

ECMWF 驱动场谱逼近对浙江超强台风“利奇马” (2019) 精细化数值预报的影响研究*

董美莹 陈锋* 邱金晶 冀春晓
(浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

摘 要

为提升高分辨率区域数值天气预报模式性能, 基于高质量的 ECMWF 全球预报模式产品和动力谱逼近方法优势, 本文以 2019 年重创浙江的超强台风“利奇马”为例, 探讨了 ECMWF 驱动场水平风场谱逼近技术对浙江台风精细化预报性能的影响。结果表明: (1) 谱逼近对路径预报影响较明显, 逐小时路径误差最大修正可达 80 km。谱逼近的垂直层次选取对于谱逼近效果有一定影响, 总体上 800hPa 高度以上谱逼近对台风路径和强度预报改进最佳。(2) 谱逼近对浙江台风大风和强降水精细化预报均有大幅改进, 对于 8 级以上大风 ETS 评分平均改进率为 8.0%, 最大改进率达 20.8%; 对最强日降水的暴雨、大暴雨以上降水 TS 评分改进幅度达 11.8%、26.2%。(3) 谱逼近对台风路径西偏和浙西南风雨高估的改进主要与对流层形势场及台风引导气流修正、近地层风力减弱、局地山脉地形降水增幅作用减弱有关。

关键词: ECMWF; 谱逼近; 台风; 利奇马; 精细化数值预报

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20193

*收稿日期 2020-08-24; 网络预出版日期

作者简介 董美莹, 女, 博士, 主要从事台风、暴雨等灾害性天气研究, E-mail: dongmy_zj@163.com

通讯作者 陈锋, E-mail: fchen_zj@163.com

资助项目 华东区域气象科技协同创新基金合作项目 QYHZ201805, 浙江省基础公益研究计划 LY21050001, 浙江省科技计划项目 LGF20D050001, 浙江省气象科技计划项目 2017ZD04、2020ZD06

Funded by Meteorological Science and Technology Collaborative Innovation Fund Cooperation Project of East China Region (Grant QYHZ201805), Basic Public Welfare Research Program of Zhejiang Province (Grant LY21050001), Science and Technology projects of Zhejiang Province (Grant LGF20D050001), Key Project of Science and Technology Plan of Zhejiang Meteorological Provincial Bureau (Grants 2017ZD04, 2020ZD06)

22 1 引言

23 为改进区域数值模式模拟性能，Waldron et al. (1996) 提出了谱逼近方法。
24 该方法假设无边界全球数值模式在较大尺度大气波动的解析表达方面比有边界
25 有限区域数值模式更优；所以在有限区域模式中，从大气波动谱空间的角度对
26 模式整个模拟区域的较大尺度谱空间增加一个订正项来减少有限区域数值模式
27 模拟误差。由此可见，动力谱逼近是具有尺度选择性的，它既要求区域模式模
28 拟的较大尺度大气波动接近全球模式强迫场，又保证了较小尺度大气波动在有
29 限区域模式中自由发展 (von Storch et al., 2000)。换言之，谱逼近技术一定程
30 度上兼收了全球模式在较大尺度系统模拟优势和有限区域模式在中小尺度系统
31 模拟优势，是提升区域模式模拟性能的一个有效途径。

32 由于上述谱逼近技术优势，该方法在区域气候模拟工作应用较多，谱逼近
33 能有效降低区域数值模式性能对于模拟区域大小和位置的依赖性
34 (Miguez-Macho et al., 2004; 宋寔和汤剑平, 2011; 曾先锋和周天军, 2012),
35 对美国与我国的夏季降水、江淮梅雨等气候模拟均有较好改进 (Miguez-Macho et
36 al., 2005; Cha and Lee, 2009; Shan et al., 2012; Tanya L. Spero et al., 2014;
37 Chio and Lee, 2016)。2013 年以来，有学者尝试把谱逼近方法用于重大天气过
38 程的数值模拟，并取得较好应用效果。Cha and Wang (2013) 利用谱逼近改进了
39 区域模式的大尺度形势场，模拟台风路径和强度更接近实况。针对 2008 年初我
40 国南方大范围持续性降水过程，王淑莉等 (2016) 通过谱逼近技术对低层风场
41 与水汽输送的订正实现了降水模拟改进。最近，针对浙江省高分辨区域数值天
42 气预报系统雨带位置预报不足 (邱金晶等, 2015)，董美莹等 (2019) 开展了多
43 要素谱逼近方法在高分辨率区域数值天气预报模式梅雨模拟性能的应用研究，
44 确定了水平风场谱逼近为最优方案；该方案通过低层风场和高湿区等动力、热
45 力影响因子修正改进了梅雨模拟。

46 从动力张弛谱逼近基本原理可知，大尺度驱动场本身预报质量是影响谱逼
47 近效果的关键因素，选择一个高质量大尺度驱动场有助于谱逼近技术提升高分
48 辨区域数值预报业务系统性能。对当前全球模式预报产品业务评估表明，
49 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts,
50 <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-i>) 和 NCEP-GFS (National Centers

for Environmental Prediction Global Forecast System ,
<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>) 全球预报模式对于我国台风天气
预报性能优良 (雷小途和余晖, 2015; 陈国民等, 2019); ECMWF 全球模式的
实时预报产品对于浙江参考价值很高 (浙江省气象科学研究所, 2020)。因此,
开展 ECMWF 全球模式预报产品驱动的谱逼近技术应用研究无疑是值得尝试的
一条重要途径。已有研究显示, 基于 NCEP 再分析资料 (陈淑莉, 2016; 董美
莹等, 2019) 或 GFS 预报场资料 (Cha and Wang, 2013) 驱动的谱逼近技术研究
工作取得一定进展, 而在区域高分辨数值天气预报模式使用 ECMWF 全球模
式预报场驱动的谱逼近预报试验很少, 针对动力谱逼近如何影响台风风雨精细
化预报的研究鲜见。

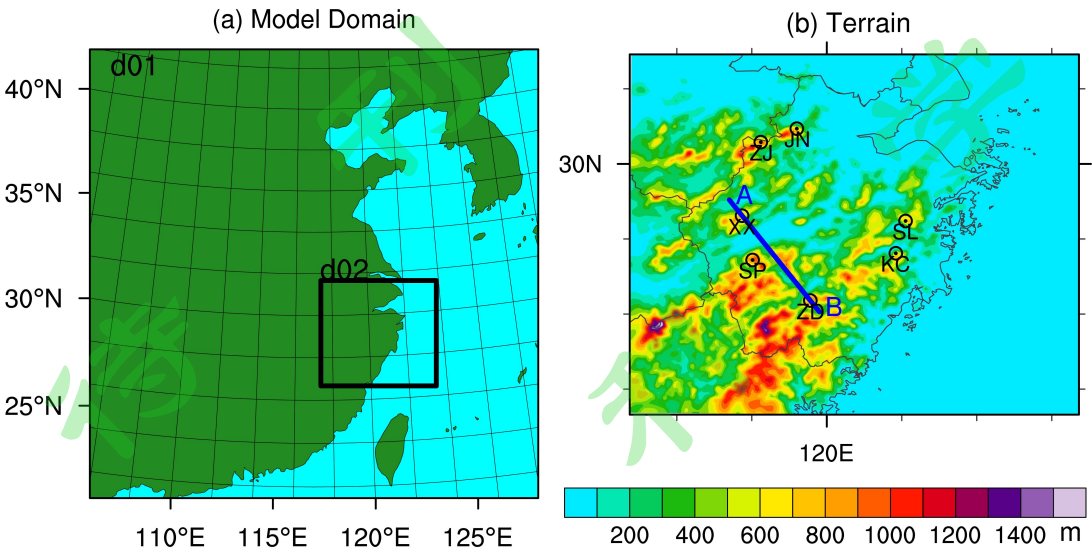
综上所述, 为提升高分辨率区域数值天气预报模式性能, 考虑高质量
ECMWF 资料和谱逼近方法优势, 本文以 2019 年严重影响我国的超强台风“利奇
马”为例, 开展 ECMWF 资料驱动谱逼近技术在高分辨率区域数值天气预报系统
中的应用研究, 重点探讨该技术对浙江台风精细化预报的可能影响, 以期提高
ECMWF 资料应用水平和动力谱逼近技术适用性认知, 为高分辨区域数值预报
精细化预报水平提升和台风灾害防御工作提供支持。文中后续内容安排如下:
第 2 节介绍了研究所用的谱逼近方案、数值模式、试验设计和资料; 第 3 节概
述了研究个例的基本情况; 谱逼近方案对于“利奇马”台风路径、强度及精细化
风雨预报的影响在第 4 节进行了着重分析; 最后第 5 节是全文的结论与讨论。

2 方法和资料

2.1 高分辨区域数值预报模式

利用 WRF-ARW V3.4.1 模式 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users> ,
Skamarock et al., 2008), 选用浙江省数值预报业务系统物理框架 (Zhe-Jiang WRF
ADAS Real_time Modeling System——ZJWARMS) (陈锋等, 2012)。模式使用
双重嵌套, 内外层区域各为 D01 和 D02 (图 1a), D01 水平分辨率 9 km, 格点数
265×265; D02 水平分辨率 3 km, 格点数 205×187。模式层顶设在 10hPa, 内外
嵌套的垂直层数都是 36 层。选用的物理过程参数化方案包括: Noah 陆面过程
方案 (Chen 和 Dudhia, 2001)、RRTMG 短波和长波辐射方案 (Iacono et al., 2008)、

79 YSU 大气行星边界层方案(Hong et al., 2006)、WSM 6-Class 云微物理方案(Hong
80 et al., 2004) 和 MM5 相似理论的表面层方案(Jimenez et al., 2012)。



81
82 图 1 模式模拟区域设置(a)和内区域 (D02) 地形高度(b, 阴影, 单位: m). 图 a 中内 (D02)、
83 外 (D01) 区域水平格距分别为 3 km 和 9 km, 粗黑线色框线示意内区域; 图 b 中点圈标记
84 表示“利奇马”影响期间浙江省 7 个主要降水中心观测站: 括苍山 (KC)、枫头村 (JT)、石
85 梁镇 (SL)、江南天池 (JN)、照君岩 (ZJ)、下西坑村 (XX)、石屏村 (SP) 和郑地村 (ZD),
86 图 b 中粗蓝线 AB 示意图 10 垂直剖面中过下西坑村 (XX)和郑地村 (ZD) 降水中心的水平
87 线位置。

88 Fig.1 Configuration of the model domain (a) and the inner domain topography (b, shaded, unit:
89 m). In figure (a), the outer domain D01 corresponds to the 9-km horizontal resolution, the inner
90 domain D02 with thick black frame has 3-km resolution. In figure (b), the dot-circle marks
91 indicate the seven observational stations of main precipitaion ceters in Zhejiang province induced
92 by typhoon Likima (2019); the thick blue line AB denotes the horizontal line through the rainfall
93 centers of XX and ZD as displayed in the vertical cross section Fig.10.

