1 随机物理过程扰动方案在克拉玛依区域集合预报中的应用研究 2 3 史永强1,张涵斌2*,刘郁珏2,张歆然3 4 1 克拉玛依市气象局,克拉玛依,010051 5 2 北京城市气象研究院,北京,100089 6 北京英视睿达科技股份有限公司,北京,10007 3 7 摘要: 克拉玛依气象局研发了区域集合预报系统并已实现业务运行,该系统仅采用了集合变换卡尔曼滤波 8 (ETKF)初值扰动,导致离散度发展受到限制,为改善区域集合预报的离散度,本文尝试在初值扰动基础上 9 引入随机物理过程倾向(SPPT)模式扰动方案。本文首先开展了 SPPT 方案关键参数的敏感性试验,确定了 10 适用于本系统的参数设置,构建了初值-物理过程扰动方案(ETKF-SPPT),并与仅采用初值扰动的集合方案 11 (ETKF)进行了对比,结果表明: ETKF 初值扰动方法能够产生具有动力学结构的初值扰动,但是随着预报 12 时效的延长,集合整体离散度增长很快达到饱和,并在侧边界约束下逐渐减小; ETKF 初值扰动结合 SPPT 13 模式扰动可使集合离散度在各个预报时效均保持增长状态:集合预报检验结果表明,仅采用 ETKF 初值扰 14 动的集合预报概率分布可靠性较低,概率预报准确性也较差;ETKF-SPPT 方法可获得更好的概率预报结果, 15 可靠性更好,均方根误差更低。对克拉玛依城区一次大风预报个例表明, ETKF 方案对大风起风时间和量 16 级把握较差,而 ETKF-SPPT 可以增加集合离散度,起风时间和风速预报更准确 ,增加 SPPT 扰 17 动可以有效改善克拉玛依区域集合预报系统的预报技巧。 18 关键词 集合预报,初值扰动,模式扰动,随机物理过程倾向 19 Study on the application of Stochastic Perturbed Physics Tendency 20 perturbation in Regional Ensemble Prediction System of Kelamay 21 22 SHI Yongqiang¹, ZHANG Hanbin²,LIU Yujue², ZHANG Xinran³ 23 1 Kelamayi Meteorological Bureau, Kelamayi 934000 24 2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089 25 3 Insights Value, Beijing 100070 26 27 28 Abstract: At present, a Regional Ensemble Prediction System has been developed by Kelamayi Meteorological 29 Bureau. The system has only adopted initial condition perturbation of Ensemble Transform Kalman Filter(ETKF), 30 and the system is lack of spread. In order to improve the skill of this Ensemble Prediction System, the model 31 perturbation method of Stochastic Physics Parameterization Tendency(SPPT) is adopted and tested. This paper 32 conducted sensitivity test on critical parameter of SPPT and parameter setting of SPPT is determined. Ensemble

资助项目 国家重点研发计划(批准号 2021YFC3000901);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2020J005)

33 forecast experiment test is conducted and compared for both ETKF scheme and ETKF-SPPT scheme. The results 34 show that the ETKF method can generate initial condition perturbation with dynamic structure, but the spread will 35 saturated within short forecast lead time and will decrease due to the constraint of identical LBC for all members. 36 With SPPT model perturbation method adopted, the ensemble spread can significantly improved. Ensemble 37 verification scores indicate that the reliability of ETKF without model perturbation is small, and the root mean 38 square error(RMSE) is relatively large, while add model perturbation to initial condition perturbation will improve 39 the probabilistic forecast skill with larger forecast reliability and smaller(RMSE) . The results of gale forecast 40 show that the adoption of model perturbation method can significantly improve the ensemble forecast that it has 41 more accurate forecast on the magnitude and time period of local gale.

42 Keywords: Ensemble Prediction System, Initial Condition Perturbation, Model perturbation, Stochastic Physics
 43 Parameterization Tendency

44

45 1引言

强天气现象具有很强的突发性和局地性,其发生发展的动力和热力机制极为 46 复杂,尤其是复杂地形区域的极端降水、低温、大风等极端天气事件预报不确定 47 性较大,导致目前的区域数值预报对此类天气现象的准确性较低(任福民等, 48 2014),因此针对此类强天气的预报技术亟待发展。提高模式分辨率可使得数值 49 模式对此类复杂地区区的强天气进行精细刻画,如使用高分辨大涡模拟技术能够 50 更好的模拟出山地区域局地环流(Xue et al., 2020), 但是考虑到局地强天气的预报 51 不确定性,需要进一步发展集合概率预报技术(Epstein, 1969; Leith, 1974, 陈 52 静等,2005)来提高极端强天气预报的准确率(Zhang et al., 2022)。 53

集合预报扰动技术是集合预报研究的一个难点,对于区域集合预报,需要考 54 虑初值、模式以及侧边界等多源不确定性。集合预报初值扰动方法首先在全球集 55 合预报开始应用,到目前已获得了较大发展并形成了一系列典型的扰动技术,如 56 增长模繁殖法(Breeding Growing Mode, 简称 BGM, Toth and Kalney, 1993; 1997), 57 奇异向量法(SVs, Molteni et al., 1996)以及集合变换卡尔曼滤波法 (Ensemble 58 59 Transform Kalman Filter, ETKF, Wang and Bishop, 2003; Bowler et al., 2008)等, 此类方法也有效地沿用到了区域集合预报中(Stensrud et al., 1994; 1999; Du et al., 60 2003; Walser et al., 2006; Bishop et al., 2009; Bojarova et al., 2011). 61

