

利用地面格点 Nudging 改进华南前汛期 暖区强降水的数值预报*

郑宇豪¹ 尹金方^{1, 2, 3} 许先煌¹ 李丰¹

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性研究中心, 昆明 650034

³ 中国气象局日喀则国家气象观象台, 日喀则 857000

摘要: 数值模式对华南前汛期暖区强降水的再现能力存在显著的不确定性。2020年5月29日发生在广东省沿海发生了一次暖区强降水事件, 所有数值预报几乎都漏报了此次降水。本研究采用地面格点 Nudging 技术设计了 8 组试验, 探讨了格点 Nudging 地面观测资料对数值模拟结果的影响。结果表明, Nudging 地面全气象要素(控制试验, EXP1)能够较好地再现广东省沿海岸线线状对流的发生发展时空演变及其强降水。Nudging 不同地面要素的敏感性试验表明, Nudging 地面水汽直接决定了对流的触发, 主要是由于 Nudging 地面水汽在 3 小时之内迅速将对流层低层相对湿度从 80% 增加到趋近于饱和(99%), 同时显著降低了对流抑制能、抬升凝结高度和自由对流高度; Nudging 地面温度增大了位温扰动, 增加了热浮力, 一定程度上有助于对流的触发和组织, 未 Nudging 地面温度时对流的发生发展明显滞后, 且对流系统组织较松散; Nudging 地面风场有助于修正近地层西南风风向, 使对流演变和降水量更接近观测。最后开展了 6 组试验探讨了 Nudging 时长对模拟结果的影响, 结果显示 Nudging 地面

收稿日期: 2023 年 5 月; **网络预出版日期:**

作者简介 郑宇豪, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, 主要从事极端降水事件与数值模拟的研究。E-mail: 274305375@qq.com

通讯作者 尹金方, E-mail: yinjf@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金(42075083), 国家重点研发计划(2022YFC3003903)和中国气象科学研究院发展基金(2023KJ047)共同资助。

Funded by National Natural Science Foundation of China (42075083), National Key R&D Program of China (2022YFC3003903), and the S&T Development Fund of Chinese Academy of Meteorological Sciences (2023KJ047).

22 全气象要素 6 小时的模拟效果与控制试验几乎一致，可较好地再现此次暖区强
23 降水过程。尽管水汽在前 3 小时之内迅速增加，但一定时间（3 小时）的水汽
24 维持有助于对流的快速发展。因此，在模式积分前期（6 小时），采用格点
25 Nudging 地面加密观测资料一定程度上可改善华南暖区强降水的数值预报性
26 能。

27 **关键词：**地面格点 Nudging；华南前汛期；暖区强降水；数值预报

28 **Using Surface-grid Nudging to Improve Numerical** 29 **Prediction of Warm-sector Heavy Rainfall Over** 30 **South China During Pre-summer Rainy Season**

31 ZHENG Yuhao¹ YIN Jinfang^{1,2} XU Xianhuang¹ LI Feng¹

32 1 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological*
33 *Sciences, Beijing 100081*

34 2 *Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude*
35 *Plateau, China Meteorological Administration, Kunming 650034*

36 3 *Shigatse National Climatological Observatory, China Meteorological*
37 *Administration, Shigatse 857000*

39 **Abstract** Significant uncertainties exist in the ability of numerical models to
40 reproduce heavy rainfall events over warm sector during the pre-summer rainy season
41 in southern China. One such event occurred with heavy rainfall along the coastal line
42 of Guangdong Province during the period of 29–30 May 2020, and all operational
43 numerical models failed to predict this event at that time. Consequently, eight
44 experiments were conducted to assess the influence of nudging surface-intensive
45 observations into the numerical simulations. The findings reveal that nudging all
46 surface meteorological elements, in what is termed the control experiment (EXP1),
47 reproduces well the development of linear convection and the spatial and temporal
48 evolution of heavy precipitation along the coastline of Guangdong Province.
49 Sensitivity experiments focusing on nudging different surface elements indicate that

50 nudging surface water vapor plays a pivotal role in convection initiation, primarily
51 attributed to the swift escalation of relative humidity from 80% to near saturation
52 (99%) within 3 hours in the low levels, accompanied by a marked reduction in
53 convective inhibition (CIN), lifting condensation level (LCL), and level of free
54 convection (LFC). Nudging surface temperature accentuates thermal buoyancy by
55 amplifying potential temperature perturbations, thereby influencing the initiation and
56 organization of convection. The occurrence and development of convection are
57 considerably delayed in the absence of the nudging surface temperature, and its
58 organization is less structured. Nudging surface wind helps to correct the near-surface
59 southwesterly wind direction, aligning the convection evolution and the rainfall more
60 closely with the observations. Additional six sensitivity experiments were carried out
61 to further explore the impact of nudging duration on simulations. The results suggest
62 that nudging all surface meteorological elements for 6 hours mirrors the outcomes of
63 the control run, effectively reproducing well the heavy rainfall along the coastline.
64 Despite a swift rise in water vapor within the initial 3 hours, the maintenance of water
65 vapor for a certain time (another 3 hours) promotes rapid convection development.
66 Thus, the numerical prediction performance of heavy rainfall in the warm sector over
67 southern China can be improved to a certain extent by nudging surface intensive
68 observations using the surface-grid nudging technique during the initial several (6)
69 hours of model integration.

