

## 投稿信

奇异向量(SVs)初值扰动方法是当前主流的集合预报初值扰动方法之一。依据线性动力学中的有限不稳定理论,通过切线性模式和伴随模式,在特定的约束条件下得到的 SVs 反映了相空间扰动增长最快的方向,由这些 SVs 构成的集合预报初始扰动代表了大气误差的分布特征。20 世纪 90 年代,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)率先将 SVs 应用于全球集合预报系统的初值扰动,在此之后日本气象厅、法国气象局和澳大利亚气象局也开展了基于 SVs 初值扰动的集合预报系统研究。中国气象局数值预报中心自 2008 年起开始发展基于 GRAPES 模式的 SVs 初值扰动技术,并取得了一定进展,如今业务运行的新一代全球集合预报系统 GRAPES-GEPS 就采用了 SVs 初值扰动技术。SVs 的扰动结构特征与权重模、最优时间间隔(OTI)以及切线性伴随模式中线性化物理过程的使用密切相关。在 SVs 计算中使用了湿物理切线性模式和伴随模式计算得到的奇异向量称为湿奇异向量(Moist SVs)。不同于干 SVs,Moist SVs 具有更小的空间尺度,且湿物理过程发生的时间往往较短,其线性近似的时效不及干绝热过程。研究 Moist SVs 对模式水平分辨率以及最优化时间间隔(OTI)的敏感性对集合预报系统至关重要。而目前引入了 Moist SVs 的 GRAPES-GEPS 对模式水平分辨率和 OTI 敏感性的工作还未开展。

本文基于中国气象局数值预报中心自主研发的 GRAPES 全球集合预报系统(GRAPES-GEPS)业务版本分析了不同时空分辨率下 Moist SVs 特征及其集合预报,从能量模、能量谱、空间分布等分析 Moist SVs 特征,期望为我国的 GRAPES-GEPS 系统中使用 Moist SVs 找到适宜的时空分辨率,既能保证 Moist SVs 的扰动能够得到充分的发展,又兼顾计算代价及稳定性。此外本文从集合预报的角度分析不同时空分辨率下 Moist SVs 扰动初值的非线性发展特征,从各等压面变量评分、降水评分、降水概率预报等方面评估不同初值扰动的集合预报效果,目的是能够为集合预报选择更好的初值扰动,提高集合预报效果。

# GRAPES-GEPS 湿奇异向量的时空尺度敏感性研究

王静<sup>1,3</sup>, 刘娟娟<sup>\*1,3</sup>, 王斌<sup>1,3</sup>, 陈静<sup>2</sup>, 刘永柱<sup>2</sup>

- 1 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
- 2 国家气象中心, 北京 100081
- 3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 湿奇异向量 (Moist Singular Vectors, 简称 Moist SVs) 是包含了湿物理切线性过程计算得到的奇异向量。研究 Moist SVs 对最优化时间间隔 (optimization time interval: OTI) 及模式水平分辨率的敏感性对提高集合预报效果至关重要。本文基于中国气象局数值预报中心自主研发的 GRAPES 全球集合预报系统 (GRAPES-GEPS) 业务版本研究了 4 组不同时空尺度 (不同 OTI 和水平分辨率) 下的 Moist SVs, 从能量模、能量谱、空间剖面等方面分析热带外 Moist SVs 特征, 并从等压面变量评分、降水评分、降水概率预报等方面评估不同初值的集合预报效果。结果表明: 提高 Moist SVs 水平分辨率可使其扰动具有较大的增长率, 缩短 OTI 后 Moist SVs 能量向上传播的趋势更明显, 并可以在中尺度范围产生较大 SVs 扰动。不同 OTI 下初始 Moist SVs 相似性较低, 结构差异较大。从集合预报的结果来看, OTI 为 24h 试验的集合扰动能量增长较大, 集合离散度在预报的 0-96h 有显著提升, 特别是 2 米温度, 且近地面要素的 outlier 评分也有明显改进。进一步分析发现, 提高水平分辨率和缩短 OTI 的 Moist SVs 能够提高降水概率预报, 而降水评分显示, 同一水平分辨率下, OTI 越短评分越好, 但是提高 Moist SVs 的水平分辨率并不一定会提升小雨到中雨量级的降水评分。

**关键词:** 湿奇异向量, 最优时间间隔, 集合预报, GRAPES-GEPS

文章编号:                      中图分类号:                      文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.20164

## A study of sensitivity of Moist Singular Vectors in GRAPES-GEPS to temporal and spatial scales

WANG Jing<sup>1,3</sup>, LIU Juanjuan<sup>\*1,3</sup>, WANG Bin<sup>1,3</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>, LIU Yongzhu<sup>2</sup>

收稿日期: 2020-06-01; 网络预出版日期:

资助项目: 重大自然灾害监测预警与防范项目“副热带地区区域模式关键技术及其应用”

(2017YFC1502102) 以及 GRAPES 攻关专项, 国家重点研发计划项目 (2018YFC1507405)

作者简介: 王静, 女, 1992, 博士研究生, 主要从事集合预报研究, E-mail:wangj\_929@163.com

\*通讯作者: 刘娟娟, 从事集合预报与资料同化研究, Email: ljjxgg@mail.iap.ac.cn

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *National Meteorological Center, Beijing 100081*

3 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

**ABSTRACT:** The Singular Vectors (SVs) that include the linearized moist physical process in the calculation are called Moist SVs. Studying the sensitivity of moist SVs to the horizontal resolution and the optimization time interval (OTI) is important for the ensemble forecasting system. Based on the operational version of GRAPES-GEPS, which was independently developed by the China meteorological administration numerical forecast center, this paper analyzes the characteristics of subtropical Moist SVs and their ensemble forecasts at four groups of different horizontal and temporal resolutions. The characteristics of moist SVs in terms of energy norm, energy spectrum and spatial profile were analyzed, and the evaluation of the ensemble forecast of four groups of experiments will be made in terms of isopressure variables scores, precipitation scores, and precipitation probability prediction.

The results show that increased the horizontal resolution of Moist SVs leads to a larger growth rate of their perturbation. The upward propagation of Moist SVs energy is greater than the downward propagation after shorting the OTI, and can produce larger SVs perturbation in the mesoscale ranges. The initial Moist SVs under different OTIs are less similar and their structures are different to each other. From the perspective of ensemble forecast, the average ensemble perturbed energy of the shorter OTI (24h) has increased greatly, and the ensemble spread has been improved during the prediction of 0-96h, especially for the 2-m temperature, and the outlier score has also been improved in the near-surface variables. It was further found that increasing the horizontal and temporal resolution can improve the precipitation probability prediction. The precipitation scores show that at the same spatial resolution, the shorter OTI, the better the scores, while increasing the spatial resolution of the moist SVs failed to improve the precipitation scores in the light rain to moderate rain.

**Key words:** moist Singular Vector, optimization time interval, ensemble prediction, GRAPES-GEPS

## 1. 引言:

奇异向量 (Singular vector, SVs) 初值扰动方法是当前主流的集合预报初值扰动方法之一。依据线性动力学中的有限不稳定理论, 利用切线性模式(Tangent Linear Model, TLM)和伴随模式(Adjoint Model, ADM), 在特定的约束条件下得到的 SVs 反映了相空间扰动增长最快的方向, 由这些 SVs 构成的集合预报初始扰动代表了大气误差的分布特征(Lorenz,1965; Molteni et al., 1993, 1996; Buizza et al., 1995, 1998, 1999)。20 世纪 90 年代, 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts; ECMWF) 率先将 SVs 应用于全球集合预报系统进行初值扰动(Palmer et al.,1993; Molteni et al.,1996), 在此之后日本气象厅、法国气象局和澳大利亚气象局也开展了基于 SVs 初值扰动的集合预报系统研究 (Diaconescu and Laprise, 2012)。中国气象局数值预报中心自 2008 年起开始研发基于 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式 (陈德辉和沈学顺, 2006; 薛纪善和陈德辉, 2008) 的 SVs 初值扰动技术。刘永柱等 (2013) 基于 GRAPES 全球 TLM 和 ADM1.0 版本开展了 SVs 方法研究, 受限于 TLM 和 ADM 发展技术, 该初值扰动方案存在一些不足, 如扰动能量在近地面迅速增长、SVs 计算效率较低等。李晓莉和刘永柱 (2019) 研究了 GRAPES 全球奇异向量的改进方案, 在全球 TLM 和 ADM2.0 模式中引入了线性化边界层物理过程, 该方案能够有效解决上述问题并且提高计算效率。目前业务运行的全球集合预报系统 (Global Ensemble Prediction System, GEPS) 副热带地区 SVs 的计算使用 TLM 和 ADM2.0 版本, 引入线性化边界层方案, 使用总能量模为权重算子, 水平分辨率为  $2.5^\circ$ , 最优化时间间隔 (optimization time interval, 以下简称 OTI) 为 48 小时, 并采用初始奇异向量(Initial SVs)与演化奇异向量(Evolved SVs)相结合的方式构建初始扰动。

SVs 的扰动结构与模式水平分辨率、权重模、OTI 的长短以及切线性模式和伴随模式中线性化物理过程的使用密切相关 (Diaconescu and Laprise, 2012)。Komori 和 Kadowaki (2010) 在研究热带地区的 SVs 时, 发现提高模式水平分辨率后小尺度的信息表现得更加清晰。Buizza et al. (1998) 使用了三种水平分辨率 (T21, T42 和 T63) 计算副热带地区的 SVs, 研究发现更高分辨率的 T42 和 T63 对模式误差的预报较好, 指出高分辨率的切线性模式也需要更多线性化物理

30 过程。线性化物理过程即在切线性模式中对物理过程进行线性化处理，使切线性  
31 模式能够包含更多的物理信息。国际上一些学者将在切线性模式中使用与降水过  
32 程有关的线性化湿物理过程方案（如线性化的大尺度凝结方案和线性化积云对流  
33 参数化方案）来计算得到的 SVs 称为湿奇异向量（Moist SVs），反之称为干奇异  
34 向量（Dry SVs）（Coutinho et al.,2004; Hoskins and Coutinho,2005; Diaconescu and  
35 Laprise, 2012）。