62 除了初值影响以外,数值预报不准确很大程度上是模式不确定性导致的,发
63 展能够有效代表模式不确定性的扰动方法,是区域集合预报的研究重点之一(关
64 吉平和张立凤,2009;王璐和沈学顺,2019)。在中尺度环流的发展过程中,次
65 网格物理过程对于描述相态转换、动量交换、对流触发等起到十分重要的作用
66 (Stensrud and Fritsch,1994;陈静等,2005),因此目前的模式扰动技术主要针对
67 次网格物理过程开展,常用的模式扰动方法包括:1)对不同物理过程选项进行随
68 机组合 (Houtekamer et al., 1996; Stensrud et al, 2000); 2)在模式参数化方案中

69 加入随机强迫来体现次网格物理过程的不确定性,如随机物理过程倾向方案 (Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT; Buizza et al., 1999; 70 Lin and Neelin, 2000; Li et al.2008, 任志杰等, 2011; 谭宁等, 2013)、随机动 71 能后向散射方法(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB)(Shutts, 2005; 72 Berner et al., 2009; Berner et al., 2011; Bowler et al., 2009); 3)针对特定物理过 73 74 程的随机参数进行扰动(Stochastically Perturbed Parameterization, SPP)(Bowler et al., 2009; 徐致真等, 2019)。其中 SPPT 方法由于理论基础较科学且易于实现, 75 76 在集合预报中应用较为广泛(Buizza et al. 1999)。

77 SPPT 方法自提出以来在国内外开展了一系列的改进研究,如 Li et al. (2008) 基于一阶自回归模式随机型(Lin and Neelin, 2000)进行空间球谐函数展开和傅立 78 叶展开,发展了时空相关的 SPPT 随机扰动方案; Palmer et al. (2009)对 ECMWF 79 集合预报系统中的 SPPT 随机扰动型进行了更新,构建了单变量的高斯分布随机 80 81 扰动型,并通过谱展开使随机型在时空上更连续。对于 SPPT 的应用也从全球集 合扩展至区域集合以及对流尺度集合预报中,如最初该方法于1998年在ECMWF 82 业务全球集合预报系统中获得应用,且表明该方法可有效增加集合离散度并降低 83 84 均方根误差 (Buizza et al., 1999); 中国气象局地球系统数值预报中心最早基于 T213 全球集合预报开展了 SPPT 的应用,表明该方案可有效体现全球集合预报 85 中的模式不确定性,并提高集合离散度(任志杰等, 2011; 谭宁等, 2013); 中国 86 气象局地球系统数值预报中心进一步基于 CMA-Meso 模式开展了 SPPT 相关工 87 作并应用于 CMA 区域集合预报系统中,改进了预报技巧(袁月等, 2016; 陈静 88 和李晓莉, 2020)。有学者尝试在更高分辨率的集合预报系统中应用 SPPT 技术, 89 如李俊等(2015) 在对流尺度集合预报中开展了 SPPT 试验,结果表明 SPPT 方案 90 对降水量级改变较大,但对降水落区的改善有限; 闵锦忠等(2018)基于风暴尺度 91 92 集合预报对江淮流域一次强降水过程探讨了 SPPT 的作用, 表明天气系统的维持 时间与失相关时间尺度关系密切,而天气过程及模式分辨率受失相关空间尺度影 93 响较大; 王明欢等(2021)研究了 SPPT 方案在西部山地对流尺度集合预报中的应 94 用效果,探索了适用于该系统的 SPPT 参数。综合国内外的研究表明 SPPT 的引 95 入会对集合预报产生正效果,但也需要针对自身系统特点对 SPPT 的相关参数进 96 97 行设置(Qiao et al, 2018; Lupo et al, 2020)。

98 克拉玛依地处准噶尔盆地西北边缘,西有加依尔山,中部、东部为平坦戈壁,
99 其城区主要受背风坡的强下坡风影响,使得大风成为该地区主要气象灾害之一
100 (孙东霞等,2008;辛渝等,2015)。目前克拉玛依气象局业务运行的区域集合预
101 报系统为当地提供了有效的业务支撑,但由于系统仅采用 ETKF (Wang and
102 Bishop,2003)初值扰动方案,导致集合成员之间的发散度不够,对极端大风预报

103 的把握能力欠佳。本文尝试针对该集合预报系统进一步增加扰动源,引入 SPPT
104 扰动方法,探索适用于克拉玛依区域集合预报的 SPPT 参数,以期进一步提高集
105 合预报技巧。本研究不仅对克拉玛依区域集合预报的发展具有重要意义,也可为
106 业务集合预报构建提供新方法新思路,具有较好的应用前景。