94 2.2 谱逼近方案和试验设计

95 基于浙江省高分辨区域数值系统和本地天气气候特点, 借鉴 Von Storch 等
96 (2000) 和 Tang et al. (2010) 的滤波思路, 董美莹等 (2019) 研制了适用于
97 ZJWARMS 系统的水平风场谱逼近最优方案及子模块。谱逼近基本原理是把区
98 域数值模拟作为一种“降尺度”问题来处理 (Waldron et al., 1996), 首先确定出
99 谱逼近的具体要素和较大尺度谱空间, 其次通过傅立叶变换等方法计算出在较

大尺度谱空间全球模式强迫场和有限区域模拟场之间的差异增量，然后在区域模式积分的每一个时间步长中，在该要素预报方程中添加一个订正项，最终实现区域模式模拟场向全球模式驱动场在较大尺度谱空间的动力逼近以减少模拟误差。文中使用的谱逼近方法是将区域模式区域内部某一垂直层次及以上所有层次大气的较大尺度波动向质量更优的 ECMWF 全球模式进行逼近，这种逼近是通过每一步积分步长（文中为 20s）对某垂直层次以上逼近要素的较大尺度谱逐步增加相应增量修正项来实现；其他层次和要素的变化则是通过每一个积分步长中各预报方程之间的物理约束来逐步产生，因此谱逼近后各层次、各要素可以保持较好的平衡，谱逼近可视为是一种间接的资料同化方法（von Storch et al., 2000）。实际上，谱逼近方案中垂直层次的选择可以影响到大气边界层状态，而边界层大气属性对于台风等重大天气过程有重要影响（陈联寿和丁一汇，1979；邓国等，2005；Zhang et al., 2017；Zhang and Pu, 2017；Dong et al., 2019；王叶红和赵玉春，2020）。一方面，大气低层明显受到地表地形等局地分布特性影响，具有较高分辨率的区域模式对低层大气及较小尺度波动模拟有相对优势；另一方面，无边界的全球模式对中层大气较大尺度波动模拟有相对优势。因此可以推论，可能存在一个最佳谱逼近垂直层次，在该层次以下保留区域模式的模拟优势，在该层次及以上引入驱动场谱逼近来吸收全球模式的模拟优势，最终可使模拟性能达到最佳，因此有必要进一步开展垂直层次调优试验来进一步完善谱逼近方案。如表 1 所示，本研究共设计了 1 个控制试验（CTL）和 4 个不同垂直层次谱逼近敏感性数值试验，分别对模式层第 12 层（约 700hPa 高度，SNL12）、第 10 层（约 800hPa 高度，SNL10），第 8 层（约 850hPa 高度，SNL8）、第 6 层（约 925hPa 高度，SNL6）及以上的层次做水平风场动力谱逼近。所有试验均积分 72h，敏感性试验除了逼近层次不同外，其他试验设计与控制试验完全相同。

表 1 试验设计

Table 1 Experiments design

序号	试验类别	试验名称	说明
1	控制试验	CTL	未作任何要素的谱逼近

2		SNL12	对模式第 12 层 ($\sigma=0.703685$) 及以上层次作谱逼近
3	不同垂直		
3	层次谱逼	SNL10	对模式第 10 层 ($\sigma=0.790056$) 及以上层次作谱逼近
4	近敏感性		
4	试验	SNL08	对模式第 8 层 ($\sigma=0.862011$) 及以上层次作谱逼近
5		SNL06	对模式第 6 层 ($\sigma=0.921500$) 及以上层次作谱逼近

2.3 资料

研究使用资料包括 ECMWF 的全球模式预报资料、ZJWARMS 区域数值模式预报资料、台风路径资料和实况风雨观测等资料。(1) ECMWF 全球模式预报资料取自中国气象局下发的高分辨确定性预报产品, 包括分析场和预报场, 资料时间分辨率为 3 h, 其中高空变量的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 地面变量的空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 作为本研究中高分辨区域数值模式的初始场和边界条件。(2) 台风路径和实况风雨观测资料用于检验模式预报性能。台风路径资料取自中国气象局上海台风所研发的西北太平洋热带气旋检索系统提供的实时路径资料 (http://10.228.34.9/stiweb_light/)。(3) 实况风雨资料取自浙江省气象局信息网络中心的自动站数据库, 包括了浙江省约 2900 多个站点观测资料(包括 102 个国家站和 2800 多个区域自动站), 站点平均空间分辨率约 6km。已有研究表明, 在这种较高空间站点密度情况下, 不同插值方法对结果影响有限(许变等, 2017)。为此, 在下文地面要素检验评估分析工作中, 本文利用反距离加权插值法将全省各站点资料插值到预报场格点上进行地面要素的相关定量检验。(4) 对于高空要素检验, 本文使用了 ECMWF 全球模式 08 时和 20 时的分析场, 时间分辨率为 12 h。

3 个例概况

2019 年第 9 号台风“利奇马”(Lekima) 8 月 4 日 14 时(北京时, 下同)在菲律宾以东洋面生成后向西北方向移动, 强度不断加强, 7 日 23 时加强为超强台风。8 月 10 日 1 时 45 分在浙江省台州市温岭城南镇登陆, 登陆时中心附近最大风力 16 级(52 米/秒), 中心最低气压 930 百帕。登陆后“利奇马”向北偏西方向纵穿浙江、江苏, 强度逐渐减弱, 11 日 12 时进入黄海北上, 又于 8 月 11 日 20 时 50 分在山东省青岛市黄岛区沿海再次登陆。此后“利奇马”继续北上于 12

日 05 时移入莱州湾海面并迴旋打转，13 日 08 时减弱为热带低压，同日 14 时中央台停止编号。据统计，“利奇马”是 1949 年以来登陆我国大陆地区的第五位超强台风，导致了 17 级以上大风和局地 600 mm 以上暴雨，共造成浙江、山东、江苏等省 1402.4 万人受灾，57 人死亡，14 人失踪，直接经济损失 537.2 亿元。

受超强台风“利奇马”直接登陆影响，8 月 8 日到 11 日浙江省普降暴雨，沿海地区大暴雨局部特大暴雨，多地刷新过程雨量和 24h 雨量纪录，最大过程雨量达 831 毫米（台州临海括苍山站）；浙江大部出现 8 级以上大风，其中沿海大部 12~14 级部分 15~17 级，最大为 61.4 米/秒（温岭石塘镇三蒜岛站），导致浙江省直接经济损失高达 407.2 亿元。可见，重创浙江的台风“利奇马”具有登陆强度强、风雨强度大、影响范围广、灾害影响重等特点。因此，超强台风“利奇马”是衡量 ECMWF 驱动场谱逼近技术对浙江高分辨区域数值模式预报性能影响一个理想个例。鉴于本文研究目的，文中主要分析时段为 2019 年 8 月 8 日 20 时至 2019 年 8 月 11 日 20 时。

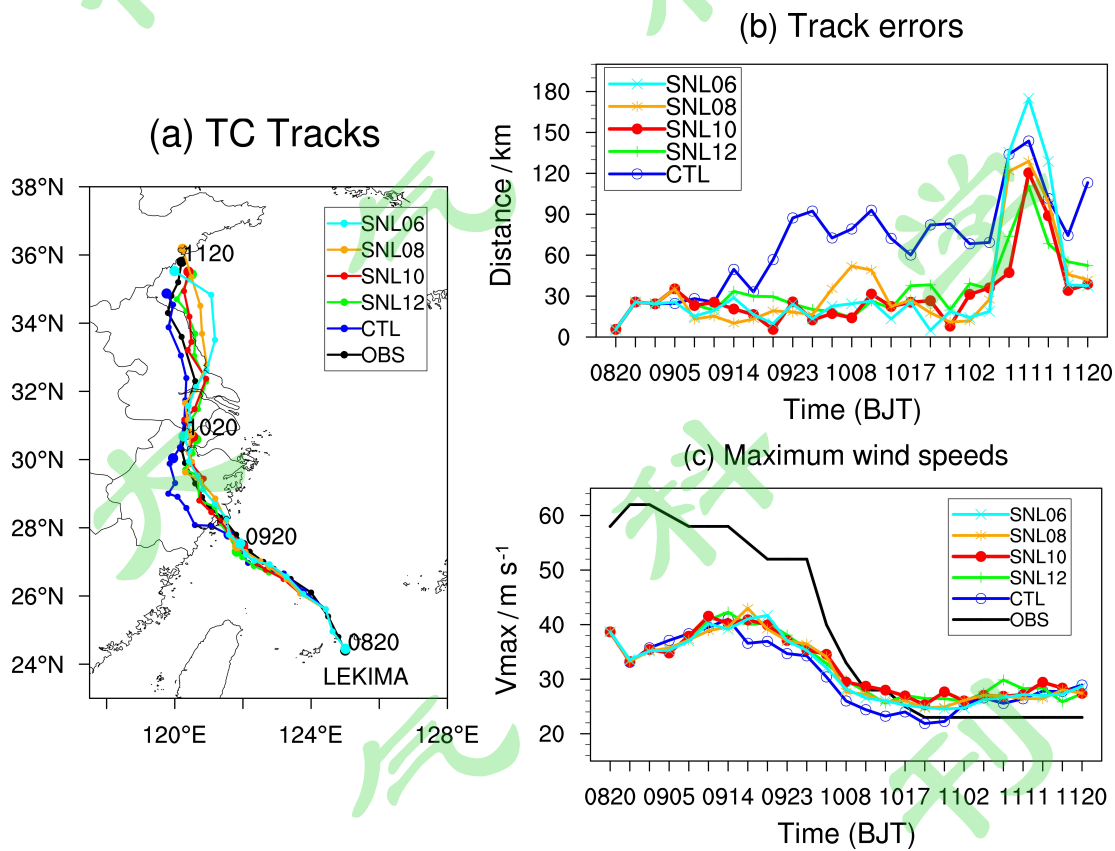
4 结果分析

台风路径和强度是台风预报服务中关键因子，也是做好台风精细化风雨预报的重要前提（陈联寿等，2012）。为此，考虑到台风路径强度在台风精细化预报性能和服务中的重要性和本文研究重点，下文首先通过台风路径和强度的评估确定出最佳垂直层次逼近方案，然后，针对最佳谱逼近方案的模拟结果，进一步对高空形势场、台风 10 m 风场和降水预报方面做深入评估分析，以期较全面评价谱逼近方法对于台风天气精细化预报性能综合影响大小和可能过程。研究采用的统计评分参数有：均方根误差（RMSE）、空间相关系数（SPCC）和 TS、ETS（Equitable Threat Score）等评估量（丁金才，1995；Gotway et al., 2009）。