36 Buizza et al.（1994）针对 Dry SVs 开展了最优时间间隔(OTI)分别为 12-72h  
37 的敏感试验，试验指出 OTI 为 12h 与 OTI 为 24-72h 的初始扰动有很大差异，OTI  
38 为 12h 的试验不足以产生足够的扰动，认为 OTI 的最小值应当为 24h。Komori  
39 和 Kadowaki(2010)使用干能量模的 SVs 研究台风时对比了 24h 和 48h 的 OTI，  
40 认为 48h 的演化时间对中纬度大尺度天气过程有更大的影响，而 24h 的演化时间  
41 有利于热带气旋相关结构的快速发展。此外，Palmer et al.（2007）和 Puri et al.  
42 （2001）等人的研究表明热带地区的 SVs 需要更高的模式水平分辨率、相对较短  
43 的 OTI 以及更多切线性物理过程。另一方面，Walser et al.（2006）使用 T<sub>L</sub>96 包  
44 含湿物理过程的切线性模式计算了 Moist SVs，其中 OTI 为 24h，对比与 ECMWF  
45 业务运行 Dry SVs（T42，OTI 为 48h）的差异，发现提高 Moist SVs 时空尺度能  
46 够在预报前期提供更可靠的离散度。

47 目前我国业务运行的 GRAPES-GEPS 在 TLM 和 ADM 中线性化物理过程仅  
48 使用了线性化边界层方案，其求得的奇异向量也是 Dry SVs。随着 GRAPES 切线  
49 性模式和伴随模式的发展，有更多的线性化物理过程加入了模式中（刘永柱等，  
50 2017）。Wang et al.（2020）基于业务 GRAPES-GEPS 在 SV 计算中引入了线性化  
51 大尺度凝结方案，分析了 GRAPES 模式中热带外地区 Moist SV 的特征，而其 OTI  
52 和水平分辨率设置与当前业务运行的 Dry SVs 版本相同。线性化湿物理过程的引  
53 入也带来了一定的挑战，因为提高 SVs 水平分辨率将有利于集合预报捕捉更小  
54 尺度的天气特征，而水平分辨率的变化进一步影响了切线性近似是否在 OTI 内  
55 成立。如何配置 Moist SVs 计算的时空尺度，使其既能保证 Moist SVs 计算中切  
56 线性近似的成立，又能捕捉更多更小尺度的初始扰动特征，这对其在集合预报系  
57 统中的应用至关重要。因此，在 GRAPES-GEPS 中开展 Moist SVs 的 OTI 和水平  
58 分辨率的（时空尺度）敏感性研究，是一项具有实际意义的工作。本文基于

59 GRAPES-GEPS 从能量模、能量谱、空间分布等方面分析不同时空尺度下副热带  
 60 地区 Moist SVs 特征，期望为 Moist SVs 设置适宜的 OTI 和水平分辨率，既能保  
 61 证 Moist SVs 的扰动能够得到充分的发展，同时还兼顾计算代价及稳定性。此外  
 62 本文还将从集合预报的角度（等压面变量评分、降水评分，降水概率预报等）评  
 63 估不同参数设置下集合预报的效果，分析 Moist SVs 扰动的非线性发展特点，期  
 64 望为集合预报提供更好的初值扰动。

## 65 2. 方案设计

### 66 2.1 SV 计算方案简介

67 一个小扰动  $\mathbf{X}$  从初始时刻  $t_0$  到演化时刻  $t$  的变化可以用线性近似来表达

$$68 \quad \mathbf{X}(t) = \mathbf{L}(t, t_0) \mathbf{X}(t_0) \quad (1)$$

69 其中  $\mathbf{L}(t, t_0)$  是向前的切线性算子， $\mathbf{X}(t_0)$  为初始时刻的扰动， $\mathbf{X}(t)$  是演化时  
 70 刻的扰动。SVs 的求解可以归结为演化扰动向量与初始扰动向量模比值最大的问  
 71 题：

$$72 \quad J(x) = \frac{[\mathbf{E}\mathbf{X}(t), \mathbf{E}\mathbf{X}(t)]}{[\mathbf{E}\mathbf{X}(t_0), \mathbf{E}\mathbf{X}(t_0)]} = \frac{[\mathbf{E}\mathbf{L}\mathbf{X}(t_0), \mathbf{E}\mathbf{L}\mathbf{X}(t_0)]}{[\mathbf{E}\mathbf{X}(t_0), \mathbf{E}\mathbf{X}(t_0)]} \quad (2)$$

73  $[\cdot, \cdot]$  为欧拉内积，下文将略去  $\mathbf{X}$  的括号， $\mathbf{E}$  为转化算子，将状态向量  $\mathbf{X}$  从物  
 74 理空间转变为欧拉空间的无量纲向量  $\tilde{\mathbf{X}}$ 。

$$75 \quad \mathbf{X} = \mathbf{E}^{-1} \tilde{\mathbf{X}} \quad (3)$$

76 根据能量模公式，变换算子  $\mathbf{E}$  可以表示为：

$$77 \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\rho_r \cos \varphi}{2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{\rho_r \cos \varphi}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{\rho_r \cos \varphi T_r c_p}}{\theta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{\rho_r \cos \varphi T_r c_p}}{\Pi_r} \end{pmatrix} \quad (4)$$

78 式中  $\rho_r$  为参考密度， $c_p$  为定压比热， $T_r$  为参考温度， $\theta_r$  为参考密度， $\Pi_r$   
 79 为参考无量纲气压。

80 由此 (2) 可表达为:

$$81 \quad J(x) = \frac{(\tilde{X})^T (ELE^{-1})^T (ELE^{-1}) (\tilde{X})}{(\tilde{X})^T (\tilde{X})} \quad (5)$$

82 上式可以转化为特征值分解问题:

$$83 \quad (ELE^{-1})^T (ELE^{-1}) (\tilde{X}) = \lambda (\tilde{X}) \quad (6)$$

84  $\lambda$  为矩阵  $(ELE^{-1})^T (ELE^{-1})$  特征值。令  $A = ELE^{-1}$ , 则  $A$  的右奇异向量就是矩

85 阵  $A^T A$  的特征向量,  $A$  的奇异值  $\sigma$  可以通过矩阵  $A^T A$  的特征值  $\lambda$  来求得。

$$86 \quad \sigma_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (7)$$

87 (6) 式可表示为:

$$88 \quad E^{-1} L^T E^2 L E^{-1} (\tilde{X}) = \sigma^2 (\tilde{X}) \quad (8)$$

89  $L^T$  是切线性模式的转置, 即伴随模式, Buizza(1994)提出了一个投影算子  $P$ ,

90 将目标区域外的 SV 设置为 0, 上式可变化为:

$$91 \quad E^{-1} L^T P^T E^2 L P E^{-1} (\tilde{X}) = \sigma^2 (\tilde{X}) \quad (9)$$

92 更为详细的介绍可以参考刘永柱等 (2013) 和李晓莉等 (2019)。由 SVs 的  
93 计算过程可知, 影响 SVs 结果的关键因素有三个: 一是权重模的选取, 许多研究  
94 表明, 基于干能量模算子的 SVs 能够产生中纬度斜压不稳定的扰动 (Hoskins and  
95 Coutinho, 2005; 刘永柱等, 2013)。二是演化时间的选择, 也就是 OTI, 目前中  
96 纬度 Dry SVs 的计算往往将 OTI 设置为 48h。三是切线性模式中的线性化物理过  
97 程的选择。目前 GRAPES-GEPS 业务版本中 SVs 计算过程使用的线性化物理过  
98 程仅包含垂直扩散和次网格尺度地形参数化, 称为线性化边界层方案 (Planetary  
99 Boundary Layer, PBL) (李晓莉和刘永柱, 2019)。由前人的研究可知线性化大尺  
100 度凝结过程对 SVs 有重要的影响 (Zadra et al., 2004), 因此 GRAPES 全球切线性  
101 模式也发展了大尺度凝结方案 (刘永柱等, 2019), 该方案是基于 Tompkins 和  
102 Janisková (2004) 提出的简化大尺度云和降水方案而开发的。本文针对该线性化  
103 湿物理过程计算得到的 Moist SVs 开展研究。

## 104 2.2 试验设置

105 叶璐等 (2020) 基于区域模式研究多尺度奇异向量初值扰动时提出可使用水

106 平尺度为  $0.5^\circ$  的 SVs 代表小尺度不确定信息、 $1.5^\circ$  和  $2.5^\circ$  则分别对应中尺度和大  
107 尺度。本文的研究基于全球模式， $2.5^\circ$  水平分辨率可以分辨出大尺度天气过程，  
108 而  $1.5^\circ$  水平分辨率可用于分析中尺度天气过程。因此本文设计了  $2.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  水平  
109 分辨率的对比试验， $2.5^\circ/1.5^\circ$  水平分辨率对应的模式积分步长为 1200s/600s，试  
110 验的目的是为了突出湿线性化物理过程对中尺度扰动的作用。提高水平分辨率无  
111 疑会增加计算成本，需要进一步调整参数，减轻计算代价。本文还将进行 OTI 敏  
112 感性试验，分别将 OTI 设置成 24h 与 48h，为了保障 SVs 计算的稳定性及计算  
113 效率，相应的积分步长也做出调整，对比两种不同 OTI 设置对 SVs 的影响。

114 本文试验设置中，Moist SVs 的物理过程包括线性化的垂直扩散、次网格尺  
115 度地形参数化和大尺度凝结线性化过程，R25t48(表 1)表示水平分辨率为  $2.5^\circ$ ，  
116 OTI 为 48 小时，这种时空分辨率设置与 Dry SVs 业务系统相同。其余几组试验  
117 具体的设置如表 1。

118 表 1 时空分辨率对照试验的设置

119 Table 1 Settings of horizontal resolution and OTI

试验名称	计算 SVs 的水平分辨率	OTI
R25t48	$2.5^\circ \times 2.5^\circ$	48h
R25t24	$2.5^\circ \times 2.5^\circ$	24h
R15t48	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$	48h
R15t24	$1.5^\circ \times 1.5^\circ$	24h