107

108 2 资料与方法

109 2.1 克拉玛依区域集合预报系统简介

克拉玛依气象局发展的中尺度区域集合预报系统为日常业务预报工作提供 110 了重要参考,该系统采用 WRF (The Weather Research and Forecasting Model)中尺 111 度模式 V4.1.2 版,模式区域设置为水平分辨率 15km,模拟区域范围共 239×180 112 个格点,覆盖中亚及新疆大部分区域(如图1),垂直层次为57层模式面,模式层 113 顶为 50 hPa。该系统 21 个集合成员,每天从 00:00 UTC 和 12:00 UTC 起报两 114 次,预报时效 36h。所有成员物理过程参数化方案设置为 Thompson 微物理方案, 115 YSU(Yonsei University) 边界层方案以及 RRTMG(The Rapid Radiative Transfer 116 117 Model for GCMs)长短波辐射方案,积云对流方案为 KF(Kain-Fritsch)方案。

118 目前该系统采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental
119 Prediction, NCEP)全球预报资料(Global Forecast System, GFS)作为驱动场,为该
120 集合预报系统提供侧边界条件。初值扰动采用ETKF 初值扰动方案生成(Wang and
121 Bishop, 2003), ETKF 扰动循环间隔为 12h,即ETKF 每天 2 次生成初值扰动进
122 行预报。



136

137

右边两项为动力积分过程倾向和物理过程倾向, x 为不同变量

$$x \in \{u, v, T, q\}$$

(1)

SPPT 方案对不同变量采用相同的随机型 r(x, y, t) 进行扰动,随机型相 139 同可有效避免不同变量计算不协调导致溢出。随机扰动场 r(x, y, t) 是一个具 140 有时空相关性,取值范围[-1,1]的高斯随机函数。 141

142 将随机场 r (x, y, t) 进行二维傅里叶展开可得:

143
$$r(x, y, t) = \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=-L/2}^{L/2} r_{k,l}(t) e^{2\pi i (kx/X + ly/Y)}$$
(3)

144 其中 K, L 分别为纬向和径向波数, t 为积分时间, e^{2πi(kx/X+hy/Y)}是由在 0<x<X
145 和 0<y<Y 区域内(其中 X 和 Y 分别为模式区域的纬向长度和经向长度)的正交基函
146 数构成的傅里叶模; ^r_{k,l}(t) 为傅里叶谱系数, 满足一阶自回归过程:

147
$$r_{k,l}(t + \Delta t) = (1 - \alpha)r_{k,l}(t) + g_{k,l}\varepsilon_{k,l}(t)$$
(4)

148 其中(1-α)为线性回归参数, g_{k,l}为扰动振幅, ε_{k,l}(t)为复值高斯噪声过程。
 149 对于扰动振幅 g_{k,l}的计算,根据王明欢等(2021),其具有空间自相关特征且

150 受谱空间每个格点的标准差影响,格点标准差越大,扰动振幅g_{k1}越大。

151 综合以上可知随机型 r (x, y, t)与时间和空间相关且扰动振幅可调,因此
152 SPPT 扰动随机场主要由失相关时间尺度,失相关空间尺度以及格点标准差决定。
153 较大/较小的失相关时间尺度表示随机型的变化频率较慢/较快;较大/较小的失相
154 关空间表示随机型的水平空间尺度较大/较小;较大/较小的格点标准差表示扰动
155 振幅较大/较小。

156 2.3 试验方案设计
157 SPPT 随机物理过程扰动方案涉及到多个可调参数, 因此需要开展相关敏感

158 试验,确定所产生的模式随机扰动对不同参数的敏感性,探索适用于克拉玛依区
159 域集合预报系统的扰动参数。从 SPPT 方案中三个关键参数入手:失相关时间尺
160 度,失相关空间尺度,格点标准差。WRF 模式中给出了一组参数默认值,即失
161 相关时间尺度 6h,失相关空间尺度 150km,格点标准差 0.5,敏感性试验即可针
162 对默认值进行增减,表 1 给出了无 SPPT 方案的控制试验(CTRL)以及 SPPT 敏感
163 性试验的配置,其中 P6-150-0.5 即为默认参数方案,其它方案均在其基础上对参
164 数进行增减试验。

165

表 1 SPPT 引入单模式预报敏感试验方案配置

166

Table 1 configuration of SPPT method of single model sensitivity forecast

方案	失相关时间尺度(h)	失相关空间尺度	格点标准差
		(m)	
CTRL	/	/	/

P6-150-0.5	6	150000	0.5
P1-150-0.5	1	150000	0.5
P9-150-0.5	9	150000	0.5
P6-50-0.5	6	50000	0.5
P6-300-0.5	6	300000	0.5
P6-150-0.2	6	150000	0.2
P6-150-0.52	6	150000	0.55

167

168 通过 SPPT 敏感试验获得适用于克拉玛依区域集合预报系统的 SPPT 参数后,
169 基于该集合预报系统设计了两种试验方案,方案一仅采用 ETKF 初值扰动并作为
170 参照试验,称为 ETKF 方案,方案二采用 ETKF 初值扰动与 SPPT 相结合的方案,
171 称为 ETKF-SPPT 方案。两组试验设置见表 2,试验时段选取 2021 年 2 月 14 日
172 ~2021 年 3 月 15 日连续一个月,试验时段内每组试验每天进行两次起报(00、
12UTC),每次起报预报时效为 36h。其中 2021 年 2 月 25 日在克拉玛依城区发生
174 了强大风过程,作为批量试验中的重点分析个例。



