

# CMA-MESO 3 km 模式中自适应时间步长方案试验

邓莲堂 朱立娟 张进 于翡

(中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081)

**摘要** 时间步长是数值天气模式稳定运行的关键参数。为实现业务模式稳定运行并保证运行效率, 根据 CMA-MESO 3 km 模式时间积分方案特点, 设计了自适应时间步长方案。以模式最大库朗数为依据, 提出瞄准法和削顶法两种方法。根据 CMA-MESO 模式动力框架特点, 研发了相应时间控制技术并在 CMA-MESO 3 km 系统中程序实现了自适应时间步长方案。个例和批量试验结果显示, 采用瞄准法, 模式中最大库朗数会在目标值附近变化, 使模式更加稳定。采用削顶法, 会调整模式中最大库朗数超出目标值的部分, 保证模式稳定积分的同时, 又尽量少地干预模式。总之, 两种方法的自适应时间步长方案能够有效避免模式积分溢出情况, 显著地提高模式的稳定性。对于 3 km 分辨率的模式来说, 当库朗数目标值取 1.2 左右时, 削顶法比瞄准法更适合业务运行。目前, 自适应时间步长方案已投入业务应用。

**关键词** CMA-MESO; 自适应时间步长; 瞄准法; 削顶法

**中图分类号:** P456.7 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20230434 **文献标识码:** A

## 引言

对一个给定的有限差分格式数值天气预报模式, 当模式的空間范围和空間分辨率确定后, 为满足稳定性条件唯一可改变的参数就是时间步长<sup>[1]</sup>。时间步长缩短, 可以提升模式积分运行稳定性, 但会引起整体运行时间增长, 运行效率降低的问题。因此在数值模式实际的科研和业务应用中, 需要在数值模式积分稳定性和运行效率之间寻找一个平衡。传统做法为固定时间步长, 若时间步长给得过长, 模式计算精度降低, 计算误差增大, 预报精度降低、同时也容易不稳定, 造成积分运行中断; 若时间步长过短, 模式计算精度虽然提高了, 但是计算的时间消耗增大, 造成计算资源浪费, 时效也难以满足需求<sup>[2]</sup>。

自适应时间步长方法是在模式运行过程中, 根据模式中的稳定性情况, 动态调整模式的积分步长, 从而既保持了模式的计算稳定性, 又提高模式的运行效率。Osher 和 Sanders 提出了最早的局部时间步长选取方法之一<sup>[3]</sup>。Dawson 和 Kirby 将该方法

扩展到高阶时间步进方案<sup>[4]</sup>。Berger 和 Olinger 引入了一个保守的界面方程, 以在需要更精确解的区域覆盖的粗略网格和精细网格之间传递信息<sup>[5]</sup>。他们的方法在这些精细区域自动采取较小的时间步长, 并独立集成网格, 从而实现更高阶的时间集成。Zhang 等人仅将局部时间步长应用于通量计算<sup>[6]</sup>。Dawson 介绍了一种局部时间步长方法, 该方法在单元界面上增强通量连续性<sup>[7]</sup>。Kwatra 等提出一种基于压力演化方程的时间步长选取方法<sup>[8]</sup>, Hornell 第提出一种基于局部误差估计的自适应时间步长选取公式<sup>[9]</sup>。王家开等引入 CFL 稳定性限制条件, 实现自适应时间步长方案在圆柱周围流场的数值模拟中应用<sup>[10]</sup>。Hutchinson 在 ARW-WRF 模式中应用了自适应时间步长方法<sup>[11]</sup>, 可以有效地提高模式的运行效率, 增加模式的运行稳定性。

GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 是中国气象局自主开发建立的多尺度资料同化与数值预报业务系统, 其中 MESO 版本是 GRAPES 的区域模式版本<sup>[12]</sup>。经过十几年

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划(2022YFC3004102)、河南省重大科技专项(201400210800)共同资助

作者简介: 邓莲堂, 男, 1974 年生, 博士, 主要从事中尺度数值预报研究, Email: denglt@cma.gov.cn

收稿日期: 2023 年 12 月 15 日; 定稿日期: 2024 年 11 月 19 日

©(气象科技)编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

的发展,在动力框架、物理过程以及资料同化等方面达到国内领先、国际先进水平,实现数值模式关键技术的自主可控<sup>[13-31]</sup>。GRAPES MESO 模式按照中国气象局统一命名规范,将 GRAPES 模式的 MESO 版本命名为 CMA-MESO 模式。

CMA-MESO 作为中国气象局业务模式,稳定性和高效计算都是业务模式的根本需求。传统固定时间步长难以满足实际业务需要。该模式为非静力平衡经纬度格点模式,采用了半隐式半拉格朗日时间积分方案。胡志晋讨论了半拉格朗日半隐式大气模式中时间步长的限制问题,指出库朗数是大气模式时空步长匹配的重要参数<sup>[32]</sup>。本文根据 CMA-MESO 模式的特点,以库朗数为依据,提出了一整套适用于半隐式-半拉格朗日模式的时间步长自动计算调整方法。该方法能够使 CMA-MESO 模式在保证模式稳定运行的同时,又能够使用较大的积分时间步长,提高模式的运行效率。

## 1 CMA-MESO 中自适应时间步长方案设计与实现

### 1.1 自适应时间步长方案设计

在实际大气中,任意一质点在一个时间步长中移动格距  $a$  可以表示为:

$$a = \frac{u\Delta t}{\Delta X} \quad (1)$$

其中,  $\Delta X$ ,  $\Delta t$  为空间和时间步长,  $u$  为一个时间步长中质点的平均移速。在欧拉格式中此值必须小于 1, 否则上游点就会超过其内插的范围而造成很大误差。因此,库朗数  $N_c$  表示为:

$$N_c = \frac{|u| \Delta t}{\Delta X} \leq 1 \quad (2)$$

式中,  $|u|$  表示  $u$  的绝对值。这是欧拉方案的一条稳定性指标,相应的时步限制为:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta X}{u} \quad (3)$$

在拉格朗日格式中,时间步长可以不受 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件的限制。在 CMA-MESO 模式采用二时间层半隐式半拉格朗日时间积分方案,其中半隐式方案同时使用了显式时间差分格式和隐式时间差分格式。针对线性项使用的隐式格式在时间积分上是无条件稳定的,可以使用较大的时间积分步长。但是针对非线性项的显式差分格式是条件稳定的,可能会出现不稳定的情况。因此, CMA-MESO 模式的时间步长还是会受到库朗

条件约束,库朗数不能太大。本文提出的自适应时间步长方案是通过一定算法,调整模式的时间步长,从而使模式中库朗数保持一定的合理范围,保持模式的稳定运行。根据调整方式的不同,设计了瞄准法和削顶法两种调整方法。