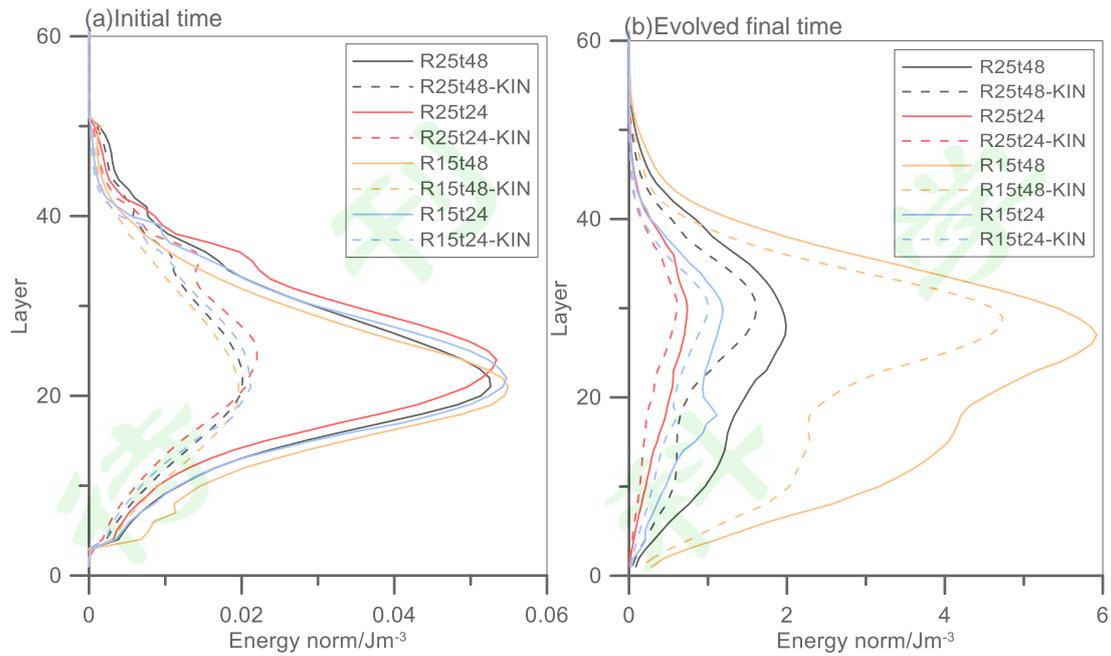
120

121 本文的试验时段为 2019 年 5 月 1 日 12UTC-5 日 12UTC 共 5 天，预报时长  
122 240 小时，预报间隔 24 小时，集合预报成员 31 个，非线性预报模式水平分辨率  
123 为  $0.5^\circ$ 。SVs 的计算目标区域为北半球 ( $20^\circ\text{N}-80^\circ\text{N}$ ) 和南半球 ( $20^\circ\text{S}-80^\circ\text{S}$ )。由  
124 SVs 构造扰动初值的计算方案参见李晓莉等 (2019) 和霍振华等 (2020)。本文  
125 的 SVs 扰动初值仅考虑初始时刻 SVs(Initial SVs)，不包含演化时刻 SVs(Evolved  
126 SVs)。此外，为了更清楚地描述初值扰动的作用，本文的试验均未开启模式扰动。

127

### 128 3.不同时空尺度下 Moist SVs 结构分析

#### 129 3.1 能量模垂直分布



130

131 图 1 初始时刻(a)及最后演化时刻(b)能量模垂直分布, 虚线表示动能(KIN), 实线表示总能量

132 Fig.1 Vertical distribution of energy norm at the initial time(a) and the evolved final time (b). The

133 dashed lines indicate the kinetic energy (KIN), and the solid lines indicate the total energy.

134 对四组试验的初始时刻及经过各自 OTI 线性积分的最后演化时刻(后文简称

135 为最后演化时刻: Evolved final time) SVs 能量模垂直分布进行分析, 图 1 为 30

136 个 SVs 的 5 天平均结果。无论 OTI 长短, 初始时刻 (图 1(a)) Moist SVs 的能量

137 模大值区位于对流层中层 (20 层以上, 约 700hPa 以上), 动能和内能分布相似,

138 内能占比略多于动能。然而在 20 层以上, R25t24 和 R15t24 的初始能量分别大

139 于 R25t48 和 R15t48, 20 层以下, R15t48 的初始能量最大。SVs 经过切线性模式

140 积分到最后演化时刻, 由图 1(b)可见, 动能与内能的增长趋势基本保持一致, 但

141 动能增长更大, 占据总能量的主导地位, 且高层增加更明显。OTI 为 24h 的 R25t24

142 (红色线) 和 R15t24 (蓝色线) 试验的能量模集中在 20-40 层之间, 能量从初始

143 时刻到最后演化时刻向上传播的趋势更明显, 且高分辨率的 R15t24 能量大于低

144 分辨率的 R25t24。值得注意的是, R15t24 在 18 层左右有能量的陡增, 这是由于

145 在试验时段内个别 SVs 在低层迅速增长, 这种陡增在增加试验天数之后能够得

146 到平滑。而 OTI 为 48h 的 R25t48 与 R15t48 相对于初始时刻都出现了明显的能

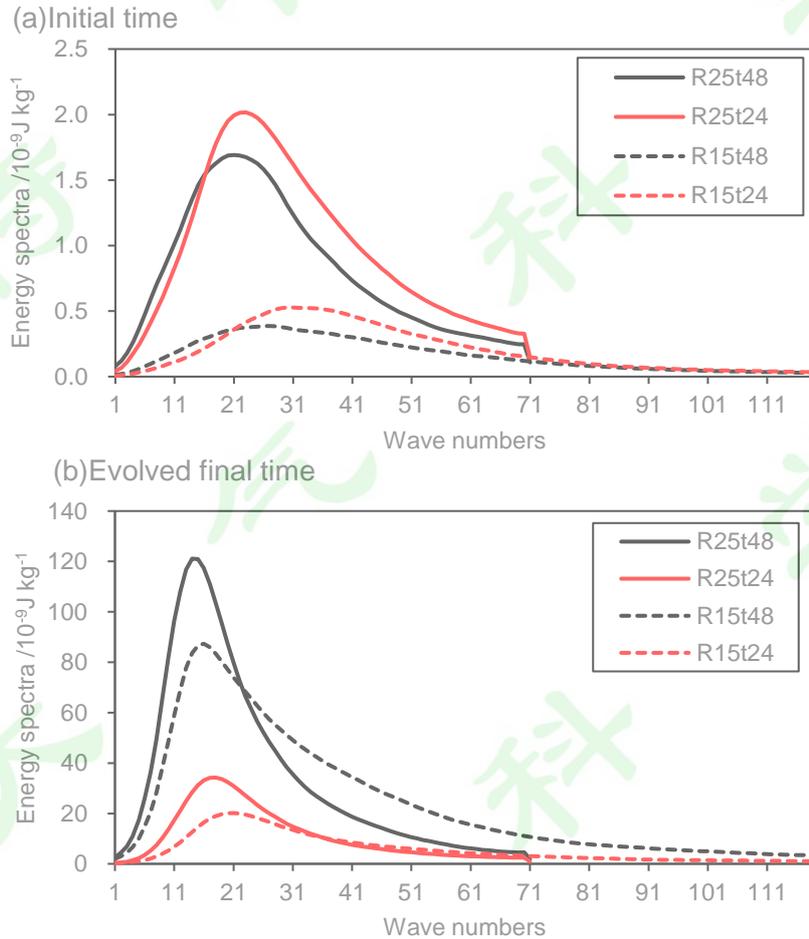
147 量下传, 且由于演化时间较长, 整个对流层的能量都有所增加。

148 总的来说, SV 计算的分辨率越高, OTI 时间越长, 最后演化时刻能量模

149 越大。采用较长 OTI 得到的 Moist SVs 在最后演化时刻低层能量有一定增长，能  
150 量存在明显的下传，而 OTI 时间较短的 Moist SVs 能量的上传更为明显。

151

### 152 3.2 能量谱分析



153

154 图 2 初始时刻(a)及最后演化时刻(b)SVs 在第 26 层(约 500hPa)能量谱(单位:  $\text{J kg}^{-1}$ )