178

179 2.3 试验数据

180 本文集合预报背景场和侧边界条件来自NCEP-GFS全球分析场和预报场,水

181 平分辨率为0.5°×0.5°,该资料每天0000、0012 UTC获取2次,预报间隔6h。

182 本文中高空和地面要素检验采用全国探空和地面观测站。

183 3 试验结果分析

184 **3.1 SPPT** 参数敏感试验

185 首先对不同参数设置下SPPT敏感试验的效果进行分析,定义均方根离差为各186 敏感试验与未加SPPT扰动的控制试验的差异,即

187
$$RMS_difference = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{my} \sum_{i=1}^{mx} \left(F_{ij}^{SPPT} - F_{ij}^{CTRL}\right)^2}{mx \times my}}$$
(5)

其中 mx 和 my 分别为模式二维场 x 方向和 y 方向的格点值, F_{ii}^{SPPT} 为 ij 格点 188 处 SPPT 敏感试验预报, F_{ii}^{CTRL} 为 ij 格点处未加 SPPT 扰动的控制预报。图 2 给 189 出了不同参数设置下 SPPT 试验与控制试验的离差的演变,以评估扰动增长对不 190 191 同参数的敏感性。由图2首先可以看出所有的扰动试验与控制试验的差异均随着 预报时效的增加而增长,但增长程度也存在明显差异,对于 500hPa 高空要素(图 192 2a-c)而言,所有方案整体的离差在 24h 内均具有增长特征;对于 850hPa 低空要 193 素(图 2d-f)而言,在前 18h 处于增长态势,但 18h 之后不同方案的离差增长达到 194 饱和,说明 SPPT 带来的扰动增长在不同高度效果有所差异。对比不同试验参数 195 设置下的扰动试验可以看出,首先对于格点标准差参数,不管是高空还是低空要 196 素,离差最小的是格点标准差降低到 0.2 的方案,如对于 850hPa 纬向风(U850, 197 图 2d)24h 离差为 0.7m/s,格点标准差 0.55 试验的离差明显增长,24h 离差可达 198 1.5m/s; 对于失相关空间尺度敏感试验对比可以看出,不同要素受空间尺度影响 199 200 程度不同,如 500hPa 纬向风(U500)、500hPa 温度(T500)对于 50km 和 300km 空 间尺度,离差增长差异有限,而对于 850hPa 相对湿度(RH850)和 500hPa 相对湿 201 度(RH500), 300km 空间尺度试验离差增长要弱于 50km 试验: 对于失相关时间 202 尺度敏感试验, 失相关时间尺度 1h 方案其离差增长最差, 如对于 18h 的 U850, 203 失相关时间尺度 1h 试验离差为 0.7m/s, 失相关时间尺度 9h 试验离差为 1.6m/s。 204



207 图 2 不同 SPPT 扰动试验与控制试验的预报均方根离差随预报时效的演变. (a)500hPa 纬向风 208 (U500);(b) 500hPa 温度(T500);(c)500hPa 相对湿度(RH500);(d)850hPa 位势高度(U850);(b) 850hPa 温度 209 (T850); (c)850hPa 相对湿度(RH850); 210 Fig.2 Root Mean Square difference of SPPT perturbation test and control forecast as a function of forecast lead 211 time. (a) Zonal wind at 500hPa;(b) temperature at 500hPa; (c) relative humidity at 850hPa;(d) Zonal wind at 212 850hPa, (b) temperature at 850hPa (c) relative humidity at 850hPa 213 为了进一步说明 SPPT 扰动在不同高度的传播特征,图 3 给出了综合平均 7 214 215 组 SPPT 扰动试验的不同模式面 U 风场均方根离差随预报时效的演变。可以看出 216 不同模式面离差随预报时效的增长特征不同,低层(20层模式面以下)离差增长较 快,而高层增长较慢,整体呈现出由低层向高层的传播特征,主要是由于 SPPT 217 扰动的作用对象是积云对流、微物理过程、边界层过程等物理过程的综合倾向, 218 而这些物理过程在模式低层作用明显;模式中高层主要是动力倾向起作用,受物 219 理过程扰动的影响较为滞后,因此难以快速达到饱和,进而呈现出不断增长特征。 220



 222
 图 3 SPPT 扰动试验与控制试验各模式面纬向风均方根离差随预报时效的演变(单位:m/s).

 223
 Fig.3 Zonal wind Root Mean Square difference of SPPT perturbation test and control forecast at each model level

 224
 as a function of forecast lead time(units:m/s).