4.1 对台风路径和强度的影响

不同边界层垂直层次谱逼近敏感性试验对于路径预报影响表明：一方面，动力谱逼近对于台风路径预报有明显影响，谱逼近对 18h 至 72h 的“利奇马”台风路径预报有较好改善。对照实况和区域模式 CTL 试验模拟路径可得（图 2a）：区域模式 CTL 试验模拟路径误差主要出现在 9 日 20 时至 10 日 20 时台风移经浙江期间，在浙江境内台风路径偏西明显，且预报移速 14.1 km h^{-1} 较实况 17.1 km

176 h^{-1} 偏慢。经过 ECMWF 模式水平风场动力谱逼近之后,所有敏感性试验均将 CTL
177 试验台风路径中的移向偏西误差和移速偏慢误差进行修正,对浙江省境内的台
178 风路径预报有显著改进。定量分析区域模式各试验路径误差显示(图 2b),谱逼
179 近试验主要对 18h 至 72 h (9 日 14 时至 11 日 20 时)的预报路径有明显改进作
180 用,谱逼近前后 72 h 平均误差减小约 35 km,逐小时误差最多减小 80 km。另一
181 方面,不同边界层垂直层次谱逼近的改进效果有一定差异,总体上模式层第 10
182 层(约 800 hPa 高度)及以上谱逼近试验 SNL10 路径预报最佳。分析各敏感性试
183 验的误差逐时演变可知,模式层第 10 层及以上谱逼近试验 SNL10 的误差稳定
184 较小,72h 小时平均误差最小,是路径预报的最佳谱逼近方案。



185
186 图 2 2019 年 8 月 8 日 20 时至 11 日 20 时“利奇马”台风路径的实况与 8 月 8 日 20 时起报
187 的预报(a),台风路径误差时序图(b, 单位: km)和台风强度的实况与预报(c, 单位: $m s^{-1}$);
188 图中黑色、蓝色、绿色、红色、橙色、浅蓝色、灰色实线分别示意实况与 CTL、SNL12、
189 SNL10、SNL08 和 SNL06 试验。

190 Fig.2 Lekima's tracks (a), errors (b, units: km) and maximum wind speeds (c, units: $m s^{-1}$) from
191 2000 BJT 8 August 2019 to 2000 BJT 11 August 2019, from observation and simulations. The

black, blue, green, red, orange and light blue lines indicate the observation and simulations for experiments CTL, SNL12, SNL10, SNL08 and SNL06 respectively.

对比谱逼近前后“利奇马”强度预报显示：谱逼近对于强度影响总体较小，谱逼近对 21h 至 45h 预报时效的强度略有改善。从“利奇马”中心附近最大风速逐 3h 演变看到（图 2c），总体上，控制试验对登陆前“利奇马”强度模拟明显偏弱，对于登陆后的强度模拟略偏强。动力谱逼近主要对 2019 年 8 月 9 日 17 时（积分 21h）至 10 日 17 时（积分 45h）台风中心附近最大风速有一定改善，控制试验的风速低估得到一定程度修正，平均误差减少 3 m s^{-1} 。这种修正与谱逼近改进 TC 路径后 TC 经过的下垫面状况更接近实况从而改善了 TC 边界层有关。不同层次谱逼近对强度的修正与路径类似，模式层第 10 层及以上谱逼近试验 SNL10 的误差总体最小，是强度预报的最佳谱逼近方案。

根据上述试验的分析结果，台风路径和强度模拟最接近实况的 SNL10 试验谱逼近方案为最佳方案，结合本节后续及 4.2-4.4 节分析可知，本个例对于 800hPa 及以上层次谱逼近效果最佳主要是充分发挥了 ECMWF 强迫场对引导气流及台风路径的改进优势和区域模式对低层台风结构的解析优势。下文将着重探讨超强台风“利奇马”严重影响浙江期间最佳谱逼近方案对于模式预报性能的综合影响。

我们知道，台风路径主要受大尺度引导气流的影响，为进一步理解谱逼近影响台风路径的过程，本段分析了控制试验和最佳方案的引导气流变化。参照文献 Holland（1984），通过计算距台风中心 500km 水平范围以内、850hPa 至 300hPa 垂直层次之间水平风场的平均值来估计台风引导气流。分析 2019 年 8 月 9 日 08 时至 11 日 08 时引导气流演变得到（图 3c）：总体上，控制试验比最佳试验的引导气流偏小，平均偏小 0.8 m s^{-1} (2.88 km h^{-1})，最大偏小 1.2 m s^{-1} (4.32 km h^{-1})。分析纬向（图 3a）和经向（图 3b）引导气流可知，8 月 10 日 14 时之前 CTL 试验路径移速偏慢和移向偏西主要由经向南风引导气流和纬向东风引导气流共同偏小引起，而此后移速偏慢则主要由经向南风引导气流偏小导致。结合下文 4.2 节谱逼近对于高空形势场的影响分析可知，如图 4a 中红色实线（绿色虚线）所示，谱逼近后对流层几乎整层的纬向（经向）风场均得到了较好改进，水平风场均方根误差多降低了 20%。换言之，谱逼近技术有效吸收了 ECMWF

模式较大尺度高空形势场模拟优势改进了对流层整层水平风场及台风引导气流的模拟，进而修正了“利奇马”台风路径预报。

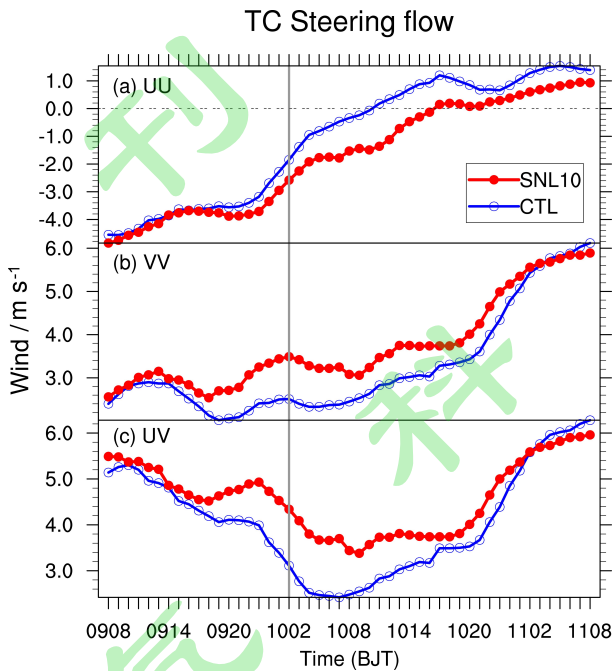


图 3 2019 年 8 月 9 日 08 时至 11 日 08 时控制试验 CTL（蓝色空心圆线）和最佳谱逼近试验 SNL10（红色实心圆线）的纬向 UU（a），经向 VV（b）和全风速 UV（c）引导气流大小变化（单位： m s^{-1} ）；引导气流由距台风中心 500km 水平范围以内、850hPa 至 300hPa 垂直层次之间的水平风场求平均估算（Holland，1984）；图中垂直灰色粗线示意“利奇马”登陆时刻。

Fig.3 The hourly evolution of zonal steering (a), meridional steering (b) and total steering speed (c, unit: m s^{-1}) from 0800 BJT 9 August to 0800 BJT 11 August 2019, from CTL (blue line) control run and experiment SNL10 (red line). The thick grey line denotes the time of Lekima landfall.

4.2 对高空形势场的影响

本节采用 ECMWF 全球模式的分析场（即 ECMWF 全球模式的初始场）为基准，逐 12h 计算一次分析场与各试验预报风场、温度、高度及湿度场的均方根误差和空间相关系数来做对比分析，其中 ECMWF 分析场通过 WRF 模式的前处理模块插值到区域模式预报格点上。

计算 D02 区域内所有预报时效下最佳谱逼近试验相对控制试验各评估参数的平均增量百分比（最佳试验减去控制试验的差值除以控制试验）得到（图 4）：

谱逼近后对于对流层整层的要素强度和分布预报均有较好修正。从均方根误差增量百分比看（图 4a），谱逼近使得高度场、纬向风、经向风、相对湿度和温度场的均方根误差多降低了 20%以上。各要素对比而言，高度场改进幅度最大，700 hPa 至 400hPa 改进幅度稳定在 35%左右；其次是经向风、纬向风和湿度场，最大改进层次位于对流层中层，改进幅度各达 34%、30%和 25%；最后是温度场，多数层次改进 10%左右。空间相关系数增量百分比也显示（图 4b），谱逼近使得各要素的空间分布形态改善程度多在 5%-10%；在垂直方向上，800 hPa 以上层次修正更明显。值得注意的是，各要素中改进最明显的是相对湿度，改进率多在 20%以上。我们知道，台风移动主要受 850 hPa 至 200 hPa 层次气流的引导，这些层次包括风场在内的形势场改进与前文台风引导气流以及台风路径修正是一致的。