155 Fig.2 Energy spectrum (unit:  $\text{J kg}^{-1}$ ) of SVs at the initial time(a) and the Evolved final time(b)

156 图 2 展示了 30 个 Moist SVs 在第 26 层(约 500hPa)5 天平均的能量谱分布。

157 首先分析初始时刻(图 2(a))能量谱, 在  $2.5^\circ$  水平分辨率下, OTI 较短的 R25t24 相

158 对于 R25t48 而言, 能谱向中小尺度偏移, 与此同时两者能谱峰值保持一致。而

159 在  $1.5^\circ$  水平分辨率下, OTI 较短的 R15t24 不仅相对于 R15t48 向更小尺度偏移,

160 其能谱的峰值也移动到 30-40 (约 1000km) 波处, 而其余几组试验在 20-25 波

161 (约 2000km) 左右。这说明采用较短的 OTI 可以在中尺度范围产生较大 SVs 扰

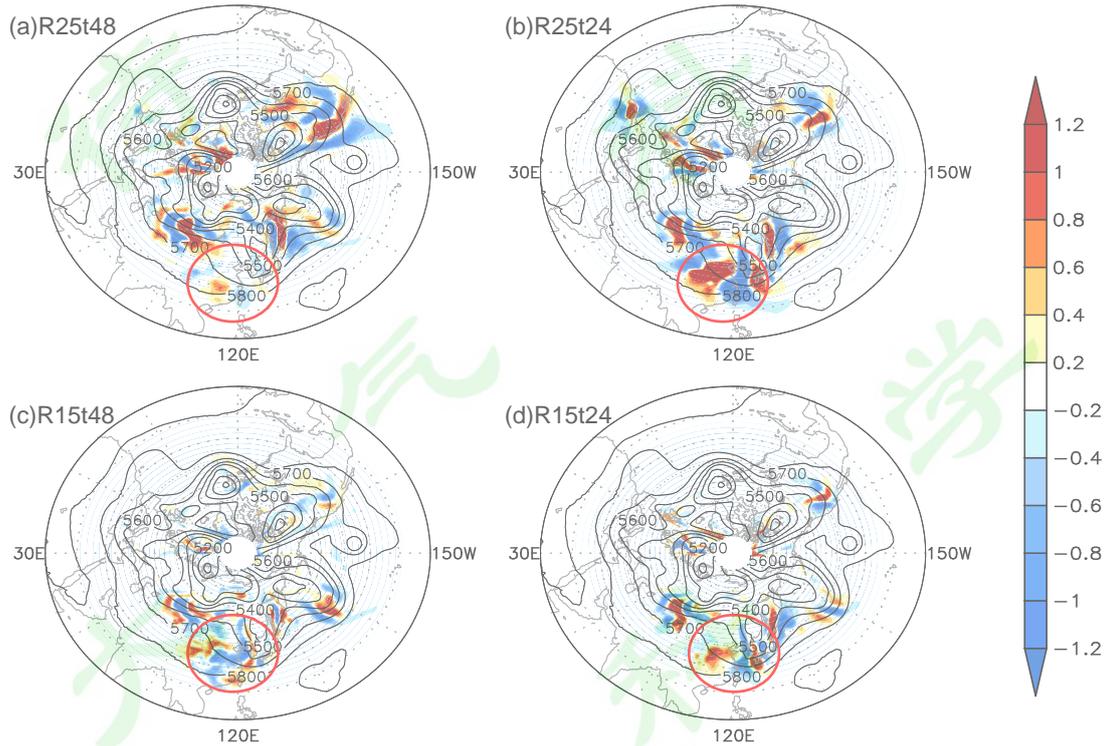
162 动。在图 2(b)中, 所有试验的能谱峰值均在 15-20 波左右, 意味着能量从初始时

163 刻到最后演化时刻有升尺度转移的特征，而高分辨率的 R15t48 相较于 R25t48 含  
164 有更多中尺度能量，表明水平分辨率的提高有利于能量向中尺度转移。

165 总的来说，采用较短的 OTI 和提高 Moist SVs 水平分辨率可以在中尺度范围  
166 产生较大 SVs 扰动。

167

### 168 3.3 初始时刻 Moist SVs 水平分布



169

170 图3 北半球前 15 个 Moist SVs 在第 26 层（约 500hPa）扰动位温(填色，放大  $10^3$ ，单位：

171

K)水平分布，黑色线为控制预报 500hPa 位势高度

172

Fig.3 Perturbed potential temperature (with amplification of  $10^3$ , unit: K) (shaded) of the first 15

173

Moist SVs in the Northern Hemisphere on level 26 (500hPa)and 500hPa geopotential height

174

(black solid line) of control forecast

175

将四组试验 5 月 1 日 12UTC 初始时刻第 26 层（500hPa）前 15 个 Moist SVs

176

叠加，图 3 为 SVs 扰动位温和控制预报 12UTC500hPa 位势高度场，由图 3 可见

177

几组试验主要的扰动都分布在斜压不稳定的区域，如东亚大槽前后，欧洲前槽以

178

及北美槽处，然而 Moist SVs 的形态和大小均有所不同。以东亚槽区（图 3 中红

179

色圈）为例，R25t48 在东亚槽后的 Moist SVs 较小，而缩短 OTI 的 R25t24 覆盖

180

了整个东亚地区。在提高水平分辨率之后，Moist SVs 的尺度明显减小(图 3c 和

181 3d)。较短 OTI 的 R25t24(图 3b)和 R15t24(图 3d)中扰动的正负对均匀分布，且它  
182 们的扰动量分别大于 R25t48 和 R15t48，这与能量模垂直分布的结论是吻合的，  
183 即 20 层以上，较短 OTI 的 Moist SVs 的初始时刻能量更大。

184 总的来说，在 R25t24 和 R15t24 两组实验中，东亚槽区的 SVs 扰动与环流场  
185 吻合的程度高于其他两组试验，且其形态分布与位势高度曲线近乎垂直。提高水  
186 平分分辨率使初始 SVs 具有更多中小尺度信息。同一水平分辨率下不同 OTI 所产  
187 生的 Moist SVs 结构有很大的差异，下一节将对此进行相关性分析。

188

### 189 3.4 不同 OTI 下 Moist SVs 相似性分析

190 为了进一步了解不同 OTI 下 Moist SVs 的结构差异，对同一水平分辨率不同  
191 OTI 的 Moist SVs 进行相似性分析，对某一变量的水平分布做相关系数。

$$192 \quad \text{相关系数} = \frac{\sum_{j=1}^{mjy} \sum_{i=1}^{mix} (a_{(i,j)} - \overline{a_{(i,j)}})(b_{(i,j)} - \overline{b_{(i,j)}})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{mjy} \sum_{i=1}^{mix} (a_{(i,j)} - \overline{a_{(i,j)}})^2 \times (b_{(i,j)} - \overline{b_{(i,j)}})^2}} \quad (10)$$

193 式中  $a_{(i,j)}$  和  $b_{(i,j)}$  是变量， $i, j$  分别为纬向和经向格点， $mix, mjy$  分别为纬向和  
194 经向格点总数， $\overline{a_{(i,j)}}$ ， $\overline{b_{(i,j)}}$  为变量二维平面的平均值。值得注意的是，SVs 计算  
195 之后具有符号，这种符号可在组合初值扰动时消除，因此相关系数的绝对值代表  
196 了奇异向量之间的相关性。

197 表 2（2.5°水平分辨率）和表 3（1.5°水平分辨率）分别展示了不同 OTI 下  
198 SV01-SV05 在第 20 层(约 700hPa)初始时刻 SV 的水平纬向风扰动的相关系数，  
199 由表 2 和 3 可见，同一水平分辨率下，采用不同 OTI 后，除了前几个 SV 相关性  
200 较高以外，其余的 SVs 间相关性都很低，说明在不同 OTI 下初始时刻 SVs 结构  
201 差异很大。

202

203

表 2 R25t24 与 R25t48 前 5 个 Moist SVs 第 20 层的水平纬向风扰动相似性

204

Table 2 Similarity of R25t24 and R25t48 (Zonal wind disturbance of the first 5 Moist SVs at 20

205

level)

R25t24 \ R25t48	SV01	SV02	SV03	SV04	SV05
SV01	<b>0.9018</b>	-0.0198	0.0077	-0.1804	0.0265
SV02	0.0005	0.0048	-0.3905	0.0054	0.0201
SV03	-0.0031	-0.0054	0.5053	-0.0093	-0.0241
SV04	0.0008	-0.0087	0.0052	-0.019	0.0117
SV05	0.0595	<b>-0.7518</b>	0.0032	-0.1697	0.2747

206

表 3 R15t24 与 R15t48 前 5 个 Moist SVs 第 20 层的水平纬向风扰动相似性

207

Table 3 Similarity of R15t48 and R15t24 (Zonal wind disturbance of the first 5 Moist SVs at 20

208

level)

R15t24 \ R15t48	SV01	SV02	SV03	SV04	SV05
SV01	<b>-0.842</b>	0.0083	0.0091	-0.1153	-0.0125
SV02	-0.0206	-0.0377	<b>-0.6231</b>	-0.0044	-0.3241
SV03	0.0054	-0.0212	-0.1722	-0.0255	0.2409
SV04	0.0284	-0.0175	0.0028	0.0172	0.005
SV05	-0.0143	0.1806	-0.0038	-0.0808	0.0333

210

211 由于 R25t48 (R15t48) 与 R25t24 (R15t24) 除了 OTI 不同以外, 还具有不同的  
 212 的积分步长, 为了区分两者对实验结果的影响, 做一组补充实验。试验将 OTI 设  
 213 置为 24h, 水平分辨率设置为  $1.5^\circ$ , 而积分时间步长分别设置为 600 秒和 1200  
 214 秒, 对两者的结果做同上的相似性分析, 结果如表 4。

215

表 4 时间步长分别为 600 秒和 1200 秒的两组试验相似性

216

Table 4 Similarity of the two experiments with 600s and 1200s integration timesteps

1200s \ 600s	SV01	SV02	SV03	SV04	SV05	SV06	SV07
SV01	0.0925	0.0116	0.0675	<b>0.9726</b>	0.0336	0.0188	-0.0837
SV02	0.0078	0.1557	<b>0.9011</b>	-0.0015	-0.3285	-0.0124	0.0086
SV03	-0.0002	0.0163	0.2209	-0.0044	<b>0.7273</b>	-0.0764	0.0912
SV04	0.0167	0.0122	0.0262	-0.0178	0.0912	0.1329	<b>-0.9794</b>

SV05	-0.0084	0.1245	-0.138	0.0345	-0.1544	-0.0824	-0.2349
SV06	0.1423	0.0118	0.1264	-0.2598	0.4571	<b>0.9593</b>	0.0192
SV07	0.0079	<b>0.6792</b>	-0.1395	-0.0238	0.0147	0.0533	-0.0342

217 在时间步长对比试验中，几乎每一个 Moist SVs 都能在对比试验中找到与之  
218 相似度较高的结果(时间步长为 1200 秒的 SV01 与时间步长为 600 秒的 SV08 匹  
219 配度较高，限于图表大小未能显示)，也就是说，时间步长的影响使 SVs 的排序  
220 出现偏差，但总的结果是相似的，由此可以说明，时间步长的对 Moist SVs 结构  
221 分布的影响较小。在此基础上，将积分步长控制为 1200 秒，水平分辨率设置为  
222 1.5°，将 OTI 分别为 24h 和 48h 的两组试验进行对比分析，结果如表 5 所示，  
223 不同 OTI 的 Moist SVs 之间相似性很低。因此 R25t48(R15t48)与 R25t24(R15t24)  
224 SVs 的结构变化主要是由于 OTI 不同造成的，而非时间积分步长。