221

225 综上所述, SPPT 扰动整体呈现出由低层向高层的传播特征,且大/小的格点
226 标准差利于/不利于离差增长,但是试验过程中也发现如果格点标准差过大会导
227 致计算崩溃,因此通过增加格点标准差来提高集合离散度的前提是保证计算稳定;
228 此外小的失相关空间尺度有利于低空要素尤其是水汽的离散度增长,试验中
229 50km 的失相关空间尺度已接近模式最小可分辨尺度(15km 分辨率可解析的最小)

230 尺度为 30km),因此在本文集合系统中保留 50km 失相关空间尺度的设置;敏感
231 试验中大的失相关时间尺度有利于离散度增长,说明失相关时间尺度不宜过短
232 (即随机强迫型不宜频繁变化),通过进一步试验表明,继续提高失相关时间尺度,
233 其离差并未获得明显改进(图略),说明 9h 的失相关时间尺度已接近饱和状态。
234 因此通过敏感试验,对克拉玛依区域集合预报系统 SPPT 方案关键参数设置为:
235 格点标准差 0.55,失相关空间尺度 50km,失相关时间尺度 9h。

236

241

237 3.2 集合扰动特征分析

238 采用 3.1 确定的 SPPT 参数开展 ETKF 和 ETKF-SPPT 两套集合的对比试验。
239 首先对集合预报扰动特征进行具体分析。对于一个 *M_i* × *M_j* 的二维格点场,我
240 们引入平均绝对扰动:

$$P = \frac{1}{M_i \times M_j} \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left| IC_k^{ij} - IC_{ctl}^{ij} \right| \right)$$
(6)

 242
 其中 IC_k^{ij} 为第 k 个成员在格点 (i, j)的初值, IC_{ai}^{ij} 为对应的控制预报初值, N

 243
 为扰动的集合成员数 (本研究中为 21 个)。

图 4 给出了两种方案 2021 年 2 月 24 日起报的 500hPau 分量风的平均绝对扰 244 动(简称集合扰动)随预报时效的演变图,图4a可以看出,经过 ETKF 方案在初 245 始时刻会产生一定的扰动分布,且扰动形态具有一定的流形特征,12h 预报时效 246 扰动范围有所增加,如模式中部巴尔喀什湖附近扰动量级基本达到 2m/s,但随 247 着预报时效进一步延长,扰动增长达到饱和甚至缩小,如 24h 基本上在模式区域 248 内虽然也存在离散度大值中心,但是整体范围有明显缩小,尤其是模式范围内上 249 游区域,离散度逐渐消散,仅在下游地区保持一定的离散度,这是由于单一侧边 250 界在上游区域外侧施加作用,使得不同成员趋向一致,这种现象随着预报时效的 251 延长表现得尤为显著。而对于 ETKF-SPPT 方案,其初始离散度与 ETKF 扰动分 252 布一致,在加入了 SPPT 扰动之后,随着模式积分过程其整体离散度有明显增加, 253 如 24h 预报时效 ETKF-SPPT 比 ETKF 扰动范围和量级更大,说明引入模式扰动 254 可以有效改善原系统的扰动受限问题。 255

256







276

277 3.3 集合预报检验结果

278 对批量试验时段内的结果进行评分统计,进一步定量分析引入 SPPT 模式扰
279 动的预报效果。采用的集合预报检验方法为集合平均的均方根误差(Root Mean
280 Square Error, RMSE)、集合离散度以及 Talagrand 分布。批量试验检验主要包括等
281 压面要素以及地面要素。

集合平均的均方根误差(RMSE)和集合离散度(SPREAD)是集合预报最常用 282 的检验方法。本文首先对低空和近地面温度、纬向风场进行检验。图 6 给出了试 283 284 验时段内统计的 850hPa 温度和纬向风(T850,U850)、2m 温度(T2m)以及 10m 纬 向风(U10m)的检验结果。从图中可知 ETKF-SPPT 方案的 RMSE 在 36h 短时效内 285 均小于 ETKF 方案, 尤其是短预报时效最为明显, 如 12h 预报时效, ETKF 集合 286 的 RMSE 为 1.3K, 而 ETKF-SPPT 集合的 RMSE 为 1.55K, 说明物理过程扰动方 287 288 法有效的降低了集合预报短预报时效的误差:从集合离散度来看,ETKF 方案的 离散度在短时效内略优于方案, T850 的 36h 集合离散度为 0.61K, 而 ETKF-SPPT 289 方案的 36h 集合离散度为 0.52K, 对于其它层次和要素的检验结果也较为类似, 290 291 这里不再赘述。以上结果说明 SPPT 方法可以有效提高集合预报的准确性,减小







297

图 6 集合平均均方根误差(RMSE)与离散度(SPREAD)随时间演变特征.





(a)-(d): T850, U850, T2m, U10m

Talagrand 分布(Hamill, 2001) 是一种衡量集合预报的可靠性的方法,该方法 300 通过将集合成员排列成若干区间,统计观测落在各区间的频率来获得柱状分布图。 301 302 Talagrand 分布平缓表示观测落在各个成员区间的频率相当,集合预报系统较为 "U"型分布说明集合成员不够发散, "L"型或"J"型分布表明集合 303 可靠。 成员存在预报负偏差或正偏差。图 7 给出了两套集合 500、850hPa 纬向风和温 304 度 24h 预报时效的 Talagrand 分布。总体上 ETKF 的 Talagrand 呈 U 型分布,表 305 306 现出一定的离散度不足; ETKF-SPPT 方案 Talagrand 分布更平缓, 离散程度有了 明显改善,其它要素检验结果也类似(图略),说明 ETKF-SPPT 方案的概率分布 307 308 可靠性更高。