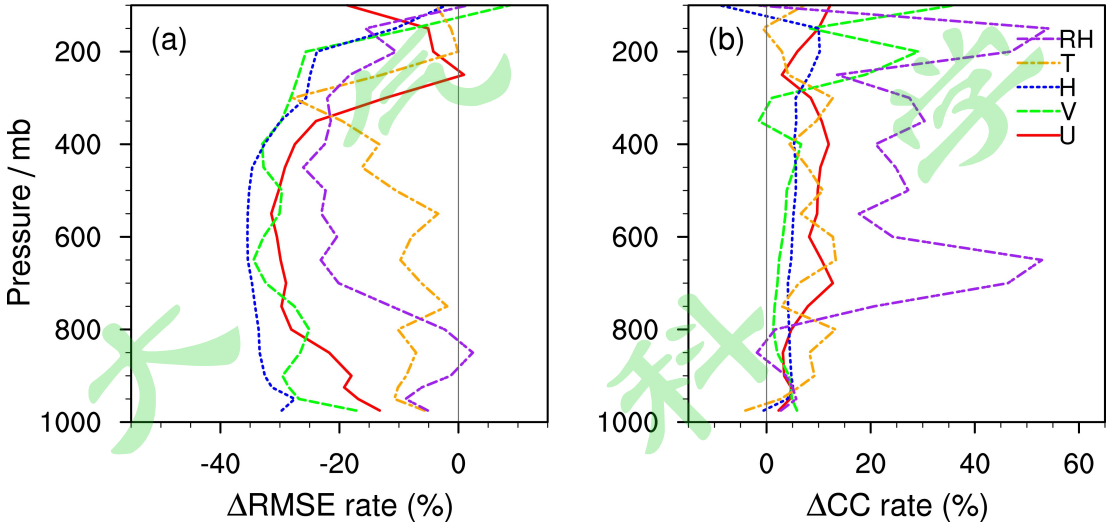
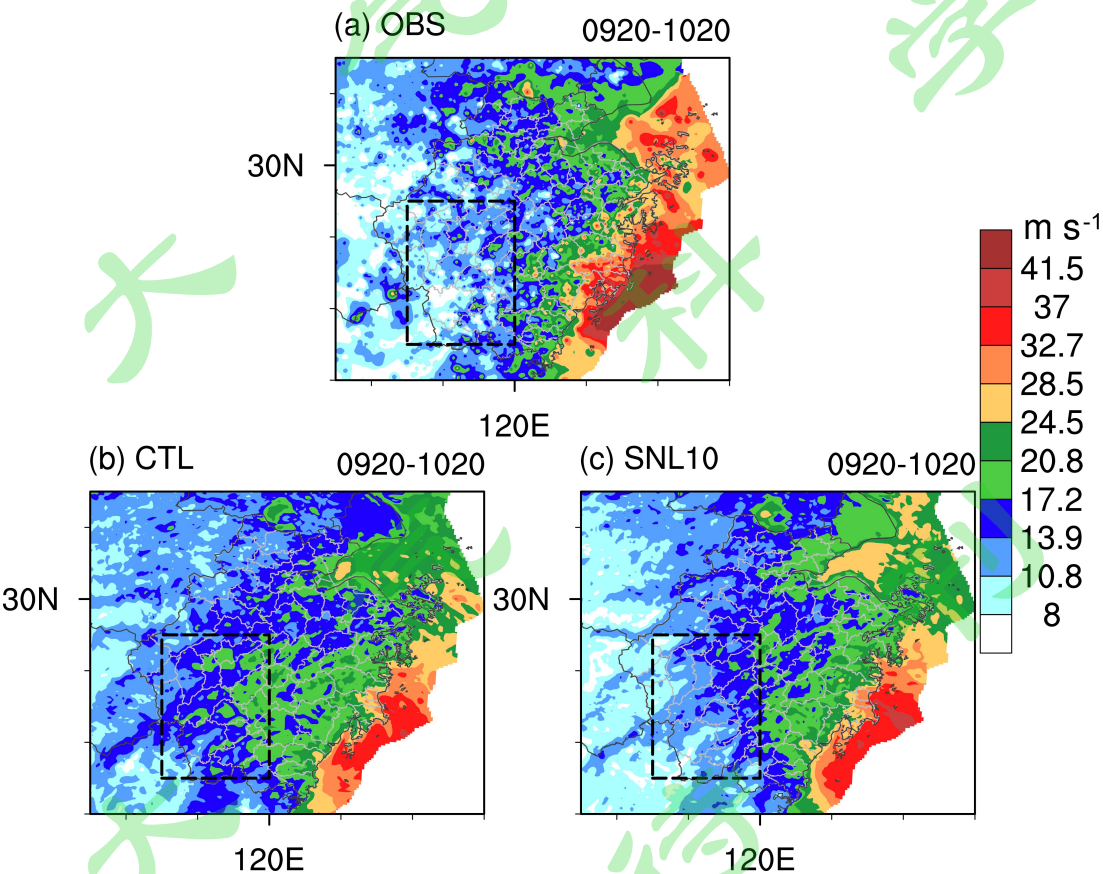


图 4 所有预报时效下最佳谱逼近试验 SNL10 相对控制试验 CTL 各要素模拟(a)均方根误差和(b)空间相关系数的平均增量百分比（最佳试验减去控制试验的差值除以控制试验）D02 区域平均垂直廓线（单位：%）；图中红色实线、绿色虚线、蓝色短虚线、橙色点虚线和紫色长虚线分别示意纬向风、经向风、高度场、温度场和相对湿度。

Fig. 4 Mean profiles over D02 of average difference percentages (unit: %) in statistics of (a) root mean square error (RMSE) and (b) spatial correlation coefficient (SPCC) for meteorological elements between SNL10 experiment and control run (the former minus the latter and then divide the latter) during all leadtimes. The red, green, blue, orange and purple lines indicate the zonal wind, meridional wind and simulations for experiments CTL, SNL12, SNL10, SNL08 and SNL06 respectively.

262 4.3 对 10m 风预报的影响

263 地面 10m 风是评估台风预报能力的一个重要方面，且由于风矢量的瞬变特
264 征以及受局地地形等要素影响明显，也是预报中的难点。结合业务预报中最为
265 关注的极大风，下文通过“利奇马”影响过程极大风速实况和各试验逐小时预报
266 10 m 风的对比来评估谱逼近方案的影响。对比 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10
267 日 20 时 10 m 极大风实况和各试验模拟逐 1h 的 10 m 风速最大值空间分布显示
268 （错误！未找到引用源。5）：各试验能基本预报出台风大风的空间分布特征，
269 内陆风力预报存在普遍高估，而沿海风力存在低估。谱逼近后，浙西南内陆（图
270 中粗虚线所示）风速高估得到较好订正（图 5c），沿海地区尤其是浙北沿海海面
271 风力低估得到普遍修正。全省平均而言，谱逼近前后风速均方根误差从 5.04m/s
272 降到 4.42m/s，相关系数则从 0.85 升到 0.89，分别改进 12.3%和 5%。即最佳谱
273 逼近试验 10 m 风力预报更接近实况，更具参考价值。



274 图 5 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时 10 m 极大风实况和各试验模拟逐 1h 的最大
275 10 m 风速的对比（单位：m s⁻¹）：(a)实况，(b)控制试验 CTL，(c)最佳谱逼近试验 SNL10；
276 图中黑色粗虚线方框示意差异较明显的浙西南地区。

Fig.5 The observed extreme wind speed and simulated maximum hourly wind speed at 10 m above surface (units: m s^{-1}) from 0800 BJT 9 August to 0800 BJT 11 August 2019: (a) observation, (b)CTL and (c)SNL10. The dashed rectangle ($30^{\circ}\text{N}\sim 31^{\circ}\text{N}$, $119.2^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$) in each panel denotes the south-west region of Zhejiang province (SWR), wherein the major wind and precipitation difference occurred between CTL experiment and SNL10 experiment.

2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时逐 3 h 各试验模拟的 10 m 风评估表明, 各试验对于全省风力预报时间演变有较好参考价值, 谱逼近对大多数时刻的风力预报强度和分布都有改善。逐 3 h 均方根误差变化显示 (图 6a), 大多数时刻谱逼近试验的均方根误差均小于控制试验, 平均而言, 均方根误差从 4.70 m/s 减低至 4.30 m/s, 误差改进了 8.5%。同样, 逐 3 h 空间相关系数变化给出 (图 6b), 谱逼近后“利奇马”台风风力的分布得到基本改善, 平均相关系数从 0.80 提升到了 0.83, 改善率为 3.7%, 最大改善率达 10%。此外, 进一步分析 8 级 ($\geq 17.2 \text{ m/s}$) 以上的大风累计检验评分也看到 (图 6c-d), 谱逼近试验提升了绝大多数时刻的统计评分, 平均 TS (ETS) 从 0.61 (0.53) 增加到了 0.65 (0.57), 改进率为 6.1% (8.0%), 最大改进率达 15.3% (20.8%)。

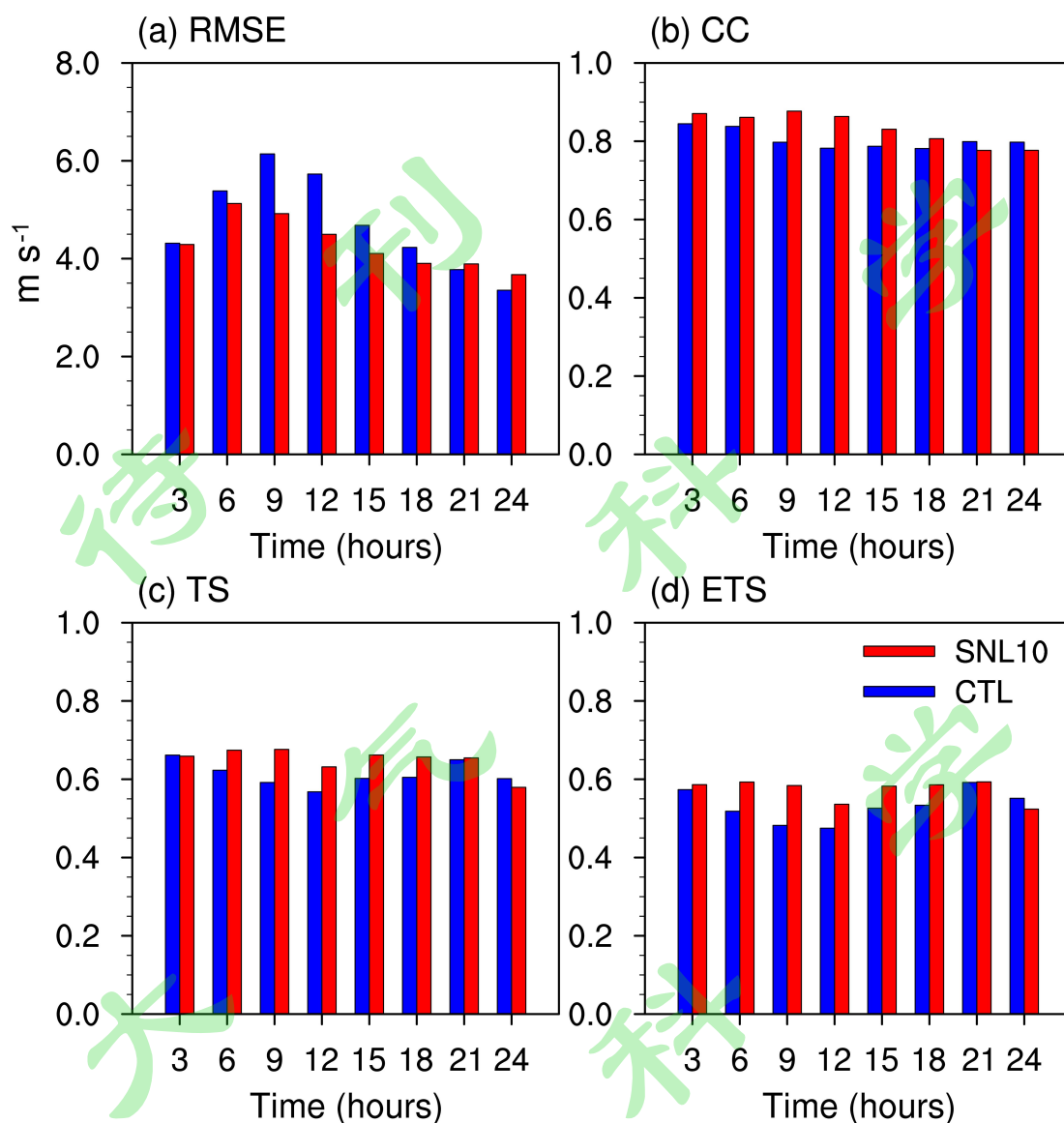


图 6 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时逐 3 h 控制试验(蓝柱)和最佳谱逼近试验(红柱)模拟 10 m 风的均方根误差(a), 空间相关系数(b)和 8 级以上大风 ($\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$) 的 TS(c) 和 ETS(d) 评分。

Fig.6 The comparison of the (a) RMSE, (b) SPCC, (c) threat score (TS), and (d) equitable threat score (ETS) of wind speed at 10 m above surface (units: m s^{-1}) from 0800 BJT 9 August to 0800 BJT 11 August 2019 between CTL (blue bar) and SNL10 (red bar) experiment. Strong wind is verified with the threshold of 17.2 m s^{-1} in (c and d).

