Delta h_U$ 时,Z'(k) 越接近均匀分层函数的一阶导 123 数。换言之,在模式项高  $Z_{top}$ 和总层数  $k_{max}$  保持不变时,当Z(2)越小,模式最低层高度越小,接近模 124 式低层的分层也会更密,而模式的高层会更稀疏;反之,当Z(2)越大,接近模式底层的分层越稀疏, 125 而高层则相对更密,但中层厚度不受影响。



126

127 图 1分层函数的一阶导数示意图。灰色、蓝色、橙色、绿色、红色、紫色线分别是 Z(2)为 Z(2)min, 0.1、0.3、0.5、
 128 0.7、0.9 倍的均匀分层厚度的一阶导数;浅灰色虚线为均匀分层函数的一阶导数。

Figure 1 The first derivatives of the vertical layering function. The grey, blue, orange, green, red, and purple lines
 indicate Z(2) at values of Z(2)<sub>min</sub>, and 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, and 0.9 times of the first derivatives of the uniform layering
 thickness. The light grey dashed line represents the first derivative of the uniform layering function.

132 同时,可以看到Z'(k)在k=1和k=k<sub>max</sub>附近变化较小,在k=(k<sub>max</sub>+1)/2附近变化最大。这说
133 明,分层的结果在靠近模式底层和模式顶层,相邻层次之间厚度接近,而在中层相邻层次之间厚度变
134 化较大。而在 CMA-MESO 模式中,由于垂直方向上采用的中央差分。而当相邻两层厚度越接近,差
135 分计算精度越接近二阶精度,因此本文提出的分层方案在低层和高层可以接近二阶精度。

136 本文设计的新垂直分层方案(后文简写为 Xu 方案)。根据前文分析, Z(k)在Z(2)<sub>min</sub> < Z(2) < Δh<sub>U</sub>
 137 条件下可以保证Z(k)单增并且分层厚度保持上疏下密。

### 138 2.2 分层特征对比

在 CMA-MESO 6.0 版本已有多个分层方案,测试结果较好的是 meso\_71 方案,该分层方案固定为
71 层(故简称为 meso\_71)。Chen et al. (2023)通过反复试验,由一组分段函数计算得到 meso\_71 层
各层的权重系数,由权重系数可以计算出各层的高度地形追随坐标高度。meso\_71 方案,在接近模式
底的几层和接近模式顶的几层为均匀分层,其余部分则是非均匀分层。



144 图 2 meso\_71 (黑色) 与 xu\_71 (绿色) 垂直分层对比图 (a) 模式全层垂直分布, 灰色阴影为钟形地形; (b) 500m
 145 以下厚度-高度图

Figure 2 Vertical layering comparison between meso\_71 (black) and xu\_71 (green). (a) Vertical distribution of the entire
 model layer, with grey shading representing the bell-shaped terrain; (b) Thickness-height diagram below 500m.

148 本文的分层方案是单一函数,为了便于比较,也给出了一个 71 层的分层函数。根据前文(1.1)式, 149 选取参数b=3,可得到其分层函数Z(k)(简称: xu\_71)。用此方案与同类方案 meso\_71 进行对比。 150 总体来看,xu\_71 和 meso\_71 都满足分层上疏下密的特征。从图 2a 来看两个方案分层结果是比较相似 151 的,但在细节上略有不同。meso\_71 的第一层和第二层的厚度是相同的,第三层以后厚度逐渐加大, 152 有分段变化。xu\_71 相较于 meso\_71 的一大特点是其构造的函数为单一连续函数,因此靠近模式底的 153 几层厚度相近但不相同(图 2b)。在现在 b=3 的条件下,xu\_71 的接近模式底的几层厚度和接近模式项 154 的几层的厚度小于 meso\_71,而中层厚度较 meso\_71 略厚。

155 3 模式设置与数据

### 156 3.1 模式参数设置

143

157 模式的水平分辨率为 0.03°×0.03°,模拟范围为涵盖我国西南区域,经度范围: 90°E-117°E,
158 纬度范围: 20°N-38°N。物理过程与业务选项相同,微物理方案采用中国气象局自主开发的双参微物
159 理方案 LIUMA 方案(刘奇俊 等, 2003; Ma et al, 2022),长波辐射为 RRTM 方案(Mlawer et al, 1997),短
160 波辐射方案为 Dudhia 方案(Dudhia, 1989),近地层方案为 sfclay 方案,陆面过程为改进的 Noah 方案,

161 边界层参数化方案为 EDMF(Han et al, 2016)和 NMRF(Han, Pan, 2011; Liu et al, 2015)方案的结合,加入
162 了湍流地形拖曳方案(Beljaars et al, 2004),未启用对流参数化方案。初始时刻加利用云分析系统(朱立娟
163 等, 2017)引入初始云信息场。后文的试验均采用以上模式设置。

#### 164 3.2 数据说明

Ŕ

初始场和边界条件采用美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental
Prediction)的全球预报系统 GFS (Global Forecast System) 0.5 °× 0.5 °, 垂直层次 32 层的预报场数据。
模式中云分析所用资料包括:风云 2G 卫星的黑体辐射亮温(black-body temperature, TBB)及总云量(cloud
total amount, CTA),以及全国天气雷达组网雷达反射率因子。