225 表 5 OTI 分别为 24h 和 48h 的两组试验相似性对比

226 Table 5 Similarities of the two experiments at different optimization times of 24h and 48h

48h \ 24h	SV01	SV02	SV03	SV04	SV05	SV06	SV07
SV01	-0.0789	-0.0101	-0.0569	<b>-0.8556</b>	0.0108	0.0322	0.0472
SV02	0.0115	<b>0.9061</b>	-0.2294	0.0119	-0.0012	-0.0059	0.0074
SV03	0.0087	-0.1402	-0.5182	0.0174	0.1627	0.0128	-0.0229
SV04	-0.1218	0.0639	0.0599	-0.1523	0.0781	0.0931	-0.0113
SV05	0.014	-0.0943	-0.4332	-0.0025	0.1845	-0.0369	0.0181
SV06	0.0022	0.0364	-0.0117	-0.0011	0.0131	-0.0031	-0.0108
SV07	0.0642	-0.0434	-0.2256	-0.2374	-0.017	-0.1517	0.057

227

## 228 4.集合预报结果分析

229 在上一节中，从能量模、能量谱、空间剖面等方面分析了在不同时空分辨率  
230 下 Moist SVs 的特征，这里进一步利用这些集合扰动样本进行预报，以评估不同  
231 试验计算得到的扰动对集合预报效果。

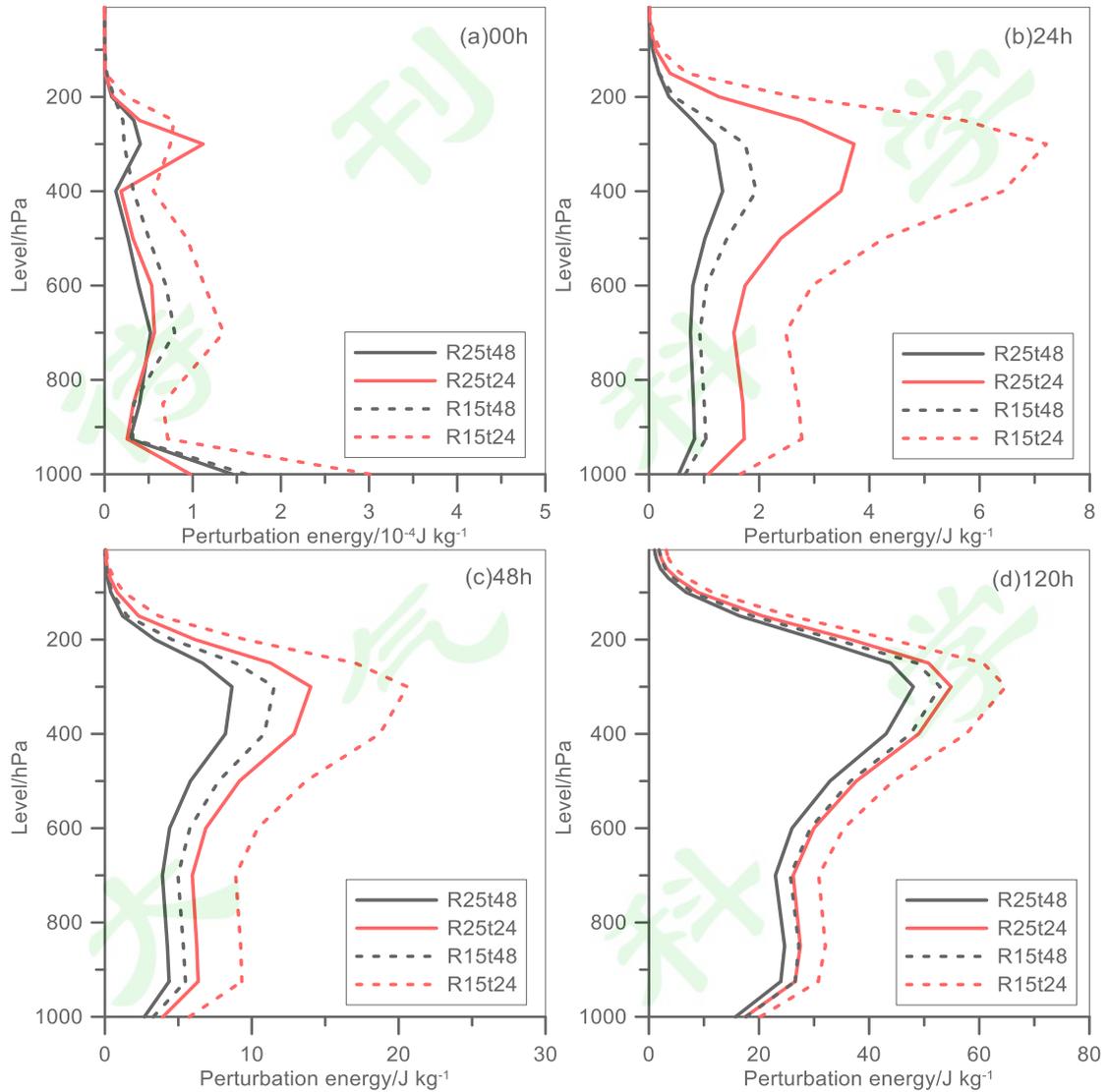
### 232 4.1 集合平均扰动能量随时间的增长特征

233 Palmer et al. (1998) 定义了一个集合扰动总能量为：

$$234 \quad \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) + \frac{c_p}{T_r} T'^2 \quad (11)$$

235  $u'$ ,  $v'$ ,  $T'$  分别为水平风场和温度的扰动， $T_r$  为参考温度， $c_p$  为干空气定压

236 比热，此处扰动值定义为集合平均与控制预报之差。由于四组试验的控制预报是  
 237 相同的，集合平均扰动能量的垂直廓线就体现了不同初值扰动的增长特征。



238  
 239 图 4 集合预报平均扰动能量随高度的分布,(a)为 00h,(b)24h,(c)48h,(d)120h(单位:  $J kg^{-1}$ )

240 Fig.4 Distribution of ensemble forecast average perturbation energy with height

241 (a)00h,(b)24h,(c)48h,(d)120h(unit:  $J kg^{-1}$ )

242 图 4 为 5 天平均的结果，红色线代表 OTI 为 24h 的 SVs 构成扰动初值的预报，黑色线代表 OTI 为 48h 的预报。初始时刻（图 4(a)）低分辨率的两组试验扰动  
 243 能量非常接近，高分辨率的两组试验扰动能量差异较大，同一分辨率下 OTI 越  
 244 短初始扰动能量越大。与此同时，R25t24（红色实线）的初始扰动能量在 400hPa  
 245 以下小于 R15t48（黑色虚线），然而经过不同预报时间之后，R25t24 的扰动增长  
 246 明显大于 OTI 较长的 R15t48 和 R25t48。由此可见，不同 OTI 所形成的初值扰动  
 247

248 增长差异较大,采用较短 OTI 所构成的扰动初值的能量增长更大,尤其是在预报  
249 的前 48h。在预报的初始阶段(24h),OTI 同为 48h 的 R25t48 和 R15t48 差异较  
250 小,说明在 OTI 为 48h 时,不同水平分辨率 Moist SVs 构成的初值扰动并未在预  
251 报 24h 内体现出明显差异,即采用较长的 OTI 所构造的扰动初值不能代表短期预  
252 报的扰动增长特征。相比而言,预报阶段 R15t24(红色虚线)的扰动增长在各个  
253 高度上都大于 R25t24(红色实线),这表明提高 Moist SVs 水平分辨率之后,更  
254 有利于扰动能量的增长。

255 较短的 OTI 能捕捉到临近时段快速增长的扰动方向,它同时代表了未来一段  
256 时间内扰动的增长特征,也就是说它包含了较长 OTI 扰动的基本特征,同时较短  
257 的 OTI 更容易保证切线性近似的成立,使得 SVs 的计算更为准确。从中长期预  
258 报来看(图 4d),R25t24 与 R15t48 扰动几乎重合,从计算效率的角度上看,提  
259 高 SVs 的水平分辨率会增加计算负担,而缩短 OTI 能够减轻计算代价,所以,  
260 相比于 R15t48,R25t24 能够在不减小扰动能量的条件下减轻计算代价。