结合台风风力结构知道, 台风大风圈是导致地面 10m 强风的直接原因, 谱逼近后浙江省“利奇马”风力预报改进主要与其路径及大风圈修正有关。谱逼近后“利奇马”路径明显向东修正使得相应强风区随之东移, 浙西南地区因为远离了台风中心实现了高估风力的修正; 同时, 强风区的东移使得浙江近海靠

近了台风中心实现了低估风力的改善。

4.4 对降水预报的影响

图 7 给出了 2019 年 8 月 8 日 20 时至 8 月 11 日 20 时的 72h 累计过程雨量实况和模拟。从降水实况可知（图 7a），“利奇马”造成的浙江降水中心主要有 7 个代表站，分别是浙东的括苍山（KC）和石梁镇（SL），浙西北的江南天池（JN）和照君岩（ZJ），还有浙西南的下西坑村（XX）、石屏村（SP）和郑地村（ZD）。结合图 1b 地形分布可知，上述降水中心与浙江括苍山、天台山、天目山、千里岗、仙霞岭、洞宫山等山脉相联系，可见地形对于“利奇马”台风降水增幅有重要影响（Smith et al., 2009; Dong et al., 2010; 段晶晶等, 2017）。对比两个试验可见（图 7b-c）：伴随台风路径的修正，谱逼近将控制试验的雨区整体往东修正，特别是原来控制试验在浙西南地区（粗虚线所示）及其 3 个降水中心的高估降水得到了显著修正，降水预报更加接近实况。定量统计也得到，控制试验、最佳谱逼近试验与实况的相关系数（均方根误差）分别为 0.48（124.62 mm）和 0.73（86.38 mm），即谱逼近后相关系数（均方根误差）的改进率达 52.1%（30.7%）。强降水累加统计检验分析得到，100 mm 以上降水的 TS（ETS）评分从 0.69（0.12）提高至 0.82（0.49），增幅率 18.8%（308.3%）；250 mm 以上降水的 TS（ETS）评分也由 0.34（0.22）增高至 0.48（0.39），改进率为 44.1%（77.3%）。

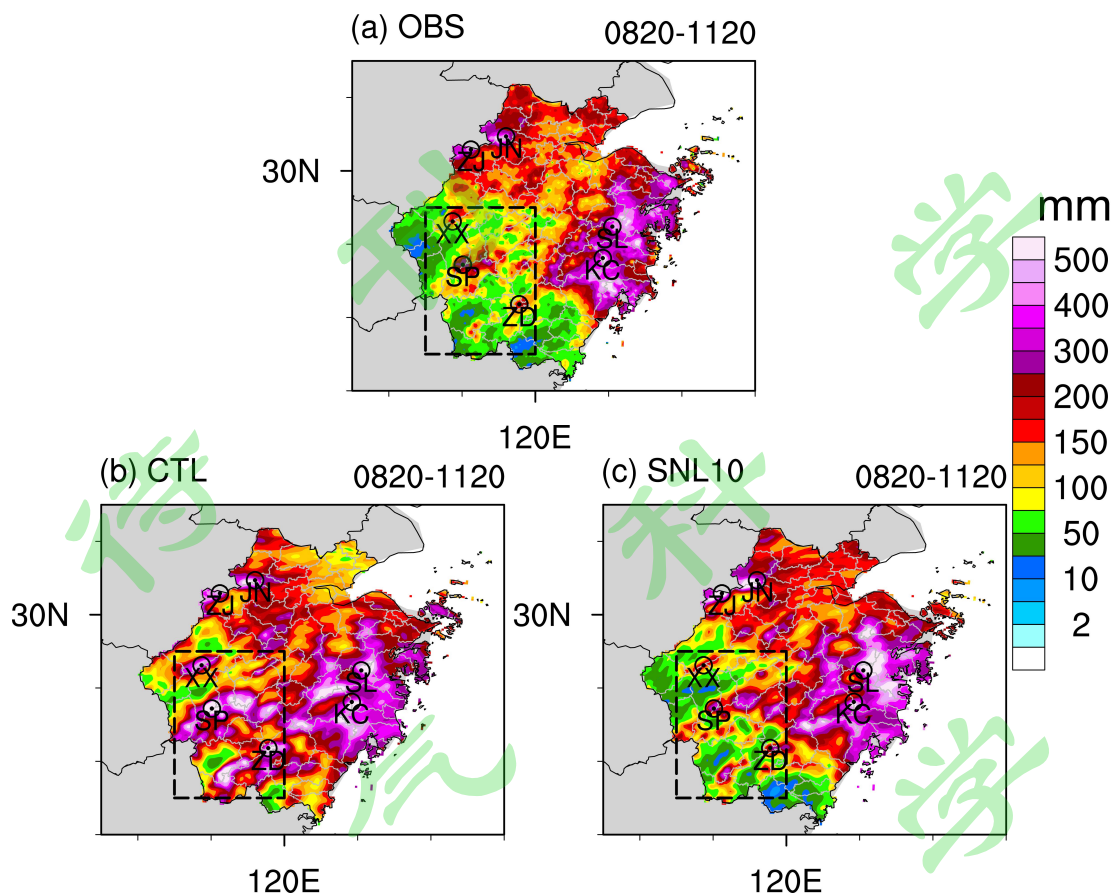


图 7 2019 年 8 月 8 日 20 时至 8 月 11 日 20 时 72 h 累计降水的实况和模拟 (单位: mm): (a)实况, (b)控制试验和(c)最佳谱逼近试验。粗黑虚框线示意同图 5; 点圈标记及字符标识同图 1b。

Fig.7 The comparison of 72h accumulated precipitation (unit: mm) from 2000 BJT 8 August 2019 to 2000 BJT 11 August 2019: (a) observation, (b) CTL and (c) SNL10 experiments. The same dashed rectangle as Fig.5, the same marks and texts of stations as Fig.1b.

分析台风影响期间浙江逐 24h 累计降水变化显示, 谱逼近试验对于降水的主要改进发生在 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时最强 24h 累计降水时段。分析降水实况及各试验模拟误差显示 (图略), 谱逼近后浙西南地区降水高估得到显著改进, 其中石屏村 (SP) 的降水改进幅度超过 300 mm。全省统计平均得到: 谱逼近后均方根误差从 87.40mm 降至 62.46mm, 减少率 28.5%; 空间相关系数也从 0.43 升至 0.76, 增幅比为 76.7%。降水分级累加检验结果表明 (图 8): 谱逼近对于大雨以上降水均有明显改进。其中暴雨 (大暴雨) 以上级别的 TS 评分从 0.76 (0.48) 增加到 0.85 (0.65), 改进率为 11.8% (26.2%)。类似的, 大雨、暴雨、大暴雨 ETS 评分各提升了 0.25、0.37 和 0.25。

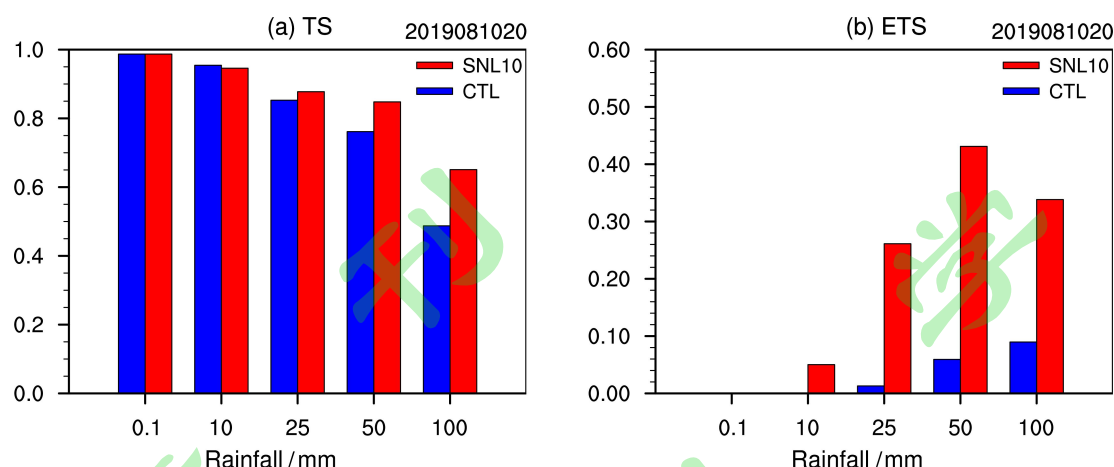


图 8 控制试验（蓝柱）和最佳谱逼近试验（红柱）对 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时各量级 24h 累计降水预报评分对比：(a)TS 和(b)ETS 评分。

Fig.8 The comparison of the (a) TS, (b) ETS of 24h accumulated rainfall with the thresholds of 0.1 mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm and 100 mm from 2000 BJT 9 August to 2000 BJT 11 August 2019 between CTL (blue bar) and SNL10 (red bar) experiment.