#### 1.1.1 瞄准法

瞄准法就是使模式的库朗数在整个积分过程中接近一个给定的目标值。当最大库朗数大于这个目标值时,则将模式的时间积分步长做相应减小,使得模式的库朗数减小到目标值;当最大库朗数小于这个目标值时,则将模式时间积分步长做相应增加,使得模式最大库朗数增大到目标值。具体时间步长计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{当 } N_c > N_{\text{target}} \text{ 时, } \Delta T &= \Delta t \left( \frac{N_{\text{target}} - 0.5(N_c - N_{\text{target}})}{N_c} \right) \\ \text{当 } N_c \leq N_{\text{target}} \text{ 时, } \Delta T &= \Delta t \left( \frac{N_{\text{target}}}{N_c} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\Delta t$  是调整前的时间步长,  $\Delta T$  是调整后的时间步长,  $N_c$  是当前最大库朗数,  $N_{\text{target}}$  是目标库朗数,在 CMA-MESO 3 km 模式中通常可以取 1.2 ~ 1.4。

#### 1.1.2 削顶法

削顶法是使模式最大库朗数在整个积分过程中不超过一个给定的目标值。当最大库朗数大于这个目标值时,则将模式时间积分步长做相应减小,使得模式最大库朗数减小到目标值;当最大库朗数小于这个目标值时,如果模式时间步长在前面做过调整,则将模式时间积分步长恢复到初始时间步长,否则模式时间步长保持不变。具体时间步长计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{当 } N_c > N_{\text{target}} \text{ 时, } \Delta T &= \Delta t \left( \frac{N_{\text{target}} - 0.5(N_c - N_{\text{target}})}{N_c} \right) \\ \text{当 } N_c \leq N_{\text{target}}, \Delta t < \Delta t_{\text{org}} \text{ 时, } \Delta T &= \Delta t \left( \frac{N_{\text{target}}}{N_c} \right) \end{aligned}$$

$$\text{当 } N_c \leq N_{\text{target}}, \Delta t = \Delta t_{\text{org}} \text{ 时, } \Delta T = \Delta t \quad (5)$$

其中,  $\Delta t_{\text{org}}$  是模式的初始时间步长,  $\Delta t$  是调整前的时间步长,  $\Delta T$  是调整后的时间步长,  $N_c$  是当前最大库朗数,  $N_{\text{target}}$  是目标库朗数,在 CMA-MESO 3 km 模式中通常可以取 0.8 ~ 1.2。

### 1.2 方案在 CMA-MESO 中程序实现

文中设计的自适应时间步长方案实现时,有两个关键技术。一是最大库朗数计算,二是时间步长调整。最大库朗数计算是根据模式中的风速、空间

分辨率和当前的时间步长,计算出模式中全场最大库朗数;而时间步长调整,则是基于模式最大库朗数和目标值,根据不同的调整方式,对模式的时间步长进行相应的调整。

由于模式的时间步长不固定,对于一个给定的预报时长来说,模式的总积分步数也会发生变化,因此原来采用积分时间步数来控制时间的方式不再适用,需要采用新的时间控制和处理技术。

### 1.2.1 对积分过程的时间控制

在固定时间步长时,在预报时效固定的积分过程可采用时间步数来控制,只要根据预报时效的总时间长度计算出相应的积分步数,就可以实现积分过程的准确控制。

采用自适应时间步长方案后,由于积分时间步长的变化,从而导致模式的积分总步数发生变化。因此,原来模式中采用的时间总步数来控制积分过程的方法不再适用。模式积分过程可以采用相对时间来控制,即用模式当前积分时间与积分总时长相比,当前积分时间大于积分总时长时,模式积分过程终止。比如模式要积分 48 h,首先将计时单位从小时转换成秒,即总共 172800 s,当前积分时间从 0 s 开始,每积分一步,增加一个时间步长,直到积分时间大于总时间 172800 s 时,整个积分过程完成。

### 1.2.2 输入/输出的时间处理

同理,在固定时间步长时,在某一特定时间点的输入/输出可采用时间步数来控制,只要根据输入/输出点的时间计算出相应的积分步数,就可以实现输入/输出的准确控制。然而,在采用自适应时间步长方案后,虽然输入/输出的时间点是固定的,但由于积分步长变化引起的积分步数变化,用积分步数来控制输入/输出的方法也不再适用。本方案中采用半时间步长靠近法,即输入/输出的时间点对应的时间与当前积分时间相比,两个时间之间的差异( $\Delta t_{\text{diff}}$ )不大于当前时间步长的一半( $\Delta t_n/2$ ),则认为两个时间一致,可以进行输入/输出操作。如图 1 所示,实心圆点表示当前时步,空心圆点表示输入/输出时间点, $\Delta t$  表示时间步长,下标  $n$  表示当前时步, $n-1$  表示前一时步, $n+1$  表示后一时步, $\Delta t_{\text{diff}}$  表示两个时间之间的差异。只要实心圆点落在空心圆点前后半时间步长的灰色范围内,即  $\Delta t_{\text{diff}} \leq \Delta t_n/2$ ,则可认为两个时间一致,可以进行输入/输出操作。为了避免在半时间步长点的重复操作,本方案采用

左包含,右开放的方法( $-\Delta t_n/2 \leq \Delta t < \Delta t_n/2$ ),即当前时步与输入输出时间点差半时间步长时( $\Delta t_{\text{diff}} = -\Delta t_n/2$ )进行操作,超过半时间步长时( $\Delta t_{\text{diff}} = \Delta t_n/2$ )则不操作。

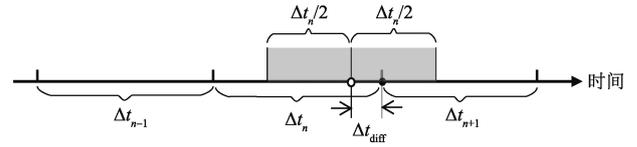


图 1 输入输出半时间步长控制方法示意

(当前时步为  $n$ , 前一时步为  $n-1$ , 后一时步为  $n+1$ ,  $\Delta t_{\text{diff}}$  为输入/输出时间与当前积分时间之间的差异, 黑色实心圆点表示当前时步, 黑色空心圆点表示输入输出时间点, 灰色区域表示输入/输出时间点前后半个时间步长)

Fig. 1 Schematic diagram of the input/output half time step control method

(The current time step is  $n$ , the previous time step is  $n-1$ , and the next time step is  $n+1$ .  $\Delta t_{\text{diff}}$  represents the difference between the input/output time and the current integration time. The black solid dots indicate the current time step, the black hollow dots denote the input/output time points, and the gray areas represent the half time step before and after the input/output time point)

### 1.2.3 时间外插的处理

在两时间层的半隐式-半拉格朗日时间差分方案中,拉格朗日轨迹中间点的速度和非线性项都需要用时间线性外插法做近似处理,即用当前时刻( $n$ )和前一时刻( $n-1$ )时刻的格点值做线性外推。在当前时刻时间步长  $t_n$  和上一时步时间步长  $\Delta t_{n-1}$  不相等时,模式中的线性外插权重系数就需要重新计算。为了避免对模式代码做过大改动,本方案采用一种重构上一时刻值( $V_{n-1}$ )的方法(图 2),使得重构的新值对应时间步长与当前时间步长相同。经过这样处理后,进行时间外插算法时模式的时间步长仍然保持不变,不用做任何修改。