315

316 3.4 大风个例预报效果

317 为了探索集合预报对克拉玛依局地大风的量级以及时段的识别能力,研究了
318 试验时段内 2 月 25 日一次典型的强大风个例,本次个例中克拉玛依站瞬时风力
319 可达 21.3m/s,给城区造成了一定破坏。图 8 分别给出了两种集合对克拉玛依站
320 2021 年 2 月 24 日 00:00 UTC 起报的 30h 预报(至 25 日 06:00 UTC)各集合成
321 员以及集合平均预报的瞬时风速演变,同时给出了观测实况。图中的实况风速演
322 变可以看出该大风天气过程在克拉玛依站具有明显的强大风时段,在 25 日 03:00
323 UTC 风速较小,仅为 6m/s 左右,但在 25 日 06:00 UTC 起风,达 20m/s 以上。

324 从集合成员预报可以看出,ETKF集合各成员预报不够发散,且对起风时段的变
325 化描述不够准确,24h、27h预报时效显著高估了实况风速,24h集合平均预报风
326 速已接近 10m/s; ETKF-SPPT成员来看,首先各个成员预报较为发散,27h预
327 报有若干成员非常接近实况量级,尚未起风,集合平均风速在 10m/s 以下,在
30h预报时效集合平均风速才达 20m/s 左右,各个成员预报相对于 ETKF 集合要
329 更加接近。



的效果,研究了 25 日 03:00 UTC 时刻两套集合的预报情况。图 9a 给出了观测的 338 2021年2月25日03:00 UTC 克拉玛依站极其周边站点的风速分布,可以看出 339 该时刻克拉玛依站尚未起风,风速值在 2-5m/s,而上游的几个站点风速均达到 340 5-10m/s 或 10m/s 以上, 说明大风尚未达到山脚下的克拉玛依站。 图 9b-c 给出了 341 ETKF 和 ETKF-SPPT 两种集合方法 2021 年 2 月 25 日 03:00 UTC 时刻集合平 342 均预报风速分布。ETKF 集合(图 9b)可以看出其集合平均预报 10m/s 覆盖范围较 343 大,说明集合整体预报相对于实况偏强,大风已影响到了克拉玛依站;对于 344 ETKF-SPPT 集合(图 9c), 10m/s 风速区域尚未影响到克拉玛依城区, 克拉玛依 345 站风速在 5-10m/s 之间,与实况对应较好,改善了 ETKF 集合起风过早的现象。 346



363 本文基于克拉玛依集合预报系统探索了通过 SPPT 模式扰动改进集合效果的

364 方法,尝试通过敏感试验获得适用于该系统的 SPPT 扰动参数,并对比了仅采用
365 ETKF 初值扰动以及 ETKF 初值扰动加随机物理过程模式扰动(ETKF-SPPT)两组
366 集合试验,得出以下结论:

367 (1)随机物理过程倾向扰动参数敏感试验表明,大/小的格点标准差,利于/不
368 利于离差增长,小的失相关空间尺度有利于低空要素尤其是水汽的离散度增长,
369 而大的失相关时间尺度有利于离散度增长;SPPT 扰动具有从低层向高层的传播
370 特征。通过敏感试验,获得了适用于克拉玛依区域集合预报系统 SPPT 方案关键
371 参数。

372 (2)对比了 ETKF 和 ETKF-SPPT 两种集合方案,通过扰动分析表明仅采用
373 ETKF 初值扰动方案,受单一侧边界条件的影响,各成员之间的离散度发展受到
374 约束,模式范围内上游地区扰动能量逐渐消散,下游地区的扰动能量难以保持;
375 引入随机物理过程模式扰动后,可在模式积分过程中不断产生新的扰动能量,使
376 得模式区域内集合扰动增长能力显著提高。

377 (3) 集合预报检验结果表明相对于 ETKF 方案,引入模式扰动可以大幅增加
378 集合离散度,并减少预报误差;对于集合预报的概率技巧评分具有较明显提升。
379 (4)大风个例试验结果表明 ETKF-SPPT 集合能够有效改善原 ETKF 集合的起

380 风时间,各成员更为发散,对局地强大风的量级和时段具有更准确的预报能力,381 尤其是对原方案起风时间过早的现象有所改进。

382 以上结论表明仅采用初值扰动的克拉玛依集合预报系统效果有限,各个成员
383 预报不够发散,难以有效表达局地强大风的预报不确定性,通过增加模式扰动可
384 以有效改进集合预报离散度,若干成员能够获得更好的定时定量预报,因此具有
385 较好的实际应用价值。考虑到一些业务部门资料获取及存储条件的限制,并未通
386 过全球集合来为区域集合提供侧边界扰动,如本文中的克拉玛依区域集合预报系
387 统,今后随着系统的升级引入侧边界扰动后会对集合预报性能产生进一步提升。

388

389 参考文献 (References)

- Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al.2009. A Spectral Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme and Its Impact on
 Flow-Dependent Predictability in the ECMWF Ensemble Prediction System, J Atmos Sci, 66(3):603-626.
- Berner J, Ha S Y, Hacker J P, et al.2011.Model Uncertainty in a Mesoscale Ensemble Prediction System, Stochastic versus Multiphysics
 Representations, Mon Wea Rev, 139(6):1972-1995.
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001, Adaptive Sampling with the Ensemble Transform Kalman Filter. Part I: Theoretical
 Aspects[J]. Monthly Weather Review, 129(3):420-436.
- Bishop C H, Holt T R, Nachamkin J, et al. 2009. Regional Ensemble Forecasts Using the Ensemble Transform Technique[J]. Monthly
 Weather Review, 137(137):288-298.
- Bojarova J, Gustafsson N, Johansson A, and Vignes O. 2011. The ETKF rescaling scheme in HIRLAM, Tellus, 63A:385-401.
- Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, et al.2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system. Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,

400 134(632):703-722.