评估各试验登陆期间（2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时）逐 3h 累计降水演变看到：与风力相似，谱逼近对绝大多数时次短时降水预报有明显改进（图略），对于“利奇马”台风期间的最强 3 h 短时降水改进显著。谱逼近后所有时次的均方根误差都有下降，最大降幅出现在最强 3h 降水发生阶段——即台风刚刚登陆后的 10 日 02 时至 05 时，均方根误差从 30.98mm 降至 24.51mm，登陆期间平均 RMSE 从 20.80mm 降到 17.98mm。逐 3h 空间相关系数的变化表明谱逼近改进了绝大多数时刻降水的空间分布，最强 3h 降水 SPCC 从 0.11 提升至 0.48,平均 SPCC 从 0.34 升至 0.55。短时降水累加检验结果也表明：谱逼近对绝大多数时刻的短时降水预报性能有提升作用。短时暴雨以上级别的平均 TS (ETS) 评分从 0.29 (0.13) 增加到 0.35 (0.20),其中 10 日 05 时最强 3h 降水 TS (ETS) 评分从 0.34 (0.07) 增至 0.45 (0.24)。

如前所述，谱逼近对浙西南降水高估改进显著。针对登陆期间（2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时）浙西南地区 3 个降水中心下西坑村（XX，图 9a）、石屏村（SP，图 9b）和郑地村（ZD，图 9c）单站逐 1h 降水实况和模拟的演变分析也得到，谱逼近后降水更加接近实况，动力谱逼近技术提升了“利奇马”的精细降水预报性能。降水演变显示，谱逼近对大多数时次降水预报有明显改进，控制试验降水高估得到修正。3 站均方根误差从 15.7 mm、23.7 mm 和 15.6 mm

下降至 7.6 mm，9.1 mm 和 7.3 mm，下降幅度约一半。此外，单站降水随时间的演变趋势也多是正效应，3 站平均改进率为 28.3%。

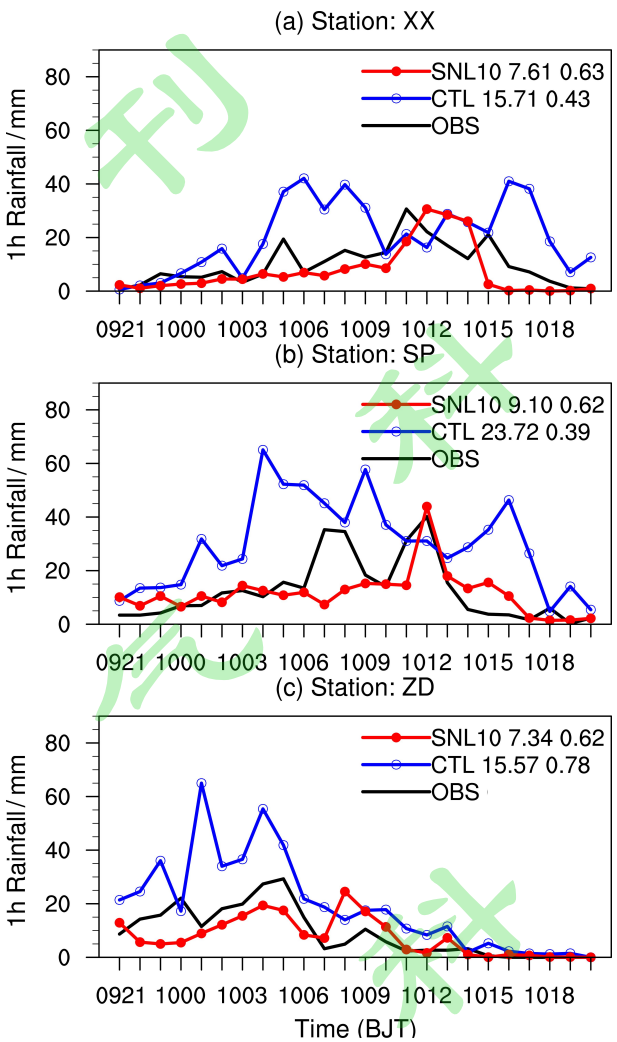
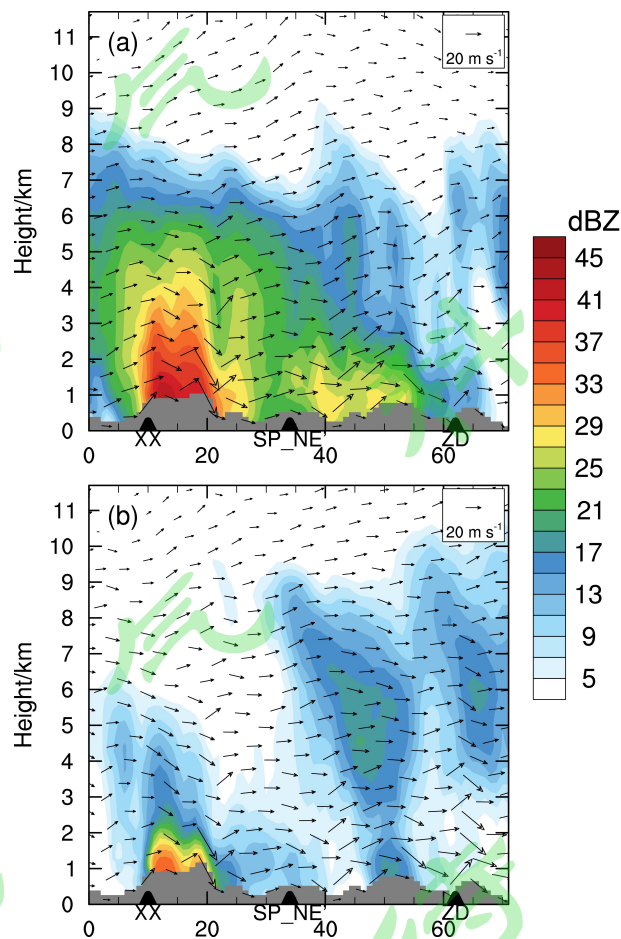


图 9 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时各试验副降水中心逐 1h 累计降水模拟（蓝色空心圆线示意 CTL 和红色实心圆线示意最佳试验 SNL10）和实况（黑色实线）：(a)下西坑村（XX），(b)石屏村（SP）和(c)郑地村（ZD）。图注中各模拟试验名称后的数值依次表示该站点 1h 降水预报的均方根误差（单位：mm）和相关系数。

Fig.9 Hourly evolution of the observed and simulated 1h accumulated precipitation (unit: mm) at rainfall centers: (a) XX, (b)SP and (c) ZD from 0800 BJT 9 August to 0800 BJT 11 August 2019, from observation (black line), experiment CTL (blue line) and SNL10 (red line). The values behind the name of test in the legend denote the RMSE and CC of each experiment in turn.

浙西南降水雨高估的改进过程如何？一方面，与 10m 风类似，台风路径修正正是降水改进的前提，台风位置的东调使得台风强降雨区大体东调。但浙西南降水中心的位置却不变，说明浙西南山地的局地抬升作用对于降水增幅有重要贡

375 献（钮学新等，2005；冀春晓等，2007）。分析 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10
376 日 20 时平均的雷达组合反射率因子观测和各试验预报表明（图略），谱逼近对
377 控制试验高估的雷达组合反射率因子进行了订正，与观测更为接近。与降水类
378 似，下西坑村（XX）、石屏村（SP）和郑地村（ZD）3 站也是雷达组合反射率
379 因子的相对高值中心。过下西坑村（XX）和郑地村（ZD）的雷达反射率因子、
380 水平风场和垂直速度的垂直剖面看到（图 10）：总体上，控制试验的低层风速强
381 于谱逼近试验，不难推论，由地形迎风坡抬升作用引起的上升作用也更强（Wu
382 et al., 2002；董美莹等，2011），形成雨水水凝物更多，易导致地面降水高估。
383 比如，控制试验中下西坑村（XX）站附近低层最大的雷达反射率因子达 40 dBZ
384 （图 10a），而谱逼近后只有 32 dBZ（图 10b）；前者 28 dBZ 的反射率因子伸展
385 至 4 km 高度，后者不到 2 km。



386
387 图 10 各试验模拟 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时逐小时雷达基本反射率因子和风
388 场的 24h 时间平均沿浙西南副降水中心附近（图 1b 中蓝线 AB）垂直剖面：(a)控制试验 CTL
389 和(b)最佳谱逼近试验 SNL10；彩色阴影为雷达三维反射率因子(单位: dBZ)，箭头标示沿剖

面方向的水平风(单位: m s^{-1})和垂直风(单位: 0.2 m s^{-1})的矢量, 横坐标上黑色三角形标示下
西坑村 (XX)、石屏村东北侧 (SP_NE) 和郑地村 (ZD) 的附近位置
Fig. 10 Cross sections of the simulated 24h-mean three-dimensional reflectivity (shaded, units:
dBZ), horizontal wind along to AB line (vector, units: m s^{-1}) and vertical velocity (vector, units:
 0.2 m s^{-1}) from simulated experiments (a)CTL and (b)SNL10. Black triangle represents the
location of XX station, the north-east of SP station and ZD station.

分析单站要素变化有助于进一步了解谱逼近的改进过程。对石屏村 (SP)
单站各物理量垂直廓线分析显示 (图 11): 由于台风路径的修正, 谱逼近后对流
层中低层水平风场全风速普遍低于控制试验 (图 11a), 例如在 2 km 高度的极大
值为 23 m/s, 比控制试验低了 6 m/s。根据地形强迫垂直运动的形成原理, 如图
11b-c 所示, 近地层风速降低会导致水平辐合和垂直上升运动的减弱; 从而形成
水凝物减少, 即雷达反射率因子的整体降低 (图 11d), 在 5 km 高度以下各层次,
谱逼近试验的雷达反射率因子比控制试验约低了 8 dBZ; 最终使得降水高估得到
了改进。