## 2 数值试验设计

数值试验选用 CMA-MESO 的 4.4 版本,模式水平分辨率  $0.03^\circ \times 0.03^\circ$  (约 3 km),水平范围为  $70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$ ,  $10^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ ,模式垂直层次为 50 层,模式包含的物理过程为:WSM6 微物理方案、NOAH 陆面过程方案、MYJ 边界层方案、RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案。

分别开展了个例试验和批量试验。两类试验都包含了控制试验和敏感性试验。控制试验与敏感性

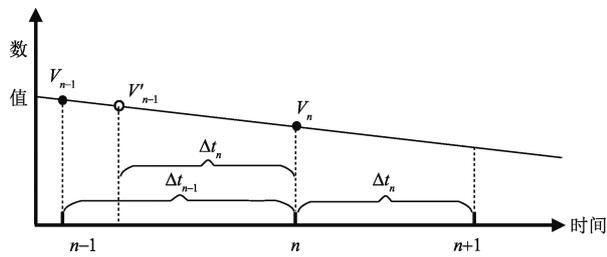


图 2 重构前一时次数值方法示意

(当前时步为  $n$ , 前一时步为  $n-1$ , 后一时步为  $n+1$ ,  $\Delta t_n$  为当前时步的时间步长,  $V_n$  表示当前时步值。黑色实心圆点表示模式格点值, 黑色空心圆点表示前一时时刻重构值)

Fig. 2 Schematic diagram of the numerical method for reconstructing the previous time step

(The current time step is  $n$ , the previous time step is  $n-1$ , and the next time step is  $n+1$ .  $\Delta t$  represents the time step length of the current time step,  $V_n$  is the value at the current time step. Black solid dots represent the pattern grid values, while black hollow dots represent the reconstructed values from the previous time step)

试验的差别就是时间步长设置上不一样, 即控制试验使用固定时间步长, 而敏感性试验采用自适应变化的时间步长。其中, 敏感性试验是采用不同的控制方法和参数来控制时间步长的变化。

个例试验目的是选择一个个例, 通过较为深入的分析, 具体考察和分析方案对模式稳定性和运行效率的影响。试验个例时间为 2019 年 4 月 10 日 00:00 (世界时, 下同), 预报时效为 48 h。针对自适应时间步长方案中的两种调整方法, 分别设计了两组试验。第一组试验是针对瞄准法的试验, 包括不使用自动时间步长方案的一个控制试验, 和取不同库朗数目标值的自适应时间步长方案的 9 个试验, 总共 10 个试验。其中, 瞄准法试验的库朗数目标值分别取 0.4~1.2。另一组试验是对应于削顶法, 库朗数目标值分别取 0.8~1.2, 共 5 个试验。

批量试验目的是通过连续 1 个月的大量试验, 进一步考察研发方案对模式预报性能是否产生统计意义上的影响。试验时间为 2019 年 4 月 1 日 00:00 至 4 月 30 日 00:00, 预报时效为 48 h。同样设计了两组试验, 第一组试验是针对瞄准法的试验, 包括 1 个控制试验, 3 个敏感性试验, 库朗数目标值分别取 0.8, 1.0 和 1.2, 总共 4 个试验。另一组试验是对应

于削顶法, 库朗数目标值分别取 0.8, 1.0 和 1.2, 共 3 个试验。

试验使用的驱动场为美国 NCEP-GFS 的 0~48 h 预报场资料, 水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 垂直从 1000~10 hPa 的 26 层等压面。模式结果检验使用中国加密站逐小时观测资料, 包括降水和温度。NCEP 的水平分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$  的分析资料用来检验分析模式的高度场。

### 3 结果分析

#### 3.1 瞄准法个例试验

在半隐式半拉格朗日格式模式中, 虽然不像欧拉格式模式一样, 要求最大库朗数必须小于 1 模式才稳定积分。在实际的业务运行中, 模式中最大库朗数可以大于 2, 模式仍可能稳定运行。不过, 如果最大库朗数再继续增大, 模式则可能积分不稳定。图 3 中给出了第一组试验的模式中最大库朗数随积分步数的变化。在不调用自适应时间步长方案的控制试验中, 最大库朗数最大值可以达到 2.17。而采用自适应时间步长方案时, 最大库朗数的最大值则会在目标值附近变化。因此, 采用自适应时间步长方案能使模式更加稳定。

表 1 给出了瞄准法试验的总时间和总积分步数信息。从表中可以看出, 随着库朗数目标值由大变小, 模式变得越来越稳定, 但模式积分总步数越来越多, 模式的积分总时间也越来越大。但由于模式积分更稳定, 模式在积分求解时, 相应的迭代次数会减小, 所以积分的总时间的增幅要比积分总步数要小。比如库朗数目标值取 0.4 时, 总积分步数增长 190%, 而总积分时间只增加了 135%。

表 2 给出了瞄准法试验的库朗数目标值敏感试验与控制试验之间关键要素 2 m 温度、500 hPa 风场和 500 hPa 高度场 48 h 预报后的偏差和标准差。平均偏差的负值表示敏感性试验值大于控制试验值。从表中可以看出, 2 m 温度、500 hPa 风场和 500 hPa 高度场基本上是无偏的, 标准差也很小。表 2 中灰色表格单元表示数值最接近 0, 从中可以看出, 当库朗数目标值取在 1.1 附近时, 自适应时间步长方案对模式的预报结果影响最小。