本文用于检验预报的降水产品为中国区域融合降水分析系统 CMPAS (CMA Multi-source
Precipitation Analysis System)快速融合实况分析产品,水平分辨率 0.05 × 0.05 °, 2m 温度检验数据集
来自中国气象局陆面数据同化系统 CLDAS (CMA Land Data Assimilation System)陆面融合实况分析产
品,水平分辨率 0.05 × 0.05 °(师春香 等, 2019)。

173 模式气压层要素预报检验数据为 NCEP-GFS 分析场数据,水平分辨率 0.5°×0.5°, 垂直层次 32
 174 层。

175 4 试验与结果分析

176 为了了解本文提出的垂直分层方案的技术特点和性能,开展了两组试验。

177 第一组为常规预报试验,试验与常规业务模式的运行基本相同,各试验均采用 71 层,比较本方案
178 (xu\_71)与 CMA-MESO 6.0 同类方案 (meso\_71)预报效果,分析本方案 b 参数设置对预报结果的影
179 响作用,特别是地形复杂区域近地层要素预报的影响。

180 第二组为垂直加密分层的个例试验,利用新方案的技术特点进行加密分层试验,测试加密分层对181 强降水预报的影响作用。

#### 182 4.1 常规预报试验对比分析

183 常规批量试验,各试验设置相同的层数和模式顶高,初边值和模式选项相同。分层方案包括
184 CMA-MESO 6.0 业务的分层方案 (meso\_71)和本文方案 (xu\_71),方案 xu\_71 还设置了可用于调节的
185 b参数,不同的 b 参数对应不同最低层高度 (即 Z(2))。批量试验选取 2023 年 8 月 20 日-26 日,每天
186 00 时 (UTC)起报,预报时效 36 小时,试验成员如表 1。

试验名称	分层方案	总层数	模式最低层高度Z(2)
xu_71_b20	Xu 方案,见(1.1)	71	20 m
xu_71_b30	同上	71	30 m
xu_71_b40	同上	71	40 m
xu_71_b50	同上	71	50 m
meso_71	业务 71 层分层方案	71	22 m

Table 1 Information of Members in the First Experimental Group

第一组批量试验的评估,主要包括等压面各层高度、温度和风速预报的 RMSE,累积降水 TS 评分
和近地层 2 米温度预报 RMSE。批量试验评估结果表明,xu\_71 系列与业务方案 meso\_71 的等压面要
素场预报总体相近。风速和温度预报的 RMSE,各试验差别不大(图 3a,b)。位势高度场预报的 RMSE
略有差别,xu\_71 系列预报效果略好于 meso\_71。xu\_71 方案的 b 参数对高度场的预报有一定影响,RMSE
有随着模式最低层高度减少而升高的趋势(图 3c)。降水预报方面,xu\_71 系列与 meso\_71 总体持平,

194 个别量级如 0.1 mm、25 mm、50 mm, xu\_71\_b40、xu\_71\_b50 较 meso\_71 略优(图 3d)。



195

图 3 各试验(红色: xu\_71\_b20; 黄色: xu\_71\_b30; 蓝色: xu\_71\_b40; 绿色: xu\_71\_b50; 灰色: meso\_71) 2023
年 8 月 20 日-26 日 00 时起报预报 36 小时的平均等压面(a)风速; (b)温度; (c)位势高度场 RMSE 及(d) 24
小时累计降水 TS 评分。

Figure 3 Various experiments (red: xu\_71\_b20; yellow: xu\_71\_b30; blue: xu\_71\_b40; green: xu\_71\_b50; gray: meso\_71)
 temporal and isobaric averaged RMSE at 36-hour of (a) wind speed, (b) temperature, (c) geopotential height fields, and
 (d) 24-hour accumulated precipitation TS.

202 新方案设置的 b 参数,用于调节模式最低层高度,如前文所述, b 参数由模式最低层高度 Z(2)反算
203 得到。模式最低层高度是一个很重要的参量,直接与近地层通量计算和要素诊断有关。图 4 给出各试
204 验 2m 温度预报的 RMSE。可以看到, 2m 温度预报的均方根误差随着模式最低层高度减小而减小,这
205 种情况在夜间更明显,在午后差别相对较小。



 207
 图 4 2023 年 8 月 20 日-26 日预报 (a) 12 小时、(b) 24 小时、(c) 36 小时的 2m 温度均方根误差(t2m RMSE)。

 208
 红色、绿色、蓝色分别为 xu\_71\_b50, xu\_71\_b40, xu\_71\_b30, xu\_71\_b20.

Figure 4 2m temperature root mean square error (t2m RMSE) for the valid time of (a) 12 hours, (b) 24 hours, and (c) 36 hours. Red, green, orange, and blue lines represent xu\_71\_b50, xu\_71\_b40, xu\_71\_b30, and xu\_71\_b20, respectively.