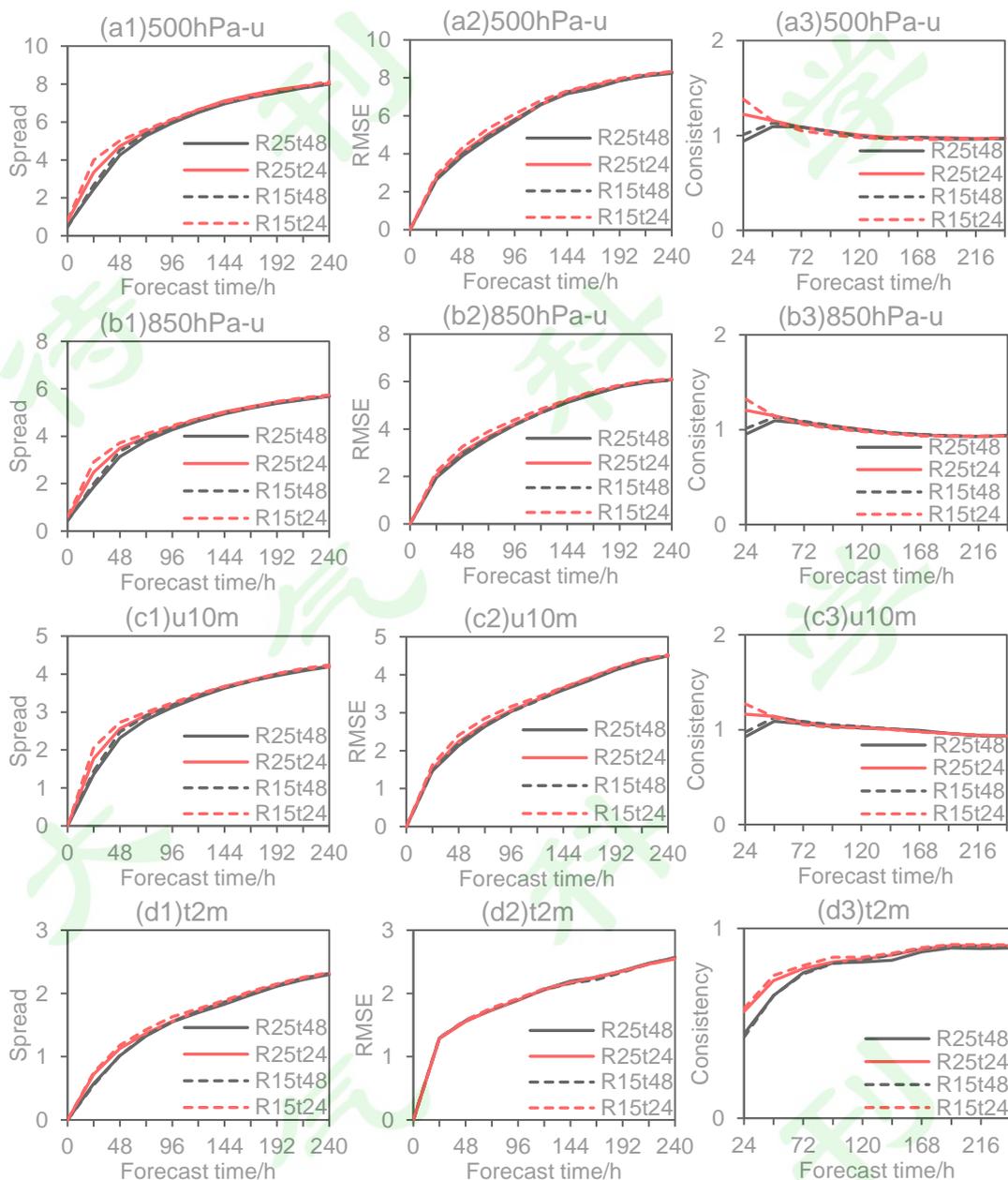
261

## 262 4.2 集合预报要素评分

### 263 4.2.1 集合离散度、均方根误差及集合一致性

264 图 5 为四组试验不同变量的离散度(Spread)和均方根误差(Root mean square  
265 error, RMSE)随时间的变化,左列为离散度,中间列为均方根误差,由图可见,  
266 OTI 较短的两组试验(R15t24 和 R25t24)的离散度在预报的 0-96h 有明显提升,其  
267 余时次各组试验各个变量离散度大体相当。而在同一 OTI 下,提高 SVs 水平分  
268 辨率也能使得离散度在前期有所增加。这与 Walser et al.(2006)对 Moist SVs 的分  
269 析一致,即提高时空尺度后的 Moist SVs 能够在预报的初始阶段提供较好的离散  
270 度。图 5(d1)中可以看到 R15t24 中 2m 温度(T2m)的离散度在整个预报时次都  
271 有所增长。从均方根误差来看,R15t24 的均方根误差在 24-120h 有增加,除 R15t24  
272 以外的三组试验中各变量的 RMSE 差异不大,说明提高 SVs 水平分辨率和缩短  
273 OTI 对于集合预报 RMSE 来说并非绝对的正效益。集合一致性(Consistency)则  
274 指的是离散度与均方根误差的比值,集合离散度是否与均方根误差大致相当是衡  
275 量一个集合预报系统好坏的标准,一致性越接近于 1,预报效果越好。从右列集  
276 合预报一致性检验可见,评分的主要差异体现在预报的前 48h。OTI 为 24h(R15t24

277 和 R25t24)的 Moist SVs 形成的集合预报的一致性在 48h 内明显提高了,且 R15t24  
 278 和 R25t24 对 T2m 改进的效果比其他变量更明显。



279

280 图 5 离散度(左列)、均方根误差(中间列)以及集合一致性(右列)随时间的变化

281 Fig.5 The spread (left column), root mean square error (RMSE) (middle column), and

282 consistency (right column) over time

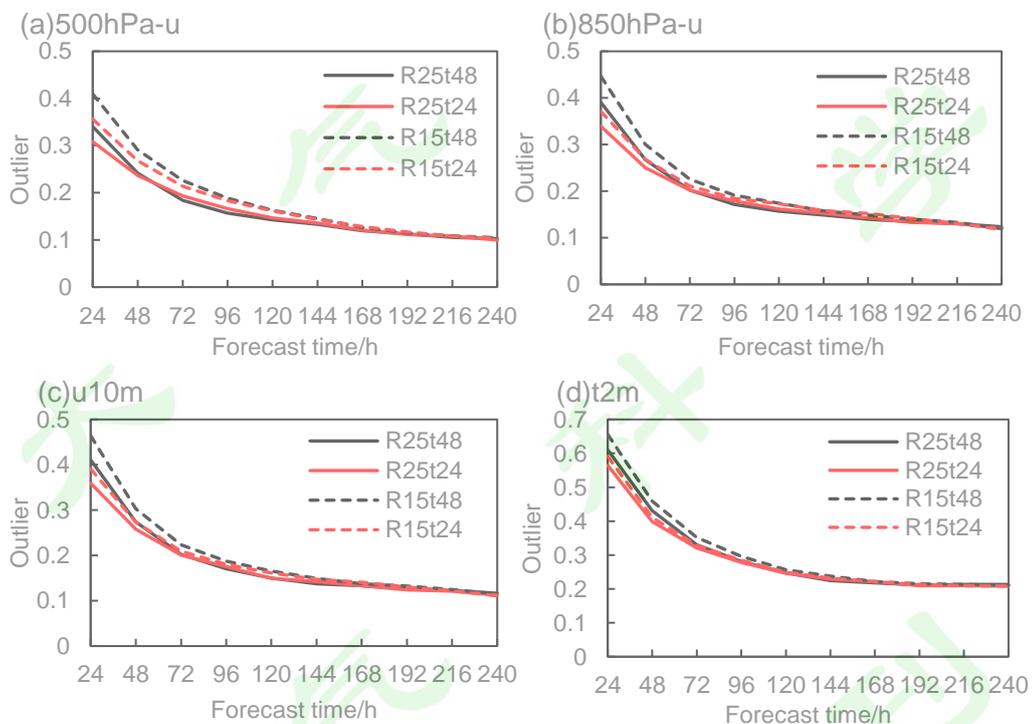
283

284 4.2.2 集合预报 outlier 评分

285 图 6 为四组试验的 outlier 评分,其值越小,说明集合预报结果越可靠,概率  
 286 预报越准确。由图可见,四组试验的 outlier 值随预报时间都呈减小趋势,但相

287 比而言, OTI 为 24h 的 Moist SVs 集合预报结果 (R25t24,R15t24) 具有更小的  
288 outlier 值, 这种优势在预报的前 48h 表现得尤为明显。综合上一节的分析结果,  
289 R25t24 和 R15t24 两组试验的初期离散度增加的同时 outlier 值减小, 说明集成成  
290 员间更加发散且观测能够更大概率落在集合成员之间。提高 SVs 计算分辨率后,  
291 在预报的前 48h 内, R15t24 的 outlier 评分略逊于 R25t24, 但仍然优于 OTI 为 48h  
292 的 R25t48 和 R15t48。低层变量 outlier 评分差异较小, 高层变量 outlier 评分差异  
293 较大。

294 以上的分析说明了 Moist SVs 需要的 OTI 更短, 这与 Coutinho et al. (2004)  
295 及 Hoskins and Coutinho (2005) 等的分析一致。然而, 从全球集合预报的角度来  
296 看, 提高 SV 计算水平分辨率并不一定能有效提高集合预报 outlier 评分。



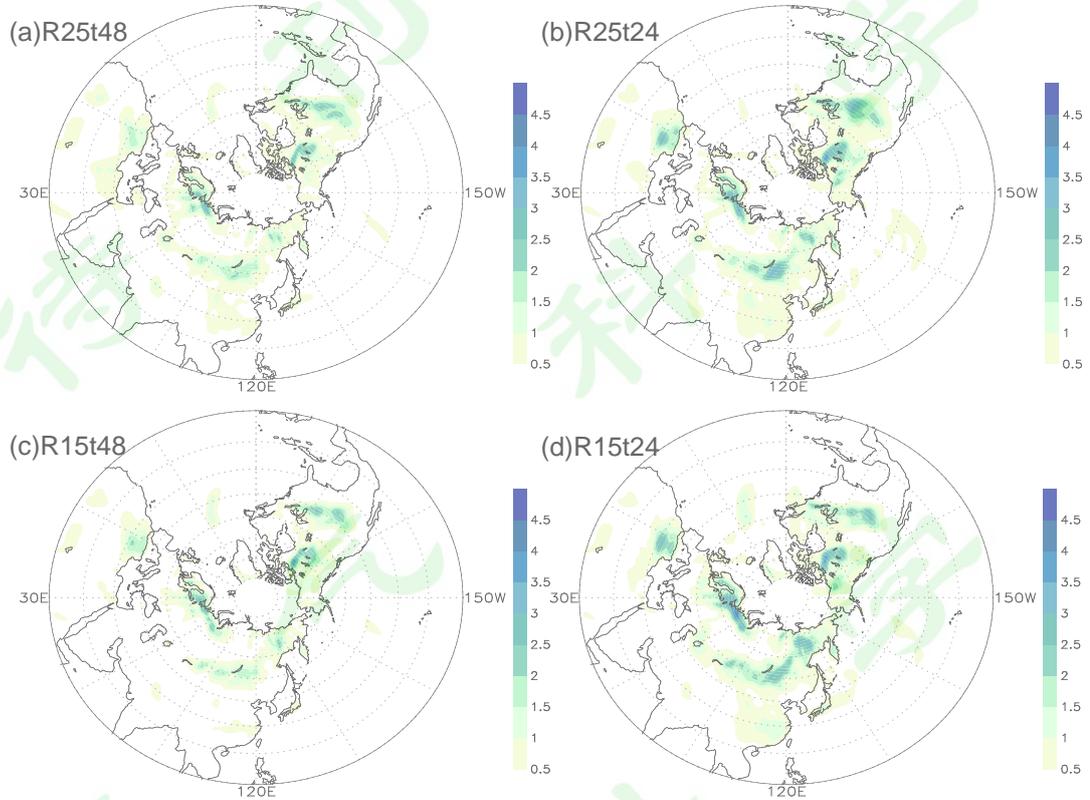
297  
298 图 6 集合预报 outlier 评分

299 Fig.6 Outlier scores of the ensemble forecast

300  
301 4.2.3 2m 温度的离散度空间分布

302 图 7 给出了为四组试验北半球 24h 预报的 T2m 的离散度空间分布。由图可  
303 见四组试验集合离散度较大的区域主要在陆地。相比而言, OTI 较短的 R25t24  
304 和 R15t24 形成 T2m 集合预报的离散度大于 R25t48 和 R15t48, 说明 OTI 较短的