401 Bowler N E, Arribas A, Sarah E, et al.2009.The local ETKF and SKEB, Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction 402 system, Quart J Roy Meteor Soc, 135(640):767-776.

Buizza R, Miller M, Palmer T N.1999.Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system, Q J R
 Meteorol Soc, 125(560):2887-2908.

- 405 陈静,薛纪善,颜宏. 2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J]. 大气科学, 29(5):717-726. Chen Jing, Xue Jishan,
- 406 and Yan Hong. 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction[J]. Chinese Journal of 407 Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(5):717-726.
- 408 陈静,李晓莉, 2020, GRAPES全球 / 区域集合预报系统10年发展回顾及展望. 气象科技进展[J], 10(2): 9-18. Chen Jing, Li Xiaoli,
- 409 2020, The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble predication[J] Adv Meteor Sci Technol, 10(2):9-18
- 410 Du J, DiMego G, Tracton M S, and Zhou B. 2003. NCEP short-rangeensemble forecasting (SREF) system: Multi-IC, multi-model and
- multi-physics approach, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, J. Côté, Ed., Rep. 33,CAS/JSC Working Group on
 Numerical Experimentation(WGNE), WMO Tech. Doc. 1161:5.09–5.10.
- 413 Epsten E S.1969.Stochastic dynamic prediction[J].Tellus, 21(6) :739-759.

Frogner I L, Haakenstad H, Iversen T. 2006. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute[J]. Quarterly
 Journal of the Royal Meteorological Society, 132(621):2785–2808.

- 416 关吉平, 张立凤, 2009. 增长模繁殖法在华南暴雨中期集合预报中的应用[J]. 热带气象学报, 25(2):246-250.Guan Jiping, Zhang
- 417 Lifeng, 2009. Application of the method of BGM in medium-range ensemble forecast[J]. J Trop Meteor. 29(2): 429-436
- 418 Hamill T M. 2001.Interpretation of rank histograms for verifying ensembles. Mon Wea Rev, 129:550–560.
- 419 Houtekamer P L,Lefaivre L,Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction, Mon Wea Rev, 420 124(6):1225-1242.

421 Leith C E.1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecast[J]. Monthly Weather Review, 102(6): 409-418.

Li X, Charron M, Spacek L, and Candille G.2008. A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations, MonWeaRev, 136(2):443-462.

- 424 李俊, 杜钧, 刘羽. 北京"7.21"特大暴雨不同集合预报方案的对比试验[J]. 气象学报, 2015, (1): 50-71. LI Jun, DU Jun, LIU Yu. A
- 425 comparison of initial condition-, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing "7.21" excessive storm rain
- 426 event[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, (1): 50-71
- Lin W B,Neelin J D.2000. Influence of a stochastic moist convective parameterization on tropical climate variability. Geophysical
 Research Letters, 27(22):3691–3694
- 429 Lupo K M,Torn R D,Yang S C,2020.Evaluation of stochastic per turbed parameterization tendencies on convective permitting ensemble
 430 forecast of heavy rainfall events inNew York and Tai wan[J].Wea Forecasting,35(1):5-24.

431 Marsigli C F, Boccanera A, Montani, et al. 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: Validation of the methodology and

- 432 verification, Nonlinear Processes Geophys, 12(4), 527-536.
- 433 闭锦忠, 刘畅, 王世璋, 庄潇然, 武天杰. 随机物理倾向扰动在风暴尺度集合预报中的影响研究[J]. 气象学报, 2018, 76(4):

434 590-604. Jinzhong MIN, Chang LIU, Shizhang WANG, Xiaoran ZHUANG, Tianjie WU. Impact of stochastically perturbed 435 parameterization tendencies on storm-scale ensemble forecast[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(4): 590-604.

- 436 Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation[J]. Quarterly
 437 Journal of the Royal Meteorological Society, 122(122):73-119.
- Palmer T N , Buizza R , Doblas-Reyes F , et al, 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty[J]. Ecmwf Technical
 Memorandum.
- 440 Qiao, Xiaoshi , Wang S., and Min J, 2018. The Impact of a Stochastically Perturbing Microphysics Scheme on an Idealized Supercell
- 441 Storm[J]. Mon Wea Rev ,146(1):95-118

- 442 任福民, 高辉, 刘绿柳,等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象, 2014, 40(7):860-874. REN Fumin, GAO
- Hui,LIU Lüliu,SONG Yanling,GAO Rong,WANG Zunya,GONG Zhiqiang,WANG Yongguang,CHEN Lijuan,LI Qingquan,KE
 Zongjian,SUN Chenghu,JIA Xiaolong,2014.Research Progresses on Extreme Weather and Climate Events and Their Operational
- 445 Applications in Climate Monitoring and Prediction[J].Meteor Mon,40(7):860-874.