新方案运行稳定且较为简便,效果与 MESO 6.0 的业务方案总体相当或略优。新方案另一个优点是
可以通过调节 b 参数提升模式的预报效果。评估分析中看到,等压面高度预报,xu\_71\_b50 相比 meso\_71
更有优势,而 xu\_71\_b20 与 meso\_71 基本持平;而 2m 温度预报表现有所不同,是 xu\_71\_b20 比 meso\_71
效果更好,而 xu\_71\_b50 不如 meso\_71。该现象还需进一步研究,以及后续的技术改进,以获得更好
的预报效果。

#### 216 4.2近地层变量与2米温度预报

206

217 上一节评估结果表明,2m温度预报误差与模式最低层高度有密切关系。这个现象表现很稳定,批
218 量试验中,每天均有类似情况,且夜间更明显。通过试验发现,地形复杂区域该表现更明显。下面将
219 结合近地层参数化进行初步的研究,以期为今后的技术改进提供参考。CMA-MESO 的近地层参数化
220 方案(SFCLAY)基于相似理论构建,详细参考本文附录A。

221 下面以 2023 年 08 月 26 日 00 时 (UTC)的 36 小时预报为例,结合近地层参数化中 2m 温度诊断
 222 的重要变量进行分析。

#### 223 **4.2.1** 分层参数 b 与近地层参数化

224 在近地层参数化方案中计算 2m 温度,首先计算 2m 位温,而近地层方案中的 2m 位温是由诊断得
 225 到,其诊断公式为(3.1)



229 其中 $\theta_g$ 为地表位温, $\theta_a$ 为模式最低半层高度位温, $z_0$ 为粗糙度长度, $\psi_h$ 为热量的积分相似函数, 230 *L*为 Obukhov 长度,*z*为模式最低半层高度, $x = [1-16(z/L)]^{1/4}$ 。而在近地层参数化方案中, $\psi_h$ 根 231 据总体理查森数  $Ri_b$ 的大小分类计算。 $Ri_b = 0$ 为中性状态,相似函数为 0;  $Ri_b < 0$ 为不稳定类,相似 232 函数可用(3.2)式直接计算;  $0 < Ri_b < 0.2$ 为一般性稳定类,相似函数用(3.3)式进行估算,但总体理查森 233 数接近 0.2 时,相似函数的数值向负的方向急剧增长,不确定性快速增加,容易造成计算偏差,超稳定 234 类( $Ri_b \ge 0.2$ )也有类似问题,相似函数值较难确定,容易造成计算偏差。详细 $\psi_h$ 的计算公式参见附 235 录 A。

236 图 5 给出了各试验在超稳定和不稳定下的 2m 位温误差分布。超稳定情况下的 2m 位温误差总体大
237 于不稳定下的 2m 位温误差。同时,超稳定情况下不同最低层高度 2m 位温的误差存在明显差异。随着
238 模式最低层高度的增加, 2m 位温的负偏差明显增加(图 5a)。然而,在不稳定的情况下,不同模式最
239 低层高度的 2m 位温误差变化不大(图 5b)。这说明导致 2m 温度预报误差在不同模式最低层高度出现
240 差异的主要是超稳定的部分。













 258
 图 6 不同稳定度下(a) Ri<sub>b</sub>>0.2; (b) 0<Ri<sub>b</sub><0.2; (c) Ri<sub>b</sub><0 各试验(红色: xu\_71\_b20; 黄色: xu\_71\_b30; 蓝</td>

 259
 色: xu\_71\_b40; 绿色: xu\_71\_b50) 的 2m 积分相似函数与总体理查森数的散点图。

Figure 6 Scatter plots of the 2m integrated similarity function versus bulk Richardson number for different stability
 conditions (a) Rib < 0.2, (b) 0 < Rib < 0.2, and (c) Rib < 0 from various experiments (red: xu\_71\_b20; yellow:</li>
 xu\_71\_b30; blue: xu\_71\_b40; green: xu\_71\_b50).

#### 263 4.2.2 地形复杂区域 2 米温度预报

257

264 分层b参数影响模式2m温度的预报误差,前一节结合近地层参数化讨论了不同稳定度层结的差别。
265 另外,在实际应用中也发现,地形复杂区域影响更为明显。在陆地,模式的粗糙度 z<sub>0</sub> 是通过土地类型
266 来计算,地形复杂区域的粗糙度明显大于地形平坦区域。表 2 给出不同的粗糙度范围下各试验的 2m 位
267 温预报的 RMSE。地形复杂区域(陆地, z<sub>0</sub> > 0.4)模式 2m 位温的 RMSE 明显大于地形平缓区域(陆地, z<sub>0</sub> < 0.08),并且 b 参数对于地形复杂区域影响更明显。</li>

结合上一节分析和 2m 位温诊断公式(3.1)可知,相似函数 ψ<sub>h</sub> 对模式最低层高度较敏感,也会引起
2m 位温的诊断误差。在地形平缓区域, z<sub>0</sub>较小, ln(z/z<sub>0</sub>)和ln(2/z<sub>0</sub>)量级较大,相似函数 ψ<sub>h</sub>带来影
响较小。而在地形复杂区域, z<sub>0</sub>较大, ln(z/z<sub>0</sub>)和ln(2/z<sub>0</sub>)量级与ψ<sub>h</sub>相当,而分式中ψ<sub>h</sub>贡献增大。
从表 2 中可以看到,地形复杂区域、模式最低层高度增加的分层, 2m 温度预报误差增长非常明显。前
一节分析已经指出,稳定、超稳定类相似函数算法影响较大,目前一些初步改进(见附录 B)验证了
上述的分析,改进相似函数算法确实可以明显减少地形复杂区域的预报误差,也可降低分层参数 b 的
氧感性。

		xu_71_b20	xu_71_b30	xu_71_b40	xu_71_b50
rmse	Z0>0.4	3.119898	3.28579	3.375192	3.44065
	Z0<0.08	2.320165	2.413612	2.440071	2.462352