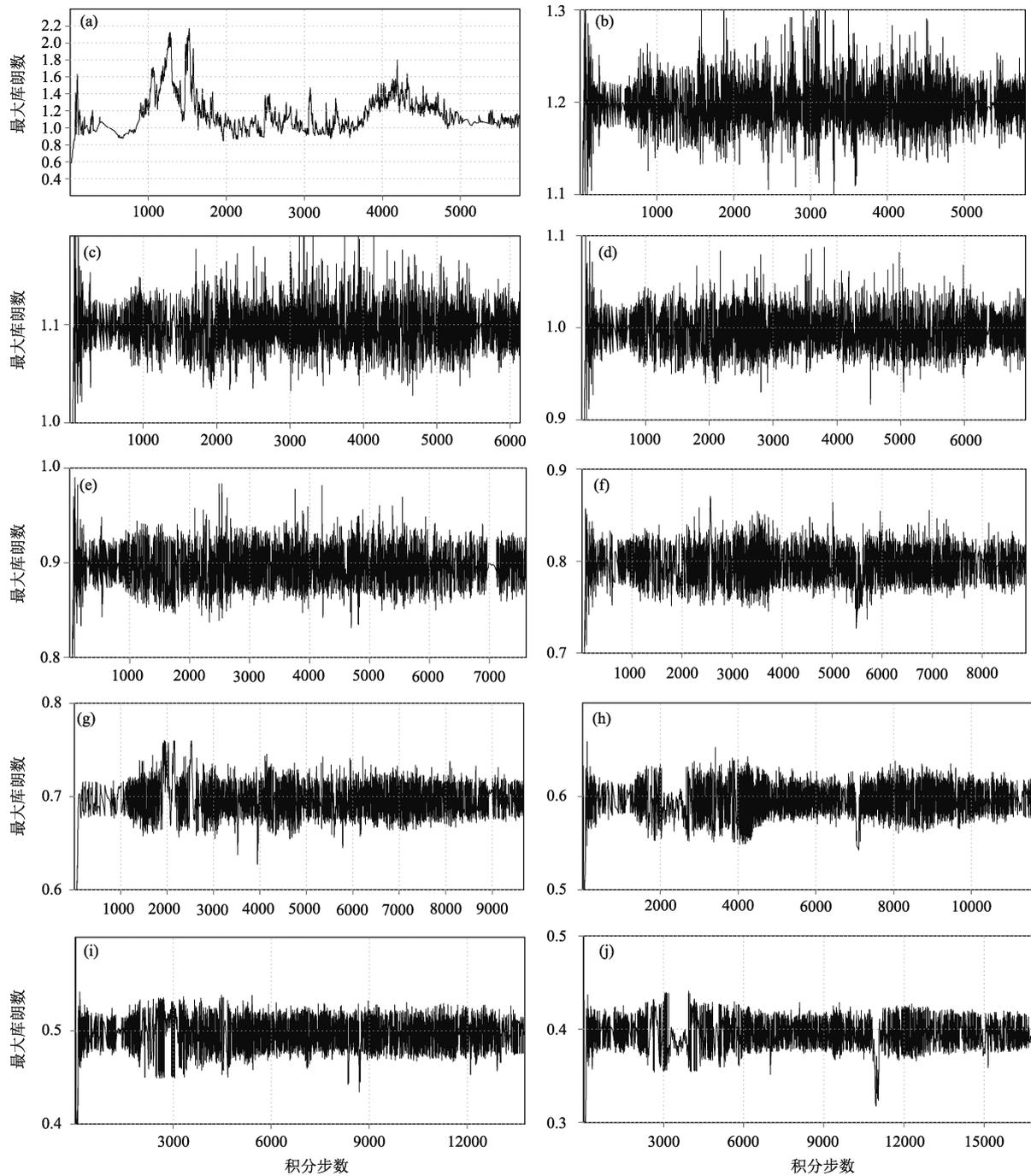


图 3 控制试验(a)和瞄准法试验中库朗数目标值取 1.2(b), 1.1(c), 1.0(d), 0.9(e), 0.8(f), 0.7(g), 0.6(h), 0.5(i), 0.4(j)时模式中最大库朗数随积分步数的变化

Fig. 3 The variation of the maximum Courant number with the number of integration steps in control experiment (a) and the target aiming method experiment while the Courant number target value is set to be 1.2 (b), 1.1 (c), 1.0 (d), 0.9 (e), 0.8 (f), 0.7 (g), 0.6 (h), 0.5 (i) and 0.4 (j)

表 1 瞄准法试验总运行时间

Table 1 Total elapsed time of target aiming method experiment

	CNTL	CFL04	CFL05	CFL06	CFL07	CFL08	CFL09	CFL10	CFL11	CFL12
总时间/s	7154	16824	14079	12364	10641	9640	8952	8149	7493	7253
时间增长率/%		135	97	73	49	35	25	14	5	1.4
总步数	5760	16701	13557	11536	10015	8587	7708	6996	6265	5737
步数增长率/%		190	135	100	74	49	34	21	9	-0.4

注: CNTL 表示控制试验, CFL<sub>xx</sub> 表示敏感性试验, xx 表示最大库朗数的目标值, 取值与图 3 相同, 下同。

表 2 控制试验与瞄准法试验要素场 48 h 预报值之间的平均偏差 (mean) 和标准差 (std)

Table 2 The mean deviation and standard deviation between the 48-hour forecast values of the control experiment and target aiming experimental element field

	t2m/°C		U500/(m/s)		V500/(m/s)		h500/gpm	
	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
CFL04	-0.022	0.408	-0.008	0.993	0.031	0.892	-0.009	1.596
CFL05	-0.017	0.385	-0.003	0.936	0.034	0.849	0.058	1.442
CFL06	-0.014	0.364	-0.008	0.892	0.026	0.815	0.074	1.277
CFL07	-0.012	0.352	-0.004	0.843	0.02	0.787	0.062	1.145
CFL08	-0.003	0.335	0.006	0.814	0.015	0.775	0.076	1.028
CFL09	-0.008	0.322	0.012	0.789	0.012	0.738	0.069	0.912
CFL10	-0.004	0.320	0.01	0.765	<b>0.003</b>	0.707	0.067	0.822
CFL11	<b>0.001</b>	<b>0.303</b>	0.01	<b>0.746</b>	0.005	<b>0.698</b>	<b>0.062</b>	<b>0.778</b>
CFL12	-0.001	0.306	-0.001	0.746	0.003	0.706	0.138	0.801

注: 加粗表示数值最接近 0, t2m 表示 2 m 温度, U500 表示 500 hPa 风场东西分量, V500 表示 500 hPa 风场南北分量, h500 表示 500 hPa 高度场, 下同。

### 3.2 削顶法个例试验

在削顶法试验中(图 4), 最大库朗数的变化与瞄准法不同之处在于, 当模式中最大库朗数大于给定的目标值时, 削顶法会对模式进行调整, 使其在目标值附近变化; 而当最大库朗数小于给定的目标值时, 如果当前时间步长经过调整, 则首先会使模式时间步长恢复到初始时间步长, 否则模式不会对时间步长进行调整。因此模式中的最大库朗数可能会比目标值小很多, 远离目标值。因此, 削顶法的好处在于该方法只调整超出目标值的部分, 保证模式稳定积分的同时, 又尽量少地干预模式。不过, 当给定的目标值越来越小时, 由于目标值接近模式中最大值库朗数在积分过程中可能出现的最小值, 削顶法就越来越接近瞄准法了。比如在试验个例中, 当最大库朗数目标值取 0.9(包括 0.9)以下时, 削顶法就与瞄准法相当了。

由于削顶法只是将时间步长调小, 不会比原始

的步长大, 所以削顶法的总时间步数和总时间是增加的。即使库朗数目标值增加的 1.2 h, 总步数也还是增加了 6.3%, 总时间增加了 3.67%(表 3)。

从预报效果来看(表 4), 控制试验与削顶法试验要素场 48 h 预报值之间的平均偏差和标准差。平均偏差的负值表示自动时间步长方案试验值大于控制试验值。

削顶法在库朗数目标值为 0.8 时, 预报误差与瞄准法相同, 表明两者的预报效果相当。当库朗数目标值越来越大时, 削顶法对模式的调整也越来越少, 对模式预报效果的影响也越来越小。

### 3.3 批量试验结果分析

以上个例试验结果表明, 自适应时间步长方案可以明显地增加模式积分稳定性, 使模式稳定运行。与此同时, 研发方案对模式预报量的 48 h 预报值影响较小。为了进一步考察研发方案对模式预报性能是否产生统计意义上的影响, 进行了 2019 年 4 月