305 两组试验的集合预报在低层变量上有较大的离散度。将 Moist SVs 的水平分辨率  
306 提高之后，R15t24 的 2 米温度的离散度相比于 R25t24 进一步增大。这说明对于  
307 低层变量而言，缩短 OTI 和提高水平分辨率都有利于离散度的增加。。



308

309

图 7 北半球 2m 温度的集合离散度(填色图)水平分布(单位: °C)

310

Fig.7 Horizontal distribution of the spread (shaded) of 2m temperature in the Northern

311

Hemisphere(unit: °C)

312

### 4. 3. 降水集合预报

313

#### 4. 3. 1 降水概率

314

5 月 4 日-5 日在中国华南地区有一次降水过程 (图 8 (a)), 主要降水位于广

315

东东部、福建西南部地区, 出现了 50mm 暴雨量级的降水, 甚至个别站点降水达

316

到 100mm 以上。4 组试验初始日期为 5 月 1 日 12UTC, 分析其对 5 月 4 日 (即

317

96h 预报) 24 小时累计降水的概率预报结果, 图 8 (b-e) 为 4 组试验降水量级大

318

于 25mm 的降水概率, 由图可见, 四组试验对这次降水过程都有体现, 只是在降

319

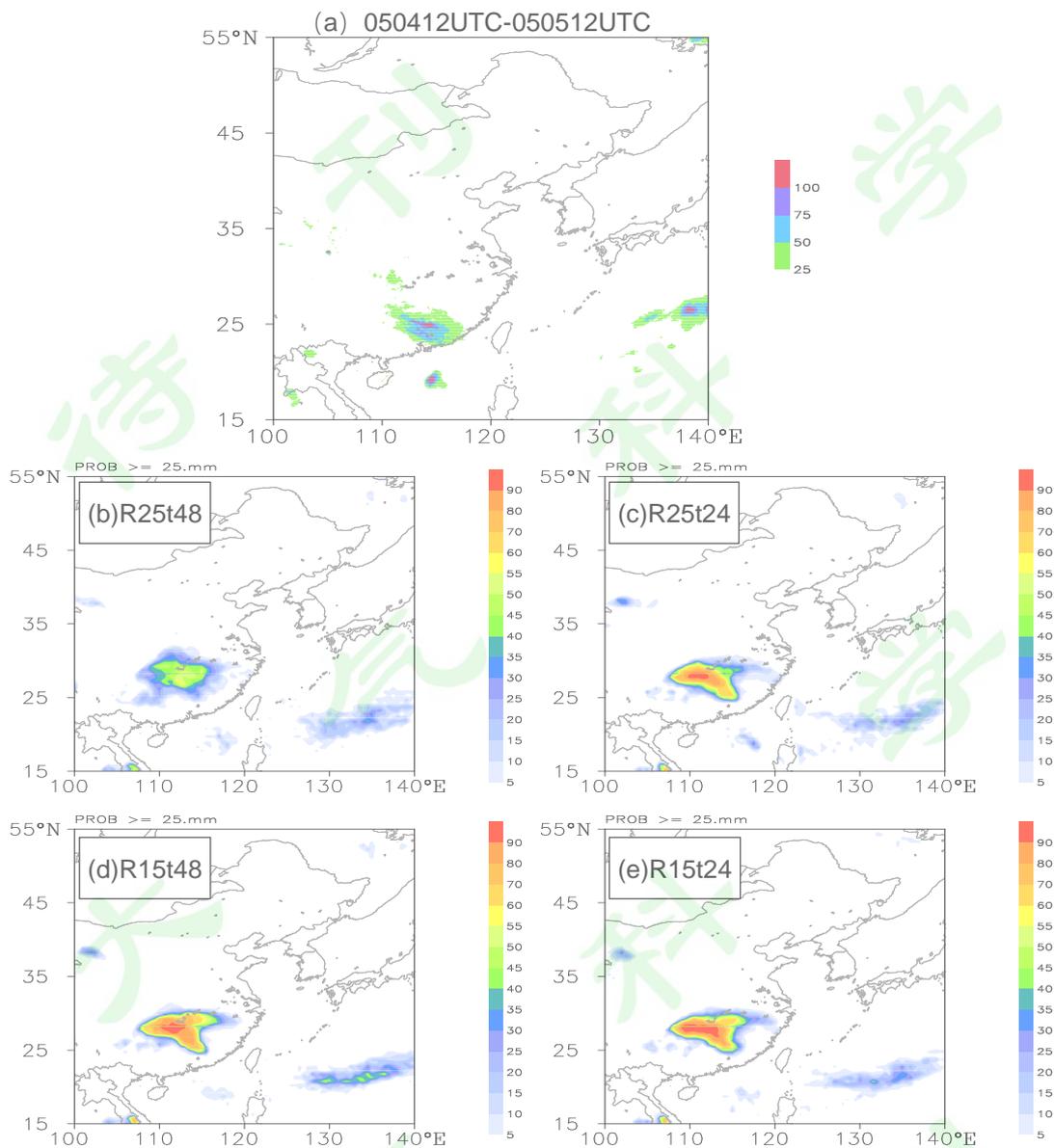
水落区上稍有偏北, R25t48 的降水概率较小, 而其余几组试验的降水概率都有所

320

增加, R15t24 的降水概率大值区的分布大于 R25t24 和 R15t48。说明提高 Moist

321

SVs 的水平分辨率和缩短 OTI 之后所构造的扰动初值能够形成更好的降水概率



323

324 图8 5月4日-5日24小时累计降水实况(a)(单位: mm)及大于25mm量级降水的概率预报  
325 (b-e)(单位: %)

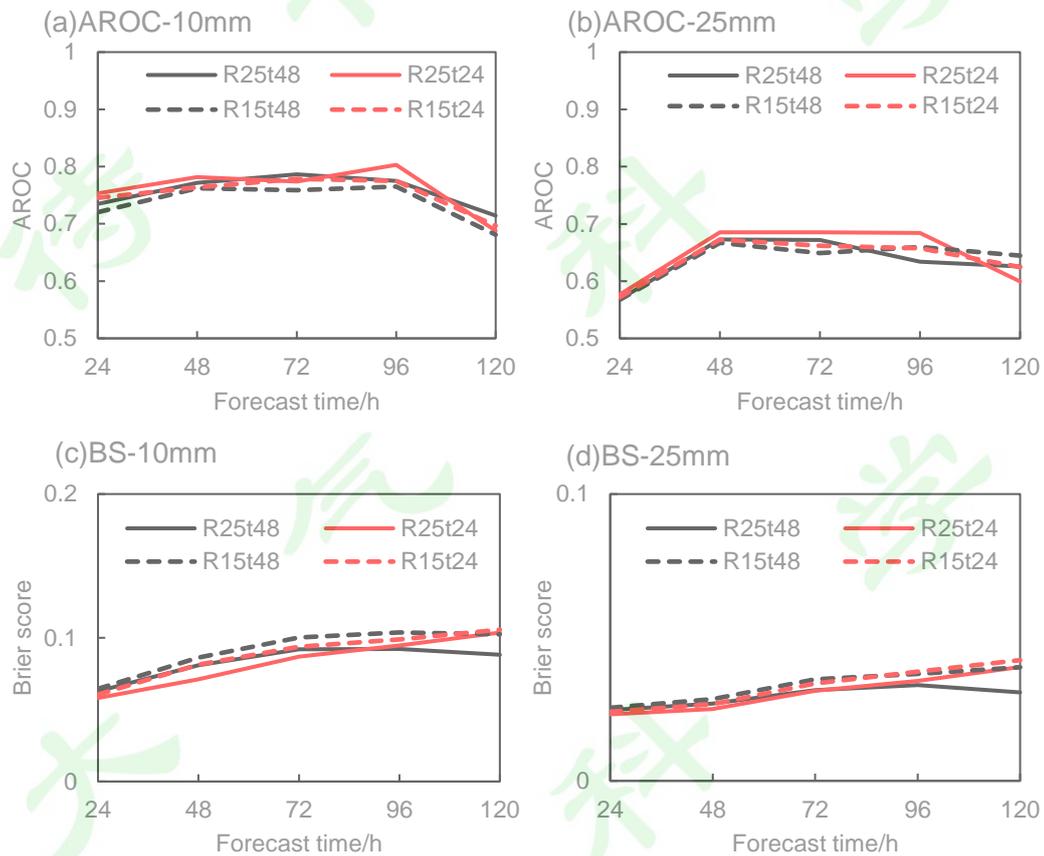
326 Fig.8 24-hour cumulative precipitation from 12UTC on May 4 to May 5, (a)observation (unit:  
327 mm),(b-e) the probability forecast of precipitation greater than 25mm(unit:%)

328

### 329 4.3.2 降水评分

330 分级降水集合预报相对作用曲线面积(Area under the relative operating  
331 characteristic curve, AROC)的评分越接近于1越好, 由图9(a)(b)可见, 在预报的  
332 24-96h内, 对于小雨到中雨量级的降水而言, OTI为24h的R25t24和R15t24的