#### 277 Table 2 RMSE of 2m potential temperature forecasts for various experiments under different roughness length

# 278 4.3 加密分层与强降水预报

#### 279 4.3.1 对比试验设计

第二组试验,为个例试验,探究在加密分层对模式降水预报影响。试验中式(1.1)中的b等于3,改 280 变总层数 k<sub>max</sub>,分别设置 k<sub>max</sub>分别为 51、61、71、81、91,并与业务的 71 层方案进行比较,各试验成 281 员如表 3 所示,具体分层情况如图 7。两组试验的模式顶高 Zton 均设置为 30000 m。模式起报时间为 2023 282 年 08 月 25 日 00 时 (UTC),预报时效 36 小时。此次对比试验所选取的个例为 2023 年 8 月由西南 283 涡引发的四川盆地区域强降水个例,过程最大 24 小时累计降水量约 186.4 毫米,四川盆地大部出现 284 大雨,有 247 个自动站录得超过 100 毫米降水。2023 年 8 月 25 日 00 时 (UTC),高原上的低压 285 系统开始移入四川盆地,同时中低层有很强的南风/西南风急流及良好水汽条件。中高层涡旋后侧有冷 286 空气侵入,进一步使得西南涡发展,总体有利于强降水的产生。西南涡是导致西南地区夏季暴雨的重 287 要系统,本个例是西南涡暴雨的典型个例,通过分析不同垂直层数的试验中的表现可了解复杂地形区 288 域暴雨预报的差异。 289

290

#### 表3第二组试验各试验成员信息

291

#### Table 3 Information of Members in the Second Experimental Group

试验成员名称	分层函数	总层数
xu_51	本文提出的分层函数,见(1.1)	51
xu_61	同上	61
xu_71	同上	71
xu_81	同上	81
xu_91	同上	91
meso_71	业务 71 层分层	71



 293
 图 7 第二组试验各成员 (黑色: meso\_71; 蓝色: xu\_51; 红色: xu\_61; 绿色: xu\_71; 灰色: xu\_81; 橙色: xu\_91)

 294
 垂直分层分层 (a) 层数-高度; (b) 厚度-高度; (d) 200 米以下的厚度-高度图。

Figure 7 Vertical layering of the second experimental group members (black: meso\_71; blue: xu\_51; red: xu\_61; green:
 xu\_71; gray: xu\_81; orange: xu\_91) showing (a) number of layers versus height, (b) thickness versus height, and (c)
 thickness versus height below 200 meters.

#### 298 4.3.2 对比试验分析

292

2023 年 8 月 25 日-26 日受西南涡的影响四川盆地区域有良好的动力条件,同时来自南侧有低空急
流供应水汽(图略),使得四川盆地普降大雨,局部达暴雨。预报 36 小时的 24 小时累计降水 TS 评分,
中 xu\_91 表现最优。在各量级 TS 评分 xu\_91 均表现较好(图 8a),特别是 10mm 及 25mm 两个量级优
势较明显。且在 0.1-50mm 量级上,而 xu\_91 的 Bias 相比其他试验在更接近 1 (图 8b)。

303 进一步分析降水分布,各试验都预报出了与观测相一致的东北-西南向的暴雨带(图9)。进一步对
304 比发现 xu\_91 的暴雨预报与实况最吻合。仅有 xu\_91 预报出了与观测相一致的 2 条细长平行的暴雨落
305 区,且在主降水区 xu\_91 预报出了最多的降水超过 100mm 的区域(如图 9g 灰色框内所示)。总体上看,
306 本个例降水预报, xu\_71、xu\_91 各量级降水预报 TS 相比业务使用 meso\_71 略优或基本持平, xu\_91
307 也体现了加密分层的效果。







308

313

 309
 图 8 各试验(黑色: meso\_71, 蓝色: xu\_51, 红色: xu\_61, 绿色: xu\_71, 灰色: xu\_81, 橙色: xu\_91) 预报

 310
 36 小时的 24 小时累计降水各量级的 (a) TS 评分及 (b) Bias 评分。

Figure 8 (a) TS and (b) Bias of 24-hour accumulated precipitation at various levels for the 36-hour valid time from
different experiments (black: meso\_71; blue: xu\_51; red: xu\_61; green: xu\_71; gray: xu\_81; orange: xu\_91).



 314
 图 9 2023 年 8 月 25 日 12 时-26 日 12 时的 24 小时累计降水 (单位: mm)(a) 实况观测, (b) meso\_71, (c) xu\_51,

 315
 (d) xu\_61, (e) xu\_71, (f) xu\_81, (g) xu\_91, (h)对应区域的地形高度 (单位 m)。

Figure 9 24-hour accumulated precipitation (units: mm) from 12:00 August 25, 2023, to 12:00 August 26, 2023 (a) observations, (b) meso\_71, (c) xu\_51, (d) xu\_61, (e) xu\_71, (f) xu\_81, (g) xu\_91 and (h) Terrain height (unit: m).