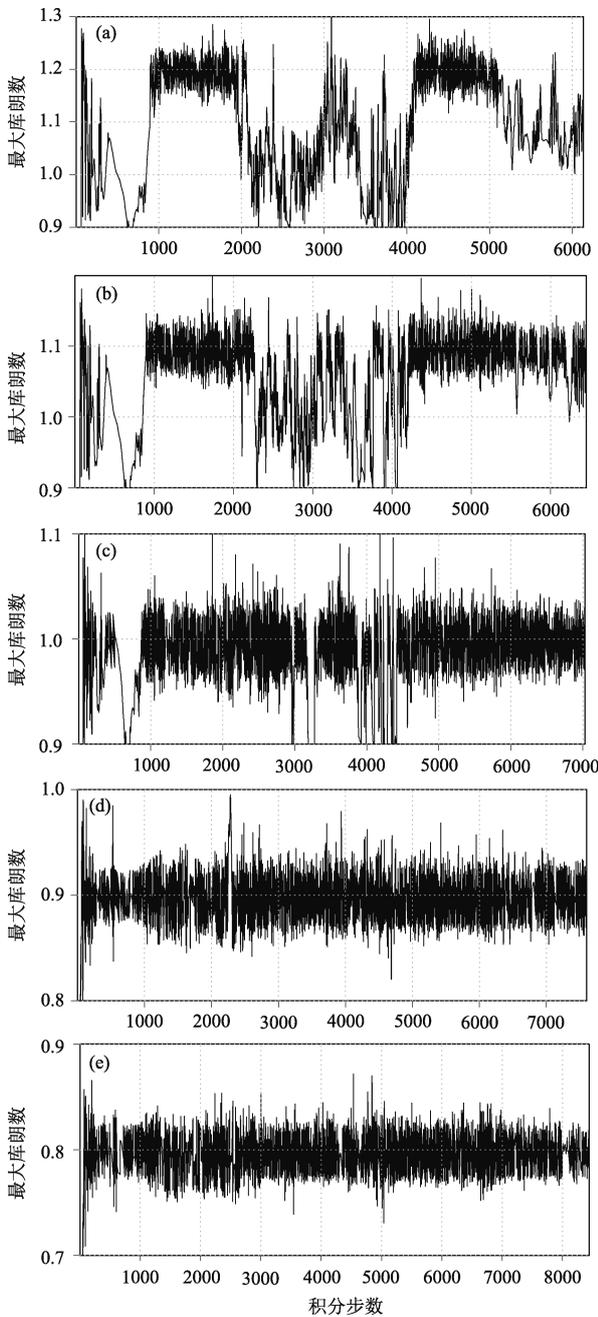


图 4 削顶法试验中库朗数目标值取 1.2(a), 1.1(b), 1.0(c), 0.9(d), 0.8(e) 时模式中库朗数最大值随积分步数变化

Fig. 4 Variation of the maximum Courant number with the number of integration steps in the target aiming method experiment while the Courant number target value is set to be 1.2 (a), 1.1 (b), 1.0 (c), 0.9 (d), 0.8 (e)

1—30 日 1 个月的连续批量试验。

从批量试验运行情况来看,其中控制试验在 4 月 3—5 日出现运行不稳定的情况,分别在模式积分

3390 步、731 步和 1290 步时出现异常中断。但两组敏感性试验中,都对模式的积分时间步长进行了控制调整,当模式的库朗数增大,趋向于不稳定状态时,模式会自动缩短积分时间步长,提高模式的计算精度,从而提高了模式的稳定性,使模式能够稳定运行。因此,在整个批量试验期间,采用自适应时间步长方案后,不管采用瞄准法还是削顶法,模式没有出现运行不稳定的情况。由此可见,自适应时间步长方案能提高模式的运行稳定性。为了便于比较,剔除由于控制试验异常中断造成数据缺失的 3 天数据,对剩余的 27 天数据进行了统计分析。

批量试验统计结果表明,自适应时间步长方案中两种调整方法对 24 h 累积降水各个量级的影响很小(图略),敏感性试验与控制试验之间的 ETS 评分差异没有超过 95% 的置信水平的置信区间,说明没有造成统计意义上明显的差异。对于 48 h 累积降水的影响比 24 h 稍大,但除大暴雨(100 mm 以上)外,敏感性试验与控制试验之间 ETS 评分差异的绝对值仍然很小(图 5)。其中,当敏感性试验库朗数目标值取 1.0 和 1.2 时,与控制试验之间 ETS 评分的差异不显著;只有当库朗数目标值取 0.8 时,小雨量级(1~10 mm)降水 ETS 评分略微有 1% 左右的降低。

利用中国加密站逐小时温度观测资料,对两组批量试验模拟结果进行了误差统计检验。检验结果表明(图略),两组敏感性试验中自适应时间步长方案对 2 m 温度的影响较小,敏感性试验与控制试验之间均方根误差值的差异,都没有超过 95% 的置信水平的置信区间,表明敏感性试验与控制试验之间没有统计意义上的显著差异。

从位势高度场的误差统计检验结果来看(图 6),两组敏感性试验中自适应时间步长方案对位势高度场的影响也较小,24 h 预报场的误差差异值在  $\pm 0.12$  gpm 范围内(图 6a,c),48 h 预报场的误差差异值在  $\pm 0.2$  gpm 范围内(图 4b,d)。其中,当库朗数目标值取 0.8 时,由于相对控制试验而言时间步长减小,提高了模式计算精度,从而造成模式中底层位势高度场误差略微减小约 1% 左右。当库朗数目标值取 1.2 时,相对控制试验而言,时间步长变化不大,所以敏感性试验模拟位势高度场误差与控制试验的误差没有显著的差异。当库朗数目标值取 1.0 时,对模式时间步长调整幅度介于目标是取 0.8

表 3 削顶法试验总运行时间

Table 3 Total elapsed time of top trimming method experiment

	CNTL	TOP08	TOP09	TOP10	TOP11	TOP12
总时间/s	7154.83	9696.78	8732.69	8084.53	7579.54	7417.49
时间增长率/%		36.00	22.00	13.00	6.00	3.67
总步数	5760	8587	7656	7081	6438	6123
步数增长率/%		49.0	33.0	23.0	12.0	6.3

注:CNTL 表示控制试验, TOPxx 表示敏感性试验, xx 表示最大库朗数的目标, 取值与图 4 相同。

表 4 控制试验与削顶法试验要素场 48 h 预报值之间平均偏差 (mean) 和标准差 (std)

Table 4 The mean deviation and standard deviation between the 48-hour forecast values of the control experiment and each top trimming experimental element field

	t2/°C		U500/(m/s)		V500/(m/s)		h500/gpm	
	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
CFL08	-0.003	0.335	0.006	0.814	0.015	0.775	0.076	1.028
CFL09	-0.005	0.326	0.006	0.794	0.005	0.731	0.142	0.938
CFL10	-0.006	0.317	0.016	0.809	0.007	0.730	0.059	0.855
CFL11	-0.001	0.303	0.005	0.763	-0.004	0.695	0.11	0.776
CFL12	-0.004	0.293	0.006	0.728	0.001	0.689	0.017	0.773