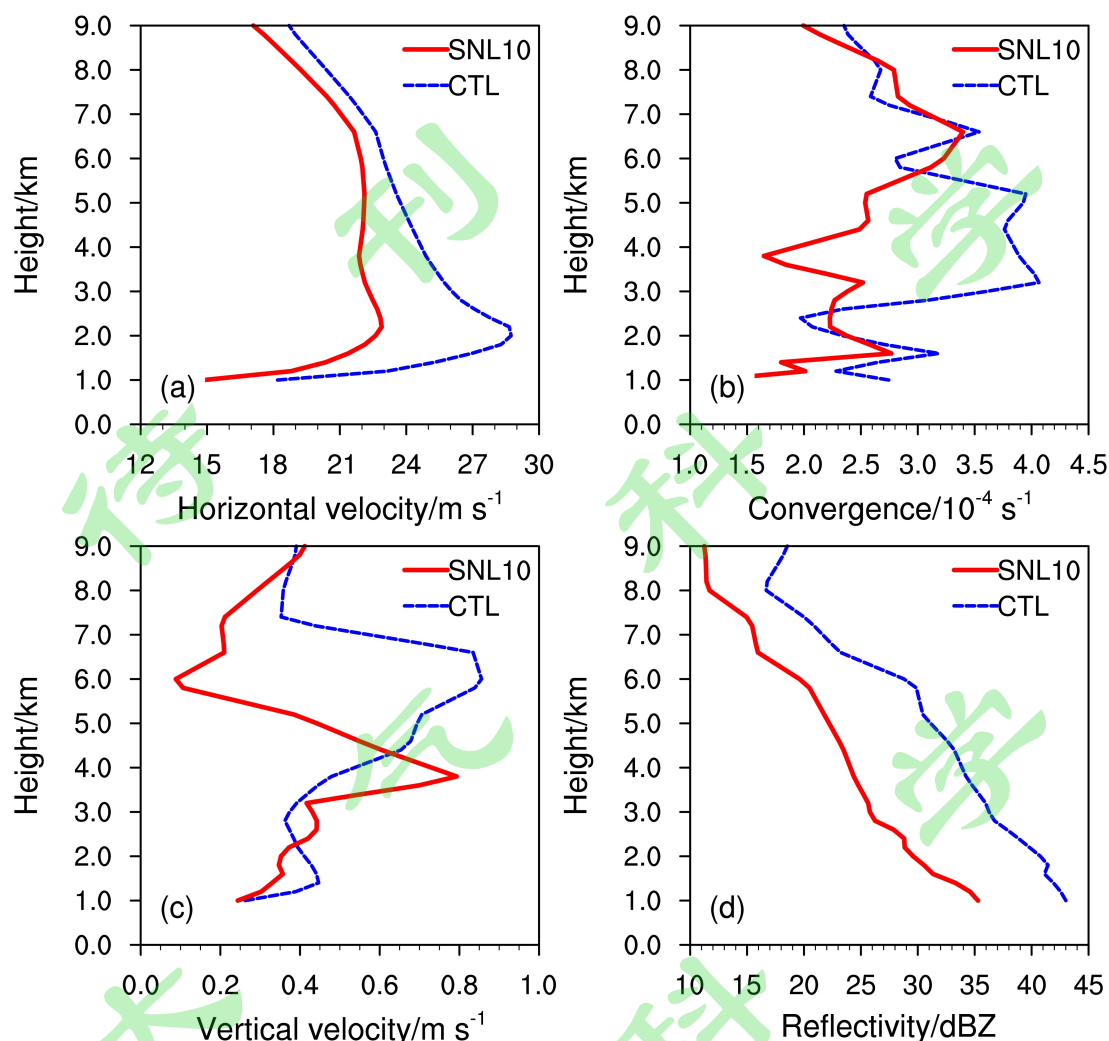


图 11 2019 年 8 月 9 日 20 时至 8 月 10 日 20 时各试验石屏村（SP）副降水中心附近逐小时模拟变量的时间平均垂直廓线：(a)水平全风速(单位: m s^{-1}), (b)水平辐合(单位: 10^{-4} s^{-1}), (c)垂直运动(单位: m s^{-1})和(d)雷达三维反射率因子(单位: dBZ); 蓝色虚线和红色实线分别标示控制试验 CTL 和最佳谱逼近试验 SNL10。

Fig.11 Vertical profiles of the 24h-mean simulated variables at the SP station from 2000 BJT 8 August 2019 to 2000 BJT 11 August 2019: (a) horizontal velocity (units: m s^{-1}), (b) horizontal convergence (units: s^{-1}), (c) vertical velocity (units: m s^{-1}) and (d) three-dimensional reflectivity (shaded, units: dBZ) for experiment CTL (blue dashed line) and SNL10 (red solid line).

5 结论和讨论

为改进高分辨率区域数值天气预报模式性能，本文基于高质量的 ECMWF 全球预报模式产品和动力谱逼近方法技术优势，着重探讨了 ECMWF 驱动场水

平风场谱逼近对超强台风“利奇马”路径、强度以及浙江精细化风雨预报性能的影响。得出以下初步认识：

(1) 动力谱逼近对于台风强度影响较小，对于路径预报修正明显。谱逼近对 18h 至 72h 的“利奇马”台风路径预报有较好改善，72 h 平均路径误差比控制试验减小约 35 km，逐小时路径误差最多可降 80 km；不同边界层垂直层次谱逼近的改进效果有一定差异，总体上模式层第 10 层及以上（约 800 hPa 高度）谱逼近试验路径和强度预报最佳。谱逼近对于浙江省境内路径的明显改进是通过同时修正南风 and 东风引导气流的低估来订正了移速偏慢和移向偏西误差。

(2) 谱逼近对于对流层整层的要素强度和分布预报均有较好订正。对于各要素的均方根误差改进率多在 20% 以上，最大改进层次位于对流层中层，其中高度场、纬向风和经向风的改进率在 30% 以上；空间相关性的增幅率多在 5-10%，800 hPa 以上层次更明显，各要素中相对湿度改进最明显，增幅率多在 20% 以上。这些改进与台风引导气流修正相一致。

(3) 谱逼近对于浙江“利奇马”过程极大风和风力演变有明显改善作用。一方面，谱逼近使得浙江内陆特别是浙西南地区的风速高估和沿海地区尤其是浙北沿海风力低估都得到较好订正，谱逼近后风速均方根误差和相关系数分别改进幅度为 12.3% 和 5%。另一方面，谱逼近对逐 3 h 预报的 10 m 风强度和分布都有改进，其中 8 级（ ≥ 17.2 m/s）以上的大风累计检验 TS（ETS）评分平均改进率为 6.1%（8.0%），最大改进达 15.3%（20.8%）。10m 风精细分布的改进主要源自谱逼近对台风路径及大风圈的修正。

(4) 谱逼近对于浙江“利奇马”过程累计降水、最强日降水、3 h 累计降水乃至浙西南地区降水中心的小时降水均有明显改进。过程累计降水、最强日降水、3 h 累计降水的均方根误差改进幅度多在 25% 以上，暴雨以上强降水的 TS（ETS）评分改进幅度可达 20%；对于浙西南地区 3 个降水中心单站小时降水的高估有显著修正，3 站均方根误差均下降了约一半，平均改进率为 55.5%。浙西南地区“利奇马”精细化降水的改进与谱逼近后台风路径和强度修正、近地层高估风力订正及浙西南山地的局地降水增幅作用减弱有关。

综合上述分析，梳理谱逼近改进浙江台风精细化预报的主要物理过程如下（图 12）：首先，水平风场动力谱逼近修正了对流层整层的各要素分布和强度。

然后，一方面，各要素预报改进订正了台风引导气流和近地面风场，进而改进了台风路径、强度和大风圈，最终修正了地面 10 m 风场预报；另一方面，各要素预报也改进了降水环境场条件，结合台风路径、强度预报和近地面风场等修正，使得浙西南地区及降水中心附近局地的地形强迫辐合作用减弱、强迫上升运动减弱和水凝物形成减少，最终订正了地面高估降水。

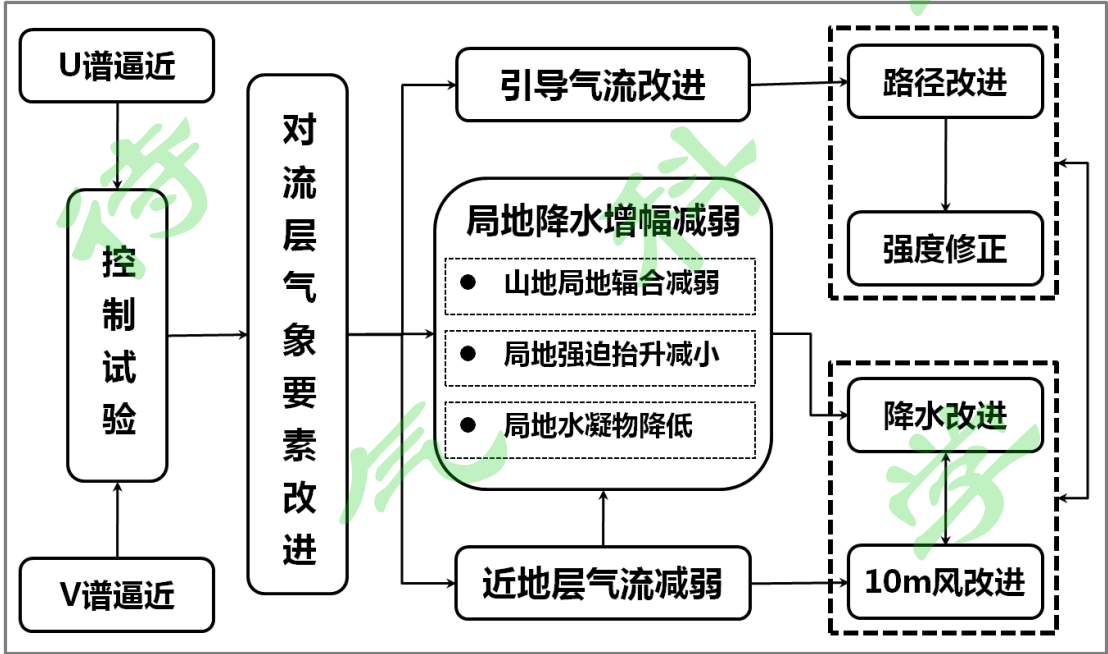


图 12 动力谱逼近对台风精细化预报的改进过程

Fig.12 The improvement process of typhoon fine prediction through dynamical spectral nudging technique.

本文研究进一步验证了谱逼近技术在短期天气高分辨区域数值预报业务中的较好应用价值（Cha and Wang, 2013；王淑莉等，2016；董美莹等，2019）。本研究一方面是谱逼近技术在台风高影响天气精细化数值预报适用性的深入探究，另一方面是对 ECMWF 全球预报模式分析及预报资料应用的进一步挖掘。然而，本研究是个例研究结果，上述结论有待更多预报试验的开展验证。此外，谱逼近方案中关键参数设计对于不同天气系统可能有所差异，这些工作有待后续研究开展。

参考文献 (References)

- Cha D H, Lee D K . 2009. Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114(D14108): 1–17.
- Cha D H, Wang Y. 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 964–986.
- 陈锋, 董美莹, 冀春晓, 等. 2012. WRF 模式对浙江 2011 年夏季降水和温度预报评估及其湿过程敏感性分析 [J]. *浙江气象*, 33(3): 3–12. Chen Feng, Dong Meiying, Ji Chunxiao, et al. 2012. Evaluation of precipitation and temperature forecast in Summer 2011 in Zhejiang province by WRF model and its sensitivity analysis of wet physical process [J]. *Zhejiang Provincial Meteorology (in Chinese)*, 33(3): 3–12. doi:10.3969/j.issn.1004–5953.2012.03.002.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Weather Rev.*, 129(4), 569–585.
- 陈国民, 张喜平, 白莉娜, 等. 2019. 2017 年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定 [J]. *气象*, 45(4): 577–586. Chen Guomin, Zhang Xiping, Bai Lina, et al. 2019. Verification on Forecasts of Tropical Cyclones over Western North Pacific and South China Sea in 2017 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 45(4): 577–586.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋热带气旋概论 [M]. 北京: 科学出版社, 31–63. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. The introduction to typhoons over northwest Pacific [M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 31–63.
- 陈联寿, 端义宏, 宋丽莉, 等. 2012. 气象灾害丛书: 台风预报及其灾害 [M]. 北京: 气象出版社, 21–43. Chen Lianshou, Duan Yihong, Song Lili, et al. 2012. Meteorological Disasters Series: Typhoon Forecast and Its Disasters [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 21–43.
- Choi S J, Lee D K. 2016. Impact of spectral nudging on the downscaling of tropical cyclones in regional climate simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(6): 730–742.
- 邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响 [J]. *大气科学*, 29(3): 417–428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. The Experiments of

the Boundary Layer Schemes on Simulated Typhoon Part I. The Effect on the Structure of Typhoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2005, 29(3): 417–428. doi: 10.3878/j.issn.1006–9895.2005.03.09.