318 进一步对比层数最少的 xu\_51 与分层层数最多的 xu\_91 的差异,分析加密分层对于本次过程降水
319 预报的影响,特别是强降水方面的差异。图 9a, c,g中灰色框区域的逐小时降水如图 10 所示,在 8 月

320 25 日 00 时-22 时 (UTC),该区域平均逐小时观测降水量均在 5mm 以下,降水量最大贡献的时间区间
321 在 25 日 22 时-26 日 06 时 (UTC) 左右,之后迅速回落;最大小时降水出现在 26 日 03 时 (UTC),降
322 水量约为 12 mm (图 10); xu\_91 在该区域预报的最大小时降水略高于 10 mm,时间上相比实况滞后了

323 1小时,而 xu\_51 预报的该区域最大小时降水为 8 mm 滞后于实况 2 小时。



324

 325
 图 10 实况(黑色)与试验 xu\_51 (蓝色), xu\_91 (橙色)预报的 2023 年 08 月 25 日 01 时-26 日 12 时 (UTC)

 326
 的图 9 灰色框区域平均小时降水演变

Figure 10 Evolution of average hourly precipitation in the gray boxed area of Figure 9 from 01:00 UTC on August 25,
 2023, to 12:00 UTC on August 26, 2023, as observed (black) and forecasted by experiments xu\_51 (blue) and xu\_91
 (orange).

330 对比 xu\_51 和 xu\_91 图 9c, g 灰色框区域平均内各气压层上垂直速度随时间的演变(图 11),可以
331 看到在该区域 25 日 06 时(UTC)二个试验都预报出了一对较明显的正负速度对,与图 10 中 25 日 06
332 时(UTC)的小降水峰值对应。而在 25 日 20 时-26 日 06 时(UTC)两个试验都预报出了较为深厚的
333 上升运动,这与最强降水时段相对应。但相较之下 xu\_91 上升速度区域明显更加深厚,上升运动最大
334 值区域位置更低,位于 600-500 hPa 之间(图 11b)。而 xu\_51 预报的上升速度最大值区域则出现在 400hPa
335 (图 11a),中低层垂直速度相对于 xu\_91 明显偏弱。

336 进一步分析 8 月 26 日 03 时(UTC)沿图 9c,g红色实线的垂直剖面图,在107.5°E附近(与灰色
337 框区域对应)xu\_91 预报出十分明显的深厚的垂直上升速度,整体上升速度大值区从 800 hPa 延伸至 300
338 hPa 以上(图 12b)。相比之下,xu\_51 预报的上升速度区较为分散,尽管也有较大的垂直速度区,但垂
339 直上较为分散,没有形成深厚的上升运动。







Figure 11 Time-pressure diagrams of average vertical velocity in the gray boxed area of Figure 9 forecasted by
 experiments (a) xu\_51 and (b) xu\_91. The x-axis represents time, with the first two digits indicating the date and the last
 two digits indicating the hour (UTC). The y-axis represents pressure levels in hPa.



347 图 12 试验(a) xu\_51 和(b) xu\_91 预报的 2023 年 08 月 26 日 03 时(UTC) 沿图 9 红线的垂直剖面图,箭头为
 348 风,填色为垂直速度。



355 且没有与云水的峰值区在垂直上对应(图 13a)。同时结合图 12b 和图 13b,可以看到 xu\_91 预报有更
356 加明显的云的出流,在 108° E、300hPa 附近,紧邻上升运动大值区有下沉运动以及一定量级向下延伸
357 的云冰。总的来说, xu\_91 的上升区更深厚,垂直环流更明显,对应地垂直上各种水物质配合更好,因

358

359



360 图 13 同图 12,但黄色绿色填色为云水,灰色填色为云冰。绿色、青色、蓝紫色等值线分别为雨水、霰和雪。

Figure 13 Same as Figure 12, but with yellow-green shading for cloud water, gray shading for cloud ice, and contour
 lines in green, cyan, and blue-violet representing rainwater, graupel, and snow, respectively.

363 另外,由于 xu\_91 相比 xu\_51 在低层的层数更多,更多的低层层数有利于改善边界层低空急流预
报效果。在 26 日 00 时(UTC)前后,900hPa 处沿图 9h 黑色实线 106°E-108°E 有较明显的东南风急流
365 (图略)。暴雨区位于边界层急流出口区的右侧,边界层急流有利于触发强降水。沿图 9h 黑色实线做
366 垂直剖面,低层沿黑色实线的水平风速如图 14 所示。可以看到,xu\_91 预报的边界层急流较 xu\_51 更
明显,整体高度也更低。总体而言,xu\_91 预报出了更强的边界层急流有利于触发对流不稳定能量的释
368 放,进一步产生更强的上升运动。



 370
 图 14 (a) xu\_51 和 (b) xu\_91 预报的 2023 年 08 月 26 日 00 时 (UTC) 沿图 9h 黑色实线的垂直剖面图,填色

 371
 为沿黑色实线方向的水平风速。

Figure 14 The vertical cross-section along the black solid line in Figure 9h, forecasted by (a) xu\_51, and (b) xu\_91 at
00:00 UTC on August 26, 2023. The shading represents the horizontal wind speed along the direction of the black solid
line.

375 由图 7 可知, xu\_91 的模式最低层高度更低。如前文,模式最低层高度,会影响模式的边界层相关
376 变量的计算。有研究指出,更低的模式最低层高度会使得模式计算的边界层高度更高(Shin et al, 2012)。
377 图 15 给出了 xu\_91 和 xu\_51 预报四川盆地的边界层高度的差值日变化。可以看到, xu\_91 预报的边界
378 层高度在中午时分明显高于 xu\_51 (图 15a, b),夜晚后这种差异逐渐减小,日出时差异又逐渐回升,
379 到第二日中午差值又回升到最高水平。