333 AROC 评分基本上都高于 OTI 为 48h 的 R25t48（72h 除外）和 R15t48，但提高  
 334 水平分辨率反而使降水评分降低了。Brier Score 评分越小越好，由图 9(c)(d)可见  
 335 R25t24 在 24-96 小时小雨到中雨量级的降水评分是最好的，同一分辨率下，OTI  
 336 越短评分越好，但是提高水平分辨率并未能提升小雨到中雨量级的降水评分。



337  
 338 图 9 AROC 降水评分(a,b)及 Brier Scores 降水评分(c,d)

339 Fig.9 AROC scores (a,b)and Brier Scores (c,d)

340 **5 结论**

341 本文基于中国气象局数值预报中心自主研发的 GRAPES-GEPS，针对引入湿  
 342 线性物理过程后的 Moist SVs，开展了时空尺度敏感性试验，从能量模、能量谱、  
 343 空间分布等方面分析不同时空尺度下 Moist SVs 特征，并从集合预报的角度（等  
 344 压面变量评分、降水评分，降水概率预报等）评估不同参数设置下集合预报的效  
 345 果。结论如下：

346 从 SVs 结构变化的角度来看，提高 Moist SVs 计算的分辨率可使其具有较大  
 347 的增长率，且可以产生新的 SVs 结构，这种结构分布在中纬度斜压不稳定的区

348 域。不同 OTI 下初始 Moist SVs 相似性较低，结构差异较大。OTI 为 24h 和 48h  
349 试验从初始时刻到最终演化时刻有向上传播的趋势，且 OTI 为 48h 的试验还出  
350 现了能量下传。从能量谱的角度来看，采用较短的 OTI 可以在中尺度范围产生较  
351 大 SVs 扰动。

352 进一步从集合预报的效果来评估，结果表明提高 Moist SVs 的水平分辨率和  
353 缩短 OTI 之后所构造的扰动初值能够提高近地面要素短期预报的离散度，并形成  
354 更好的降水概率预报结果，然而仅提高 Moist SVs 的水平分辨率并不一定能够  
355 改善等压面变量集合预报 outlier 评分。同一水平分辨率下，OTI 越短降水评分越  
356 好。从计算效率的角度上看，提高 SVs 计算的水平分辨率会增加计算负担，而缩  
357 短 OTI 能够减轻计算代价。

358 但需要指出的是，本文基于 5 天的试验分析了不同时空尺度设置下 Moist SVs  
359 的特征及集合预报结果，由于全球切线性伴随模式计算量较大，本文在 SVs 水平  
360 分辨率上仅设计了  $2.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  两组对比试验，没有进行更精细化尺度的对比分析。  
361 通过分析可知，Moist SVs 对于中小尺度短临天气系统能够有较好的指示意义，  
362 因此，下一步研究可以通过提高区域模式水平分辨率计算 Moist SVs，并分析其  
363 对于高影响天气过程集合预报的效果。

364

365 参考文献:

- 366 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, 17(6):  
367 773-777. Chen Dehui, Shen Xueshun. 2006. Recent progress on GRAPES research and  
368 application [J]. J Appl Meteor Sci (in Chinese), 17(6):773-777. doi:10.11898/1001-  
369 7313.20060614
- 370 霍振华, 刘永柱, 陈静, 等. 2020. 热带气旋奇异向量在 GRAPES 全球集合预报中的初步应  
371 用 [J]. 气象学报, 78 (1): 48-59. Huo Zhenhua, Liu Yongzhu, Chen Jing, et al. 2020. The  
372 preliminary application of tropical cyclone targeted singular vectors in the GRAPES global  
373 ensemble forecasts [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese) , 78(1):48-59.  
374 doi:10.11676/qxxb2020.006
- 375 刘永柱, 沈学顺, 李晓莉. 2013. 基于总能量模的 GRAPES 全球模式奇异向量扰动研究 [J].  
376 气象学报, 71(3): 517-526. Liu Yongzhu, Shen Xueshun, Li Xiaoli. 2013. Research on the  
377 singular vector perturbation of GRAPES global model based on total energy norm [J]. Acta  
378 Meteor. Sinica. (in Chinese), 71(3):517-526. doi:10.11676/qxxb2013.043
- 379 刘永柱, 张林, 金之雁. 2017. GRAPES 全球切线性和伴随模式的调优 [J].应用气象学报,  
380 28(1): 62-71. Liu Yongzhu, Zhang Lin, Jin Zhiyan. 2017. The Optimization of GRAPES  
381 Global Tangent Linear Model and Adjoint Model [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(1):  
382 62-71. doi:10.11898/1001-7313.20170106
- 383 刘永柱, 龚建东, 张林, 等. 2019. 线性化物理过程对 GRAPES-4DVAR 同化的影响 [J].气象  
384 学报, 77(2):196-209. Liu Yongzhu, Gong Jiandong, Zhang Lin, et al. 2019. Influence of  
385 linearized physical processes on the GRAPES-4DVAR [J]. Acta Meteor. Sinica. (in  
386 Chinese), 77(2):196-209. doi:10.11676/qxxb2019.013

387 李晓莉,刘永柱. 2019. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析 [J].气象学报, 77(03):552-  
388 562. Li Xiaoli, Liu Yongzhu. 2019. The improvement of GRAPES global extratropical singular  
389 vectors and experimental study [J]. Acta Meteor. Sinica. (in Chinese),77(3):552-562 ,  
390 doi:10.11676/qxxb2019.020

391 李晓莉, 陈静, 刘永柱, 等. 2019. 全球集合预报初始条件及模式物理过程不确定性方法研究  
392 [J]. 大气科学学报, 42(3):348-359. Li Xiaoli, Chen Jing, Liu Yongzhu, et al. 2019.  
393 Representation of initial uncertainty and model uncertainty of GRAPES global ensemble  
394 forecasting [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese) , 42(3):348-359.  
395 doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2019031801.

396 薛纪善,陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用 [M].北京: 科学出版社,1-  
397 383. Xue Jishan, Chen Dehui. 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction  
398 System GRAPES [M]. Beijing: Science Press (in Chinese),1-383.

399 叶璐, 刘永柱, 陈静, 等. 2020. 集合预报多尺度奇异向量初值扰动方法研究 [J].气象学报,  
400 78 (4): 648-664. Ye Lu, Liu Yongzhu, Chen Jing, et al. 2020. A study on multi-scale singular  
401 vector initial perturbation method for ensemble prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in  
402 Chinese),78 (4): 648-664. doi:10.11676/qxxb2020.042

403 Buizza R. 1994.Sensitivity of optimal unstable structures [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc,120: 429-  
404 51. doi:10.1002/qj.49712051609

405 Buizza R, Palmer T N. 1995.The singular vector structure of the atmospheric global circulation [J].  
406 J. Atmos. Sci,52(9): 1434-1456. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2

407 Buizza R, Palmer T N. 1998. Impact of Ensemble Size on Ensemble Prediction. [J]. Mon. Weather  
408 Rev., 126: 2503–2518. doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<2503:IOESOE>2.0.CO;2

409 Buizza R, Miller M J, Palmer T N. 1999.Stochastic simulation of model uncertainties in the  
410 ECMWF Ensemble Prediction System [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125: 2887–908.  
411 doi:10.1175/1520-0469(1999)056<2965:TOUSV>2.0.CO;2

412 Coutinho M M, Hoskins B J, Buizza R. 2004. The influence of physical processes on extratropical  
413 singular vectors [J]. J. Atmos. Sci., 61: 195–209. doi:10.1175/1520-0469(2004)0612.0.CO;2

414 Diaconescu E P, Laprise R. 2012. Singular vectors in atmospheric sciences: A review [J]. Earth-

415 Sci Rev,113(3-4):161-175. doi:10.1016/j.earscirev.2012.05.005

416 Hoskins B J, Coutinho M M, 2005. Moist singular vectors and the predictability of some high impact  
417 European cyclones [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 581–601. doi:10.1256/qj.04.48

418 Komori T, Kadowaki, T. 2010. Resolution dependence of singular vectors computed for typhoon  
419 SINLAKU [J]. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)* 6,045–048. doi:  
420 10.2151/sola.2010-012

421 Lorenz E N, 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J]. *Tellus*, 17,  
422 321–333. doi: 10.3402/tellusa.v17i3.9076

423 Molteni F, Palmer T N, 1993. Predictability and finite-time instability of the northern winter  
424 circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119,269–298. doi: 10.1002/qj.49711951004

425 Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996.The new ECMWF ensemble prediction system:  
426 methodology and validation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 73-119.  
427 doi:10.1002/qj.49712252905

428 Palmer T N, Molteni F, Mureau R, et al. 1993. Ensemble Prediction [C]. *Proceedings of the ECMWF*  
429 *Seminar on Validation of Model over Europe*. Reading, UK: shinfield Park,21-66

430 Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics and adaptive observations  
431 [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55, 633–653. doi:10.1175/1520-  
432 0469(1998)055<0633:SVMAAO>2.0.CO;2

433 Palmer T N, Buizza R, Leutbecher M, et al. 2007. The ensemble prediction system – recent and  
434 ongoing developments [C]. *ECMWF Technical Memoranda*. No. 540.

435 Puri K, Barkmeijer J, Palmer T N, 2001. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted  
436 diabatic singular vectors [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 709–731.  
437 doi:10.1002/qj.49712757222

438 Tompkins A M, Janisková M. 2004. A cloud scheme for data assimilation: Description and initial  
439 tests. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,130(603):2495-2517. doi:10.1256/qj.03.162

440 Walser A, Arpagaus M, Appenzeller C, et al. 2006. The Impact of Moist Singular Vectors and  
441 Horizontal Resolution on Short-Range Limited-Area Ensemble Forecasts for Two European  
442 Winter Storms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2877–2887, doi:10.1175/MWR3210.1

443 Wang J, Wang B, Liu J J, et al. 2020. Application and Characteristic Analysis of the Moist Singular  
444 Vector in GRAPES-GEPS [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(11), 1164–1178. doi: 10.1007/s00376-020-

445 0092-9

446 Zadra A, Buehner M, Laroche S, et al. 2004. Impact of the GEM model simplified physics on

447 extratropical singular vectors [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 2541–2569.

448 doi:10.1256/qj.03.208

449