注: 平均偏差的负值表示自动时间步长方案试验值大于控制试验值。

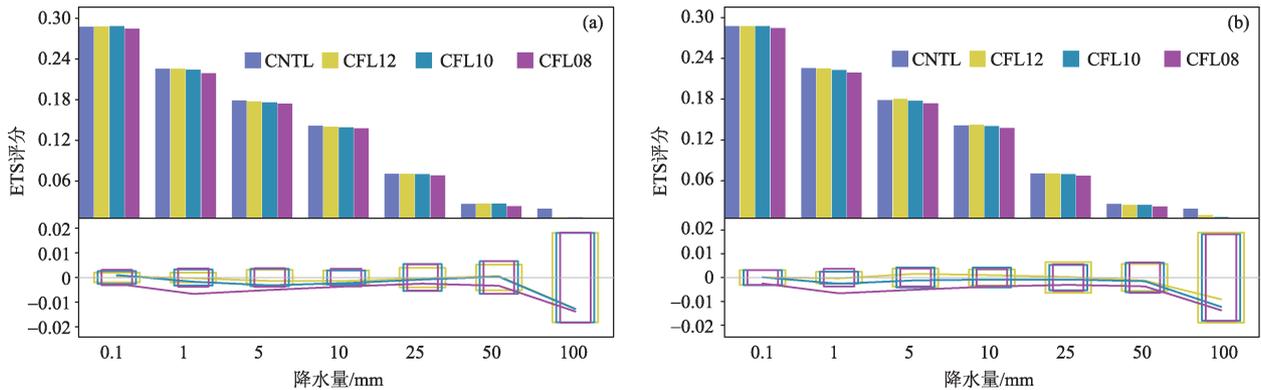


图 5 2019 年 4 月 1—30 日 48 h 累积降水 ETS 评分:(a)削顶法,(b)瞄准法

Fig. 5 ETS score test for 48-hour cumulative precipitation in the batch test of adaptive time step scheme from 1 to 30 April 2019: (a) Top trimming method, (b) Target aiming method

和 1.2 之间, 因此敏感性试验对模拟位势高度场误差的影响程度也介于两者之间。

从批量试验统计检验结果中可以看出, 自适应时间步长方案对模式模拟结果的影响主要原因是因为方案对时间步长的调整, 造成模式计算精度变化, 进而影响模式的预报效果。总体而言, 自适应时间步长方案对模式模拟结果的影响比较小。其中, 当

采用削顶法中库朗数目标值取 1.2 时, 模式仅仅在积分过程中出现最大库朗数大于 1.2 的情况下缩短时间步长, 其他大部分积分时段都是保持原来的时间步长, 因此该方案保证模式的积分稳定的情况下, 没有造成统计意义上的显著差异, 对模式的预报性能几乎没有影响。

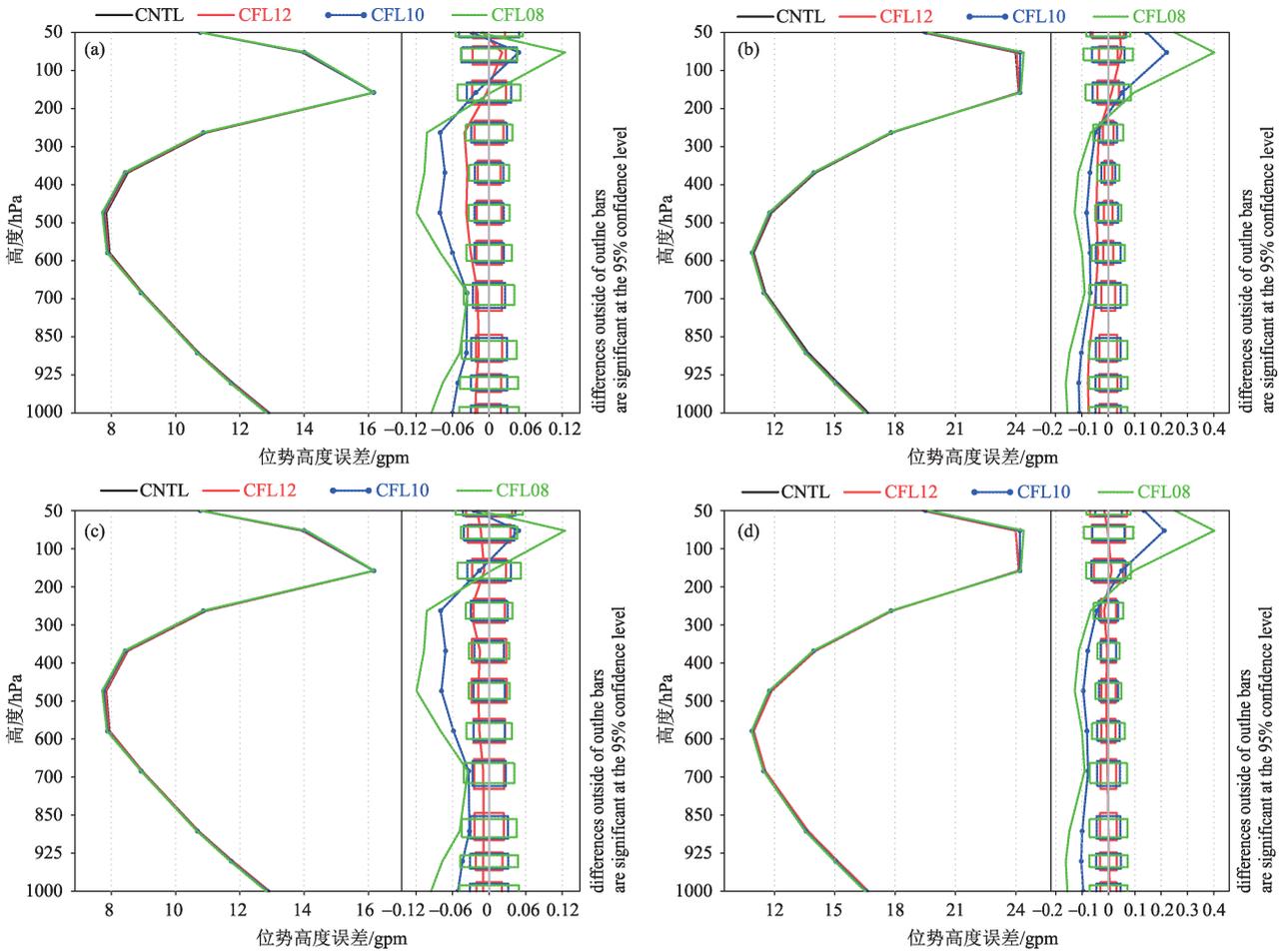


图 6 2019 年 4 月 1—30 日位势高度场误差:(a)削顶法 24 h 预报,(b)削顶法 48 h 预报,  
(c)瞄准法 24 h 预报,(d)瞄准法 48 h 预报