分析了(图9所示灰色框小区域内平均)xu\_51和xu\_91预报的感热通量、潜热通量以及边界层高 380 度随时间的变化。在所有预报时间内 xu 91 的边界层高度大于或基本大于 xu 51 (图略)。而对于感热 381 通量,在 25 日 0-6 时(UTC)时段内,两个试验预报的感热通量大于 0, xu\_91 的感热通量明显大于 382 xu\_51。而在 25 日 06 时(UTC)之后两个试验预报的感热通量逐渐转为负值,整体转为大气向下加热 383 下垫面,而在感热通量向下的情况下,xu\_91的绝对值依然大于 xu\_51。所以总体而言,xu\_91 预报的 384 感热通量及边界层高度大于 xu\_51。而潜热通量,除去发生强降水的时段外, xu\_91 预报整体略高于 385 386 xu 51。更高的 PBLH 意味着更强烈的湍流混合,在感热通量为正值时, xu 91 预报的更强的湍流混合 使得更多的不稳定能量输送到自由大气。而当感热通量向下时,有利于下垫面增温,使得低层累积不 387 稳定能量,同样地在这种情况下 xu\_91 也有利于低层累积更多的不稳定能量。潜热通量同理不再赘述。 388 总体来看, xu\_91 加密试验的动热力条件有利于预报出强降水产生。 389



391 图 15 四川盆地区域 (a) 25 日 14 时 (BJT); (b) 25 日 20 时 (BJT); (c) 26 日 02 时 (BJT); (b) 26 日 08 时
 392 (BJT); (b) 26 日 14 时 (BJT); (b) 26 日 20 时 (BJT) 预报的 xu\_91 与 xu\_51 的边界层高度的差值 (单位:
 393 m)

Figure 15 Differences in boundary layer height (units: m) between xu\_91 and xu\_51 forecasts for the Sichuan Basin
region at (a) 14:00 on the 25th (BJT), (b) 20:00 on the 25th (BJT), (c) 02:00 on the 26th (BJT), (d) 08:00 on the 26th
(BJT), (e) 14:00 on the 26th (BJT), and (f) 20:00 on the 26th (BJT).

# 397 5 结语与讨论

390

398 基于连续函数发展了一个适用于高度地形追随坐标的新分层方案,新方案可以方便设置垂直层数
399 和模式顶高,也设置了 b 参数用于调节模式最低层高度。新方案具有分层连续平滑、计算简单,且能
400 保持分层上疏下密特的特点。方案在 CMA-MESO V6.0 进行应用,在完成与 CMA-MESO V6.0 同类方
401 案对比后,利用提出的分层函数在地形复杂的中国西南地区进行了两组试验,并分析了试验结果。结
402 果表明,在 3km 的水平格距下,本研究提出分层方案相比原业务方案 meso\_71 总体预报效果略好。

403 新方案设置了可调节模式最低层高度 b 参数,文中结合近地层参数化分析了分层 b 参数影响 2m 温
404 度预报的一些原因。分析中发现近地层参数化方案中稳定、超稳定类部分相似函数的不确定性,容易
405 增长 2 米温度的诊断误差,模式最低层高度增大,影响会更为明显,且在地形复杂区域这种影响更为
406 突出;从批量试验结果看,改进近地层参数化方案,优化分层技术是非常有必要。分层方案中 b 参数,
407 可用于调节模式最低层高度,模式最低层高度适当增大,有利于等压面高度等要素预报,但可能增加
408 近地层要素预报误差。要减少地形复杂区域的地面要素预报误差,降低分层参数 b 的敏感性,改进相
409 似函数算法是比较重要的。

410 另外结合新方案可以灵活改变层数的特点,分析了分层加密对强降水预报的影响。加密试验看出,
411 加密分层能预报出了更深厚的上升区,更明显的垂直环流、配合更好的水物质的分布及更明显的边界
412 层急流,也能预报出更高的边界层高度和更强的感热通量。总体上,加密分层更有利于强降水的预报。

413 总体上,本文提出的分层方案效果较好,但目前是初步试验,还有待更深入的研究。同时,也有
414 研究提出增加垂直分辨率不能改进改进所有量级的降水,主要是对大量级的降水有改进(于翡 等,
415 2018),也有研究指出增加垂直分辨率以期得到明显的降水改进是困难的(Aligo et al, 2009; Lee et al,
416 2019),需要进一步探究垂直分层与物理过程中的相互作用(Aligo et al, 2009; Lee et al, 2019; Xu et al,
417 2022; McTaggart-Cowan et al, 2019)才能够最大限度的发挥垂直分层加密带来的正效果。后续仍需要结
418 合相关物理过程,进行更大范围、更长时间的测试和更深入的改进研究。

419 参考文献

420 陈德辉, 沈学顺, 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报(6): 773-777. Chen
421 Dehui, Shen Xueshun. 2006. Recent Progress on GRAPES Research and Application [J]. Journal of
422 Applied Meteorology (in Chinese), (6): 773-777.

423 邓莲堂,周嘉林, 2012. 不同垂直分辨率对台风数值模拟影响的敏感性试验[J]. 气象与减灾研究, 35(1):
424 17-20. Deng Liantang, Zhou Jialin. 2012. Sensitivity test of different vertical resolution affect on numerical simulation of typhoon [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 35(1):
426 17-20.

427 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES\_MesoV4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学
428 报,28(1): 25-37. Huang Liping, Chen Dehui, Deng Liantang, et al. 2017. Main technical improvements
429 of GRAPES Meso V4.0 and verification [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 28(1): 25-37,
430 doi:10.11898/1001-7313.20170103.