446 任志杰,陈静,田华,2011.T213 全球集合预报系统物理过程随机扰动方法研究[J].气象,37(9):1049-1059.Ren Zhijie,Chen Jing,Tian
 447 Hua,2011.Research on T213 Ensemble Prediction System Stochastic Physics Perturbation[J].Meteor Mon,37(9):1049-1059.

- 448 Shutts G.2005.A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems, Quart J Roy Meteor Soc, 449 131(612):3079-3102.
- 450 Stensrud D J, and Fritsch J M.1994.Mesoscale convective systems weakly forced large-scale environments, Part II, Generation of a 451 mesoscale initial condition[J]. Monthly Weather Review 122(9) :2068-2083.
- 452 Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. 1999. Using Ensembles for Short-Range Forecasting[J]. Monthly Weather Review, 127(4):433-446.
- 453 Stensrud D J, Bao J W and Warner T T.2000.Using initial condition and model physics perturbation in short-range ensemble simulation of
 454 mesoscale convective system, Mon Wea Rev, 128(128):2077-2107.
- 455 孙东霞,谢小红,郭晓静,2008.克拉玛依特强大风的气候特征及天气分析与预报[J].沙漠与绿洲气象,2(4):18-21.Sun D X, Xie X
 456 H,Guo X J,2008. The Climatic Characteristics of the Extreme Strong Wind in Kelamayi and its Weather Analysis and
- 457 Forecast[J].Desert Oasis Meteorol,2(4):18-21.
- 458 谭宁,陈静,田华,2013.两种模式随机扰动方案比较及扰动传播分析[J].气象,39(5):543-555.TAN Ning,CHEN Jing,TIAN
 459 Hua,2013.Comparison Between Two Global Model Stochastic Perturbation Schemes and Analysis of Perturbation
 460 Propagation[J].Meteor Mon,39(5):543-555.
- 461 Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. 74(12):2317-2330.
- 462 Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method [J]. Mon Wea Rev, 125(12):3297-3319.
- Walser A, Arpagaus M, Appenzeller C, et al. 2006, The Impact of Moist Singular Vectors and Horizontal Resolution on Short-Range
 Limited-Area Ensemble Forecasts for Two European Winter Storms[J]. Monthly Weather Review, 134(10):2877-2887.
- Limited-Area Ensemble Forecasts for Two European-winter Storms[J]. Montuny weather Review, 154(T0):2877-2887.
- 465 王璐,沈学顺,2019.对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J].气象,45(8):1158-1168.WANG Lu,SHEN Xueshun,2019.Review on
 466 the Representation of Model Uncertainty in Convection-Allowing Ensemble Prediction System[J]. Meteor Mon,45(8):1158-1168.
- 467 王明欢,李俊,熊洁,赖安伟,孙玉婷,许建玉,2021.随机物理倾向扰动方案在西部山地对流尺度集合预报中的研究[J].气
 468 象,47(8):966-981.WANG Minghuan,LI Jun,XIONG Jie,LAI Anwei,SUN Yuting,XU Jianyu,2021.Study of Stochastically Perturbed
- 469 Parameterization Tendencies in West China Mountains Convective-Scale Ensemble Forecast[J].Meteor Mon,47(8):966-981.
- Wang X and Bishop C H. 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes[J]. J Atmos
 Sci , 60(9) :1140-1158.
- 472 辛渝,周颖真,宋丽莉,姜海梅.2015.新疆风区下垫面动力学粗糙度估测值与模式定义值的对比[J].大气科学学报.38(6):811-818. Xin Y,
- Zhou Y Z, Song L L, et al.,2015. Aerodynamic roughness comparison between the estimated based on masts and the defined in model
 over Xinjiang wind areas [J].Trans Atoms Sci,38(6):811-818.
- 475 徐致真,陈静,王勇,李红祺,陈法敬,范宇恩. 中尺度降水集合预报随机参数扰动方法敏感性试验[J]. 气象学报, 2019, 77(5):
- 476 849-868 Zhizhen XU, Jing CHEN, Yong WANG, Hongqi LI, Fajing CHEN, Yuen FAN. Sensitivity experiments of a stochastically
- 477 perturbed parameterizations (SPP) scheme for mesoscale precipitation ensemble prediction[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(5):
 478 849-868
- Xue H, Li J, Qian T, Gu H, 2020. A 100-m-scale modeling study of a gale event on the Lee side of a long narrow mountain. Journal of
 Applied Meteorology and Climatology, 59(1): 23-45.
- 481 袁月,李晓莉,陈静,夏宇,2016.GRAPES 区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究[J].气象,42(10):1161-1175.YUAN
- Yue,LI Xiaoli,CHEN Jing,XIA Yu,2016.Stochastic Parameterization Toward Model Uncertainty for the GRAPES Mesoscale Ensemble
 Prediction System[J].Meteor Mon,42(10):1161-1175.
- 484 Zhang Q, Ng CP, Dai K. et al, 2021.Lessons Learned from the Tragedy during the 100 km Ultramarathon Race in Baiyin, Gansu Province

485 on 22 May 2021. Adv. Atmos. Sci. 38, 1803–1810

大气科学学报 优先出版稿