Fig. 6. The results of the TS score test for 48-hour cumulative precipitation in the batch test of the automatic time step adjustment scheme from 1 to 3 April 2019:(a) 24-hour forecast top trimming method,  
(b) 48-hour forecast top trimming method, (c) 24-hour forecast target aiming method,  
(d) 48-hour forecast target aiming method

#### 4 结论

本文根据 CMA-MESO 3 km 模式的时间积分方案特点,以模式中最大库朗数为依据,提出了瞄准法和削顶法两种不同的时间步长自适应调整方案,并研发了相应时间控制技术,通过个例和批量试验验证了效果,得到以下结论。

(1) 采用瞄准法时,模式中库朗数的最大值则会在目标值附近变化,模式更加稳定。随着库朗数目标值由大变小时,模式越来越稳定,但模式积分总步数越来越多,模式的积分总时间也越来越大。但由于模式积分更稳定,模式在积分求解时,相应的迭

代次数会减小,所以积分总时间的增幅要比积分总步数的增幅小。

(2) 采用削顶法时,仅当模式中最大库朗数大于目标值时,才会对模式进行减小时间步长的调整,使最大库朗数在目标值附近变化。当库朗数小于这个目标值时,如果模式的时间步长在前面做过调整,则将模式的时间积分步长逐渐恢复到初始时间步长,否则模式的时间步长保持不变。因此,削顶法的优点在于该方法只调整超出目标值的部分,保证模式稳定积分的同时,又尽量少地干预模式。当给定的目标值越大,削顶法对模式的时间步长的调整就越少。当给定的目标值越来越小时,削顶法就越来越

接近瞄准法。

(3) 自适应时间步长方案可以有效避免模式积分溢出的情况, 显著提升模式积分稳定性, 更适合业务运行环境。自适应时间步长方案对模式降水和高度场的模拟结果影响比较小。方案在保证 CMA-MESO 模式稳定运行的同时, 又可实现较大的积分时间步长, 提高了模式的运行效率。对于 3 km 分辨率的模式, 当库朗数目标值取 1.2 左右时, 削顶法比瞄准法更适合业务运行, 该方案保证模式积分稳定的情况下, 对模式预报性能几乎没有影响。对于 1 km 分辨率模式, 该方案同样也适用, 水平分辨率提高后, 水平方向的库朗数相应增大 3 倍, 其在方案中的作用也会大幅度增大, 甚至起到主导作用。

(4) 在其他实际业务中应用时, 由于模式运行区域的地理位置和区域范围不同, 模式的预报特征表现也会不同, 需要进行相应的试验, 确定出合适的库朗数目标值。

## 参考文献

- [1] 唐维军, 袁光伟, 沈智军, 等. Lagrange 方法基于保正性的时间步长[J]. 计算物理, 2012, 29(5): 633-640. Tang W J, Yuan G W, Shen Z J, et al. Positivity preserving time step for lagrange method [J]. Chinese Journal of Computational Physics (in Chinese), 2012, 29(5): 633-640.
- [2] 彭新东, 李婷婷, 常飞, 等. 重力波特征线显式数值解法试验[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1386-1396. Peng X D, Li T T, Chang F, et al. Numerical test of characteristic method for explicit gravity wave computing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2010, 29(6): 1386-1396.
- [3] Osher S, Sanders R. Numerical approximations to nonlinear conservation laws with locally varying time and space grids [J]. Math. Comp, 1983, 41(164): 321-336.
- [4] Dawson C, Kirby R. High resolution schemes for conservation laws with locally varying time steps [J]. Siam J Sci Comput, 2000, 22(6): 2256-2281.
- [5] Berger M J, Olinger J. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations [J]. J Comput Phys, 1984, 53(3): 484-512.
- [6] Zhang X D, Trepanier J Y, Reggio M, et al. Time-accurate local time stepping method based on flux updating [J]. AIAA J, 1994, 32(9): 1926-1929.
- [7] Dawson C. High resolution upwind-mixed finite element methods for advection-diffusion equations with variable time-stepping [J]. Numer Methods Partial Differential Equations, 1995, 11(5): 525-538.
- [8] Kwatra N, Su J, Gretarsson J T, et al. A method for avoiding the acoustic time step restriction in compressible flow [J]. J Comp Phys, 2009, 228: 4146-4161.
- [9] Hornell K, Lotstedt P. Time step selection for shock problems [J]. Commun. Numer Meth Engng, 2001, 17: 477-484.
- [10] 王开加, 程建生, 段金辉, 等. 基于时间步长自适应技术的海上浮基风电平台绕流数值模拟分析[J]. 船舶与海洋工程, 2013(2): 52-57. Wang K J, Cheng J S, Duan J H, et al. Numerical simulation analysis of flow around offshore floating wind power platforms based on time step adaptive technology [J]. Ship and Ocean Engineering (in Chinese), 2013(2): 52-57.
- [11] Hutchinson, T A. An adaptive time-step for increased model efficiency [C] // 19th Conference on Numerical Weather Prediction, Omaha, NE, American Meteorological Society, 2009, 19A, 1.
- [12] 薛纪善, 陈德辉, 等著. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 67. Xue J S, Chen D H, et al. Numerical Forecasting System GRAPES Scientific Design and Application (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 2008: 67.
- [13] 邓华, 薛纪善, 徐海明, 等. GRAPES 中尺度模式中不同对流参数化方案模拟对流激发的研究[J]. 热带气象学报, 2008, 24(4): 327-334. Deng H, Xue J S, Xu H M, et al. Study of different cumulus parameterization schemes of GRAPES-Meso model in simulation of convection provocation [J]. J Trop Meteor (in Chinese), 2008, 24(4): 327-334.
- [14] 陈子通, 万齐林, 沈学顺, 等. GRAPES 区域模式水汽平流方案的比较与改进[J]. 热带气象学报, 2010, 26(1): 1-6. Chen Z T, Wan Q L, Shen X S, et al. Comparisons and improvement of water vapor advection schemes of GRAPES regional model [J]. J Trop Meteor (in Chinese), 2010, 26(1): 1-6.
- [15] 王雨, 李莉. GRAPES\_Meso V3.0 模式预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2010, 21(5): 524-534. Wang Y, Li L. Verification of GRAPES-Meso V3.0 model forecast results [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2010, 21(5): 524-534.
- [16] 王德立, 徐国强, 贾丽红. 2013. GRAPES 的积云对流参数化方案性能评估及其改进试验[J]. 气象, 39(2): 166-179. Wang D L, Xu G Q, Jia L H. 2013. The evaluation of cumulus parameterization schemes in GRAPES model and its improved experiments [J]. Meteor Mon (in Chinese), 39(2): 166-179.
- [17] 郑晓辉, 徐国强, 魏荣庆. 2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验[J]. 气象, 39(1): 57-66. Zheng X H, Xu G Q, Wei R Q. 2013. Introducing and influence testing of the new cloud fraction scheme in the GRAPES [J]. Meteor Mon (in Chinese), 39(1): 57-66.
- [18] 毛冬艳, 朱文剑, 樊利强, 等. GRAPES MESOV3.3 模式强天气预报性能的初步检验[J]. 气象, 2014(12): 1429-1438. Mao D Y, Zhu W J, Fan L Q. Preliminary synoptic verifica-