431 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等, 2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报(06): 641-654.
432 Huang Liping, Deng Liantang, Wang Ruichun, et al. 2022. Key technologies of CMA-MESO and
433 application to operational forecast [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), (06): 641-654,
434 doi:10.11898/1001-7313.20220601.

刘奇俊,周秀骥,胡志晋, 2003. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)云降水显式方案[J].
应用气象学报: 60-67. Liu Qijun, Zhou Xiuji, Hu Zhijin. 2003. Explicit cloud schemes of HLAFS and
simulation of heavy rainfall and clouds, part I: explicit cloud schemes [J]. Journal of Applied
Meteorology (in Chinese), 60-67.

439 麻素红, 张进, 瞿安祥, 等, 2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES\_TYM 台风预报的影响[J].
440 气象学报, 79(1): 94-103. Ma Suhong, Zhang Jin, Qu Anxiang, et al. 2021. Impacts to tropical cyclone

- 441 prediction of GRAPES\_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast
  442 domain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 79(1): 94-103, doi:10.11676/qxxb2020.067.
- 443 师春香, 潘旸, 谷军霞, 等, 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报: 774-783. Shi
  444 Chunxiang, Pan Yang, Gu Junxia, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion
  445 product [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 774-783, doi:10.11676/qxxb2019.043.
- 446 于翡,黄丽萍,邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J].
- 大气科学, 42(5): 1146-1156. Yu Fei, Huang Liping, Deng Liantang. 2018. Impacts of different
  GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China [J]. Chinese Journal of
  Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1146-1156, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17221.
- 450 朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学
- 451 报, 28(1): 38-51. Zhu Lijuan, Gong Jiandong, Huang Liping, et al. 2017. Three-dimensional cloud initial
  452 field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting [J]. Journal of Applied
  453 Meteorology (in Chinese), 28(1): 38-51, doi:10.11898/1001-7313.20170104.
- Aligo E A, Gallus W A, Segal M, 2009. On the Impact of WRF Model Vertical Grid Resolution on Midwest
  Summer Rainfall Forecasts[J]. Weather and Forecasting, 24(2): 575-594,
  doi:10.1175/2008WAF2007101.1.
- 457 Arya S P, 1988. Introduction to micrometeorology[M]. San Diego: Academic Press.
- Bauer P, Beljaars A, Ahlgrimm M, et al., 2013. Model Cycle 38r2: Components and
  Performance[R]//ECMWF Technical Memoranda. 58. https://www.ecmwf.int/node/7986,
  doi:10.21957/xc1r0lj6l.
- Beljaars A C M, Brown A R, Wood N, 2004. A new parametrization of turbulent orographic form drag[J].
  Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130(599): 1327-1347, doi:10.1256/qj.03.73.
- Chen C, Li X, Xiao F, et al., 2023. A nonhydrostatic atmospheric dynamical core on cubed sphere using
  multi-moment finite-volume method[J]. Journal of Computational Physics, 473: 111717,
  doi:10.1016/j.jcp.2022.111717.
- 466 Dudhia J, 1989. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a
  467 Mesoscale Two-Dimensional Model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 46(20): 3077-3107,
  468 doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
- Han J, Pan H L, 2011. Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast
  System[J]. Weather and Forecasting, 26(4): 520-533, doi:10.1175/WAF-D-10-05038.1.

- Han J, Witek M L, Teixeira J, et al., 2016. Implementation in the NCEP GFS of a Hybrid Eddy-Diffusivity
  Mass-Flux (EDMF) Boundary Layer Parameterization with Dissipative Heating and Modified Stable
  Boundary Layer Mixing[J]. Weather and Forecasting, 31(1): 341-352, doi:10.1175/WAF-D-15-0053.1.
- 474 Izumi Y, 1971. Kansas 1968 field program data report[M]. Air Force Cambridge Research Laboratories.
- Jiang L, Hu J, 2023. Influence of the lowest model level height and vertical grid resolution on mesoscale
  meteorological modeling[J]. Atmospheric Research, 296: 107066, doi:10.1016/j.atmosres.2023.107066.
- Jim énez P A, Dudhia J, Gonz ález-Rouco J F, et al., 2012. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer
  Formulation[J]. Monthly Weather Review, 140(3): 898-918, doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1.
- Kimball S K, Dougherty F C, 2006. The Sensitivity of Idealized Hurricane Structure and Development to the
  Distribution of Vertical Levels in MM5[J]. Monthly Weather Review, 134(7): 1987-2008,
  doi:10.1175/MWR3171.1.
- 482 Lee E, Lee E H, Choi I J, 2019. Impact of Increased Vertical Resolution on Medium-Range Forecasts in a
  483 Global Atmospheric Model[J]. Monthly Weather Review, 147(11): 4091-4106, doi:10/g8xbkx.
- Lindzen R S, Fox-Rabinovitz M, 1989. Consistent Vertical and Horizontal Resolution[J]. Monthly Weather
  Review, 117(11): 2575-2583, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<2575:CVAHR>2.0.CO;2.
- Liu K, Chen Q, Sun J, 2015. Modification of cumulus convection and planetary boundary layer schemes in the
  GRAPES global model[J]. Journal of Meteorological Research, 29(5): 806-822,
  doi:10.1007/s13351-015-5043-5.
- Ma Z, Fei J, Huang X, et al., 2014. Impacts of the lowest model level height on tropical cyclone intensity and
  structure[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 31(2): 421-434, doi:10.1007/s00376-013-3044-9.
- 491 Ma Z, Liu Q, Zhao C, et al., 2022. Impacts of transition approach of water vapor-related microphysical
  492 processes on quantitative precipitation forecasting[J]. Atmosphere, 13(7): 1133,
  493 doi:10.3390/atmos13071133.
- McTaggart-Cowan R, Vaillancourt P A, Zadra A, et al., 2019. Modernization of Atmospheric Physics
   Parameterization in Canadian NWP[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres:
  RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research:
  Atmospheres, 102(D14): 16663-16682, doi:10.1029/97JD00237.
- Pecnick M J, Keyser D, 1989. The effect of spatial resolution on the simulation of upper-tropospheric
  frontogenesis using a sigma-coordinate primitive equation model[J]. Meteorology and Atmospheric
  Physics, 40(4): 137-149, doi:10.1007/BF01032454.