丁金才. 1995. 天气预报评分方法评述 [J]. 南京气象学院学报, 18(1): 143–150. Ding Jincai. 1995. An overview on verification methods of weather prediction [J]. Journal of Nanjing Meteorological Institute (in Chinese), 18(1): 143–150.

董美莹, 陈锋, 冀春晓. 2019. 不同要素谱逼近对高分辨区域数值模式梅雨模拟的改进 [J]. 气象, 45(5): 593–605. Dong Meiyong, Chen Feng, Ji Chunxiao. 2019. Improving the Meiyu Simulation Using Spectral Nudging of Single Element and Multi Element in High Resolution Regional Numerical Model [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(5): 593–605.

董美莹, 陈联寿, 程正泉, 等. 2011. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究 [J]. 高原气象, 30(3): 700–710. Dong Meiyong, Chen Lianshou, Li Ying, et al. Numerical Study of Topography Effect on Rainfall Reinforcement Associated with Tropical Cyclone 'Talim' [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(3): 700–710.

Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al. Rainfall Reinforcement Associated with Landfalling Tropical Cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 2010, 67(11): 3541–3558.

Dong M Y, Ji C X, Chen F, et al. 2019. Numerical Study of Boundary Layer Structure and Rainfall after Landfall of Typhoon Fitow (2013): Sensitivity to Planetary Boundary Layer Parameterization [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(4): 431–450. doi: 10.1007/s00376–018–7281–9.

端义宏, 方娟, 程正泉, 等. 2020. 热带气旋研究和业务预报进展—第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会 (IWTC-9) 综述 [J]. 气象学报, 78(3): 537–550. Duan Yihong, Fang Juan, Cheng Zhengquan, et al. 2020. Advances and trends in tropical cyclone research and forecasting : An overview of the ninth World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-9) [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 78(3): 537–550. doi:10.11676/qxxb2020.050.

段晶晶, 钱燕珍, 周福, 等. 2017. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究 [J]. 气象, 43 (6): 686–695. Duan Jingjing, QianYanzhen, Zhou Fu, et al. 2017. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused

by typhoon Chan-Hom [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 43 (6): 686–695,
doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2017.06.005.

Gotway J H, Holland L, Brown B, et al. 2009. Model Evaluation Tools Version 2.0 User’s Guide.
Developmental Testbed Center, Boulder, Colorado, USA. (<http://www.dtcenter.org/met/users/docs/overview.php> [2017–07–09]).

Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the
bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 132(1): 103–120.

Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of
entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134(9), 2318–2341.

Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse
gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J Geophys Res, 113(D13),
D13103, doi:10.1029/2008JD009944.

冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值
模拟试验 [J]. 大气科学, 31 (2): 233–244. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al.
2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon
Rananim during landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2):
233–244, doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2007.02.05.

Jimenez P A, Dudhia J, Gonzalez-Rouco J F, et al. 2012. A revised scheme for the WRF
surface layer formulation [J]. Mon. Wea. Rev., 140: 898–918.
doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1.

雷小途, 余晖. 2015. WMO 登陆台风预报示范项目研究进展 [J]. 气象科技进展, (02): 18–23.
Lei Xiaotu and Yu Hui. 2015. The Progress of WMO Typhoon Landfall Forecast
Demonstration Project [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese),
(02): 18–23.

Miguez-Macho G, Stenchikov G L, Robock A. 2004. Spectral nudging to eliminate the effects of
domain position and geometry in regional climate model simulations [J]. J. Geophys. Res.
Atmos., 109(D13104): 1–14.

- Miguez-Macho G, Stenchikov G L, Robock A. 2005. Regional Climate Simulations over North America: Interaction of Local Processes with Improved Large-Scale Flow [J]. *Journal of Climate*, 18(8): 1227–1246.
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 2005. 0216 号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验 [J]. *气象学报*, 63(1): 57–68. Niu Xuexin, Du Huiliang, Liu Jianyong. 2005. Numerical Simulation test of No. 0216 Typhoon Precipitation and its influencing precipitation mechanism [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63(1): 57–68.
- 邱金晶, 陈锋, 董美莹, 等. 2015. 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估 [J]. *气象科技进展*, 5(6): 6–12. Qiu Jinjing, Chen Feng, Dong Meiying, et al. 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF–ADAS rapid refresh system [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 5(6): 6–12. doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2015.06.001.
- Shan Haixia, Guan Yuping, Huang Jianping. 2012. Effects of spectral nudging on the 2010 East Asia summer monsoon using WRF mode [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30(6): 1105–1115.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN–475 + STR, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Smith R B, P Schafer, D J Kirshbaum, et al. 2009. Orographic enhancement of precipitation inside Hurricane Dean [J]. *J. Hydrometeor.*, 10(3): 820–831.
- 宋寔, 汤剑平. 2011. 谱逼近方法在东亚夏季降水区域模式模拟中的适用性研究: 区域大小和位置的影响 [J]. *气象学报*, 69(2): 297–309. Song Shi, Tang Jianping. 2011. An application of the spectral nudging technique to the simulation of summer precipitation over East Asia using a regional climate model: The impact of domain size and position [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 69(2): 297–309.
- Tanya L Spero, Martin J O, Jared H B, et al. 2014. Improving the representation of clouds, radiation, and precipitation using spectral nudging in the Weather Research and Forecasting model [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(20): 11, 682–11, 694.

- Tang J P, Song S, Wu J. 2010. Impacts of the spectral nudging technique on simulation of the East Asian summer monsoon. *Theor. Appl. Climato.* [J]. 101(1–2): 41–51, doi: 10.1007/s00704–0090202–1.
- von S H, Langenberg H, Feser F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128(10): 3664–3673.
- Waldron K M, Paegle J, Horel J D. 1996. Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 529–547.
- 王淑莉, 徐祥德, 康红文, 等. 2016. 应用谱逼近方法模拟 2008 年初南方持续性降水过程及其水汽通道周期特征分析 [J]. *大气科学*, 40(3): 476–488. Wang Shuli, Xu Xiangde, Kang Hongwen, et al. 2016. The simulation of continuous rainfall over South China in early 2008 with the spectral nudging method and the periodicity characteristics of the water vapor channel [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(3): 476–488. doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1507.14332.
- 王叶红, 赵玉春. 2020. 边界层参数化方案对“莫兰蒂”台风 (1614) 登陆阶段影响的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 44(5): 935–959. Wang Yehong, Zhao Yuchun. 2020. Numerical Investigation of the Effects of Boundary Layer Parameterization Schemes on Typhoon Meranti (1614) Landing Process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(5): 935–959. doi: 10.3878/j.issn.1006–9895.2004.19135.
- Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al. 2002. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect [J]. *Weather and Forecasting*, 17(5): 1001–1015.
- 许变, 董美莹, 陈锋. 2017. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究 [J]. *气象与环境学报*, 33(1): 34–43. Xu Luan, Dong Meiying, Chen Feng. 2017. Comparison study of spatial interpolation methods based on hourly precipitation data from automatic weather stations [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 33(1): 34–43.
- 曾先锋, 周天军. 2012. 谱逼近方法对区域气候模式性能的改进: 不同权重函数的影响 [J]. *气象学报*, 70(5): 1084–1097. Zeng Xianfeng, Zhou Tianjun. 2012. Impact of the spectral nudging on the simulation of a regional climate model: Different weight function [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(5): 1084–1097.

Zhang F, Pu Z, Wang C. 2017. Effects of boundary layer vertical mixing on the evolution of
hurricanes over land [J]. Mon. Wea. Rev., 145(6): 2343–2361.

Zhang F, Pu Z. 2017. Effects of vertical eddy diffusivity parameterization on the evolution of
landfalling hurricanes [J]. J. Atmos. Sci., 74(6): 1879–1905.

浙江省气象科学研究所. 2020. 数值模式统一检验评估年报(2019) [R], 11. Zhejiang
Institute of Meteorological Science. 2020. Annual verification report of numerical
weather predictions over Zhejiang province in 2019 [R], 11.

Impact Study of Spectral Nudging Technique Driven by ECMWF Data on the Fine Numerical Prediction of Super Typhoon Lekima (2019) in Zhejiang Province

Dong Meiyong, Chen Feng*, Qiu Jinjing, Ji Chunxiao

(Zhejiang Institute of Meteorological Sciences)

Abstract

To improve the performance of high-resolution regional numerical model, based on both advantages of high accuracy forecasting data from European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) and spectral nudging (SN) technique, the impact from spectral nudging (SN) technique driven by ECMWF data on the fine prediction of super typhoon Lekima (2019) in Zhejiang province are investigated by the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The results show that: (1) The contribution of SN to track of Lekima is obvious, for instance, the maximum hourly track errors can be reduced about 80 km. (2) In Zhejiang province, the Fine predictions of gale and heavy rainfall induced by Lekima (2019) are largely improved through SN technique. Compared to the control experiment, the increased percentage of ETS score of strong wind larger than 17.2 m/s is about 8% in mean and 20.8% in maximum. At the same time, the increase rate of TS scores of heavy rainfall with threshold as 50 mm/24h (100 mm/24h) reaches 11.8% (26.2%). (3) Further diagnosis illustrates that wind field spectral nudging can amend efficiently the west deviation of typhoon track and the over-prediction of strong wind as well as the heavy rainfall in southwest of Zhejiang province, which are related with the improvements in all atmospheric elements in troposphere, steering flow of Lekima, low-level wind field and resulted rainfall enhancement effect by local topography.

Key words: ECMWF; Spectral nudging; Regional numerical model; Typhoon; Fine numerical prediction