- tion on the performance of GRAPES MESO V3.3 in severe weather forecasting [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2014 (12): 1429-1438.
- [19] 万子为, 王建捷, 黄丽萍, 等. GRAPES-Meso 模式浅对流参数化的改进与试验[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1066-1079. Wan Z W, Wang J J, Huang L P, et al. An improvement of the shallow convection parameterization scheme in the GRAPES-Meso [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2015, 73(6): 1066-1079.
- [20] 郭云云, 邓莲堂, 范广洲, 等. GRAPES 中尺度模式中不同积云参数化方案预报性能对比研究[J]. 气象, 2015(8): 932-941. Guo Y Y, Deng L T, Fan G Z. Comparative analysis of different cumulus parameterization schemes in GRAPES Meso Model [J]. Meteor Mon (in Chinese), 2015(8): 932-941.
- [21] 康家琦, 王建捷, 黄丽萍, 等. 2016. GRAPES-Meso 模式浅对流云辐射效应的改进试验[J]. 气象学报, 74(5): 715-732. Kang J Q, Wang J J, Huang L P, et al. 2016. An improvement on the radiation effects of shallow convective clouds in GRAPES-Meso model [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 74(5): 715-732.
- [22] 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES GFS 全球中期预报系统的研发和业务化[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 1-10. Shen X S, Su Y, Hu J L. Development and operation transformation of GRAPES Global middle-range Forecast System [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2017, 28(1): 1-10.
- [23] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES-MesoV4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al. Main technical improvements of GRAPES-Meso V4.0 and verification [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2017, 28(1): 25-37.
- [24] 杨军丽, 沈学顺, 陈炯. 利用 GABLS2 客观评估 GRAPES 的边界层参数化方案[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 276-281. Yang J L, Shen X S, Chen J. Objective evaluation of PBL parameterization scheme in GRAPES based on GABLS2 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2019, 47(2): 276-281.
- [25] 刘永柱, 龚建东, 张林, 等. 线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响[J]. 气象学报, 2019, 77(2): 196-209. Liu Y Z, Gong J D, Zhang L. Influence of linearized physical processes on the GRAPES 4DVAR [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2019, 77(2): 196-209.
- [26] 佟华, 胡江林, 张玉涛. GRAPES 模式后处理技术改进应用研究[J]. 气象科技, 2020, 48(4): 511-517. Tong H, Hu J L, Zhang Y T. Improvement and application of Post-Processing technology in GRAPES Model [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2020, 48(4): 511-517.
- [27] 郭云云, 邓莲堂, 冯丽莎, 等. GRAPES 中尺度模式中 Kain-Fritsch 方案的改进及应用试验[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(4): 10-15. Guo Y Y, Deng L T, Feng L S. The improved and application experiments of Kain-Fritsch scheme in GRAPES-Meso model [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 2020, 40(4): 10-15.
- [28] 刘志丽, Jimy Dudhia, 陈静, 等. 公里级 CMA\_MESO 模式 FSS 评分技术研究[J]. 气象科技, 2022, 50(5): 660-669. Liu Z L, Jimy Dudhia, Chen J, et al. Fraction skill score verification technology for kilometer-level CMA MESO model [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2022, 50(5): 660-669.
- [29] 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报, 2022, 33(6): 641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 2022, 33(6): 641-654.
- [30] Liu Z, Wang H, Zhang L, et al Incorporation and improvement of a heterogeneous chemistry mechanism in the atmospheric chemistry model GRAPES-Meso5.1/CUACE and its impacts on secondary inorganic aerosol and PM<sub>2.5</sub> simulations in Middle-Eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157530-157530.
- [31] 刘永柱, 张林, 陈炯, 等. CMA-GFS 4DVar 边界层过程线性化的改进[J]. 应用气象学报, 2023, 34(1): 15-26. Liu Y Z, Zhang L, Chen J. An improvement of the linearized planetary boundary layer parameterization scheme for CMA-GFS 4DVar [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2023, 34(1): 15-26.
- [32] 胡志晋, 史月琴. 关于半拉格朗日半隐式大气模式的时步问题[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 1-10. Hu Z J, Shi Y Q. On the time step of semi-lagrangian semi-implicit atmospheric model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2006, 30(1): 1-10.

## Experiment on Adaptive Time Step Scheme in CMA-MESO 3 km Model

DENG Liantang ZHU Lijuan ZHANG Jin YU Fei

(CMA Earth System Numerical Prediction Center, Beijing 100081)

**Abstract:** The time step is a critical parameter for the stable operation of numerical weather models. To achieve stable model operation and ensure efficiency, an adaptive time step scheme is designed based on the characteristics of the time integration scheme of the CMA-MESO 3 km model. This scheme relies on the model's maximum Courant number and proposes two methods: the target aiming method and the top trimming method, depending on the adjustment approach. (1) Target aiming method: after adjusting the model's time step, the maximum Courant number in the model approaches a given target value throughout the entire integration process. (2) Top trimming method: after adjusting the model's time step, the maximum Courant number in the model does not exceed a given target value throughout the entire integration process. In order to implement the adaptive time step scheme in the CMA-MESO 3 km model, time control technology suitable for the CMA-MESO 3 km model is developed, including time control for the integration process, time processing for input/output, and time interpolation handling. Two types of experiments, namely case experiments and batch experiments, are designed to verify the application performance of the scheme in the CMA-MESO 3 km model. The individual case experimental results show that when the target aiming method is employed, the maximum Courant number in the model fluctuates around the target value, enhancing model stability. As the target Courant number decreases, the model becomes more stable, but the total number of integration steps and the total integration time increase. When using the top trimming method, adjustments to reduce the time step are only made when the maximum Courant number in the model exceeds the target value, keeping the maximum Courant number close to the target. When the Courant number is below this target value, if the model's time step has been previously adjusted, the time integration step is gradually restored to the initial time step; otherwise, the model's time step remains unchanged. The results of batch experiments indicate that the adaptive time step scheme of both methods can effectively avoid the situation of model integral overflow and significantly improve the stability of model integration. The impact of the scheme on the simulation results of model precipitation and geopotential height fields is relatively small. For a 3 km resolution model, when the target Courant number is set at approximately 1.2, the top trimming method is more suitable for operational use than the target aiming method. This scheme not only ensures the stable operation of the CMA-MESO 3 km model but also allows a larger integral time step, thereby enhancing the operational efficiency of the model. Currently, the adaptive time step is implemented in operational applications.

**Keywords:** CMA-MESO; adaptive time step scheme; target aiming method; top trimming method

Received: 2023-12-15 Accepted: 2024-11-19

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)