- Philip A, Bergot T, Bouteloup Y, et al., 2016. The Impact of Vertical Resolution on Fog Forecasting in the
  Kilometric-Scale Model AROME: A Case Study and Statistics[J]. Weather and Forecasting, 31(5):
  1655-1671, doi:10.1175/WAF-D-16-0074.1.
- Shin H H, Hong S Y, Dudhia J, 2012. Impacts of the Lowest Model Level Height on the Performance of
  Planetary Boundary Layer Parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 140(2): 664-682,
  doi:10.1175/MWR-D-11-00027.1.
- Xu D, Liang J, Lu Z, et al., 2022. Improved Tropical Cyclone Forecasts with Increased Vertical Resolution in
  the TRAMS Model[J]. Journal of Tropical Meteorology, 28(4): 377-387,
  doi:10.46267/j.1006-8775.2022.028.
- Zhang B, Lindzen R S, Tallapragada V, et al., 2016. Increasing vertical resolution in US models to improve
   track forecasts of Hurricane Joaquin with HWRF as an example[J]. Proceedings of the National Academy
   of Sciences, 113(42): 11765-11769, doi:10.1073/pnas.1613800113.
- Zhang D L, Wang X, 2003. Dependence of Hurricane intensity and structures on vertical resolution and
   time-step size[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20(5): 711-725, doi:10.1007/BF02915397.
- 516

## 517 6 附录A

518 近地面层的湍流过程是数值天气预报模式中非常重要的物理过程,目前业务上的近地层参数化方
519 案主要是基于相似理论来构建的,考虑了近地层常值通量特性,分别定义了动量通量、感热通量和水
520 汽通量的计算公式,如下:

521

522

523

 $\tau = \rho u_*^2 = \rho C_d U^2$ (A.1)  $Hflux = -\rho c_p u^* \theta^* = H_c \left(\theta_a - \theta_g\right)$ (A.2)  $Qflux = \rho u^* q^* = Q_c \left(q_a - q_g\right)$ (A.3)

524 式中 $\tau$ , *Hflux*和*Qflux*是动量通量、感热通量和水汽通量。 $u^*$ ,  $\theta^*$ 和 $q^*$ 分别是摩擦速度、温度尺 525 度和水汽尺度。 $\theta_a$ ,  $\theta_g$ ,  $q_a$ ,  $q_g$ 是分别近地层位温、地表层位温、近地层比湿和地表层比湿;  $H_c$ 和 $Q_c$ 526 分别是感热通量和水汽通量交换系数。

527 根据 Monin-Obukhov 相似理论,进行无量纲化相似函数构造,如下:

$$\frac{kz}{u^*}\frac{\partial u_a}{\partial z} = \phi_m\left(\frac{z}{L}\right); \quad \frac{kz}{\theta^*}\frac{\partial \theta_a}{\partial z} = \phi_h\left(\frac{z}{L}\right)$$

528

529 通过函数变换、积分,可得,

530 
$$u_a = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right]$$

(A.4)

$$\theta_a - \theta_g = \frac{\theta_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_h\left(\frac{z}{L}\right) \right]$$

(A.5)

531

(A.4)和(A.5)为积分后得到近地层变量廓线方程,即风和位温随高度 z 的变化的廓线方程, 532 *k* 是 von Karman 常数 , *L*是 Obukhov 长度,其可计算参考(A.6)式,与总体理查森数的关系如(A.7)式。 533



其中, $x = \left[1 - 16(z/L)\right]^{1/4}$ ,  $\psi_m$ ,  $\psi_h$  是动量和热量积分相似函数,  $z_0$ 为粗糙度长度。 546

547 7 附录 B

548	针对稳定、超稳定类相似函数计算难题初步改进试验。初步改进试验如下:	
549	由 xu_71_b20 试验中计算:	Yal
550	$au_{b20} = \psi_h \left(\frac{2}{L}\right) / \ln \left(\frac{2}{z_0}\right)$	(B.13)
551	$ad_{b20} = \psi_h \left(\frac{z}{L}\right) / \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$	(B.14)
552	重构 xu_71_b50 试验的相似函数 (仅对超出截断的稳定、超稳定类):	
553	$\psi_h\left(\frac{2}{L}\right) = au_{b20}\ln\left(\frac{2}{z_0}\right)$	(B.15)
554	$\psi_h\left(\frac{z}{L}\right) = ad_{b20}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$	(B.16)
555	初步试验 2m 温度预报误差误差减小了约 5%。	2
556		
	ケーズ	
		3



\*