70

71 **Keywords** Surface-grid nudging, Pre-summer rainy season, Warm-sector heavy
72 rainfall, Numerical weather prediction

73 1 引言

74 华南地区约一半的年降水量发生在前汛期 (Luo et al., 2017)。在此期间,
75 其中一类强降水发生在锋面系统前方 100 公里外的区域, 常称为华南前汛期暖
76 区暴雨 (Sun et al., 2019), 降水主要集中在广东、广西的沿海地区和粤北山区
77 (刘瑞鑫等, 2019)。此类强降水的一个特点是对流没有明显的天气系统, 对流
78 的发生发展受到局地环境因素的影响显著。因此, 数值模式对华南前汛期暖区
79 强降水的数值预报存在明显的不确定性, 如何改进此类强降水的数值预报性能
80 是当前大气科学研究领域重点和难点。

81 已有的研究, 尤其是集合预报, 表明华南暖区对流的形成受到多个方面的
82 影响。地面冷池和南海季风之间的热力差异可导致对流的触发和发展 (Wu and
83 Luo, 2016); 海陆风与南海季风的相互作用可增强海岸辐合, 造成强降水
84 (Chen et al., 2016); 海岸山脉对于边界层气流的阻挡作用为对流触发可提供中
85 尺度抬升条件 (Wang et al., 2014); 山脉地形抬升与环流相互作用形成的辐合线
86 系统是华南沿海暖区暴雨的关键系统, 是华南暖区降水雨强高于锋面降水的原因
87 (王坚红等, 2017); 双低空急流垂直耦合造成的低层辐合和中层辐散可产生
88 较强的中尺度抬升, 有利于对流的触发和发展 (Du and Chen, 2019)。此外, 城
89 市热岛效应加上地形抬升可在城市群地区产生极端强降水 (Yin et al., 2020);
90 南海北部区域湿度场初值误差和海上对流也会对华南沿海中尺度对流系统的发
91 生发展产生影响 (鲁蓉等, 2018)。由于这些复杂而独特的多尺度大气过程, 暖
92 区强降水事件过程难以在模式中被准确表达, 正是暖区定量降水预报 (QPF)
93 技巧相对较差的重要原因之一 (何立富等, 2016; Bao et al., 2021)。

94 Nudging 四维数据同化 (FDDA) 能够有效地改善数值模式的模拟性能
95 (Stauffer and Seaman, 1990; Stauffer and Seaman, 1994; Leidner et al., 2001; Reen
96 et al., 2006)。Nudging 技术在模式预报方程中引入预报和格点分析场或观测之
97 差的倾向项, 使模式结果逐渐向格点分析场或观测值逼近, 有效地减少模式误
98 差同时又保持模式的动态平衡 (Stauffer and Seaman, 1990)。在 WRF 模式中,
99 Nudging 技术包括格点 (分析) Nudging、观测 Nudging 和谱 Nudging, 其中格
100 点 Nudging 又可分为高空格点 Nudging 和地面格点 Nudging。李明妍等
101 (2017) 对中国西北地区夏季降水的模拟试验表明, 格点 Nudging 能改善降水

102 落区和量级的模拟效果。魏蕾和雷恒池（2012）指出 Nudging 加密探空资料的
103 结果更接近观测。与观测 Nudging 类似，地面格点 Nudging 不限制极端温度和
104 极端降水的发生和发展（Bowden et al., 2012）。尹金方等（2022）通过观测和地
105 面格点 Nudging 间接地引入城市热岛效应，合理地再现了广州的城市热岛效应
106 及对流的发生发展及其降水。

107 在地面格点 Nudging 中，模式场向边界层内的地面分析场逼近，Nudging
108 倾向项与每个格点上的模式值和分析值之差成正比。而在观测 Nudging 中，模
109 式场向观测位置给定影响半径和时间窗口内的观测值逼近。可设置地面观测时
110 空权重系数、垂直影响系数、地形附近的各向异性水平权重函数以及 FDDA 观
111 测数据集在更精细的垂直分辨率下改进的质量控制等调整观测 Nudging 效果
112 （Deng et al., 2009）。因此，本研究中根据使用说明，结合模式的分辨率、观测
113 资料的空间密度对 Obsgrid 中参数的设置进行调整。

114 利用地面格点 Nudging 技术，对发生在 2020 年 5 月 29 日广东沿海的一次
115 暖区强降水事件，设计了 8 组模拟试验，基于试验结果探讨了 Nudging 地面水
116 汽、温度和风场对本次华南强降水事件对流触发和发展的影响机制。此外，考
117 虑到全程 Nudging 只适用于历史个例模拟，本研究进一步试验了地面格点
118 Nudging 时长对模拟效果的影响，以期为今后的华南暖区强降水数值预报的改
119 进提供参考。

120 2 数据与方法

121 2.1 观测和再分析资料

122 中国气象局国家气象信息中心提供的区域加密自动气象站（含国家站）逐
123 小时观测用于天气实况分析、模式积分过程中格点 Nudging，以及模式结果检
124 验。地面观测要素包括逐时降水量、2 m 气温、2 m 相对湿度和 10 m 风场。为
125 了评估模式对水凝物的模拟性能，利用广州、深圳、阳江和汕尾四部雷达观测
126 建立了三维组网产品作为参考，用于对流演变分析及模式评估。此外，利用
127 2020 年 5 月 29 日 20:00（北京时间，下同）NCEP-FNL 全球分析资料
128 （<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3> [2023-10-23]）分析降水发生前的大气环流
129 形势，同时利用香港站探空观测分析了此次降水事件前期的大气层结构。

130 2.2 模式配置和试验设置

131 利用 WRF-ARWv4.1.1 模式，采用三层嵌套，水平分辨率分别为 12，4，
132 1.333 km，从外向内的网格点数分别为 313×202 、 571×334 和 703×448 。模式
133 最外层（即 d01）中心经纬度为 22.5°N 和 112°E 。模式垂直网格包含 50 个 η
134 层，模式层顶为 50 hPa。模式初边值为 6 小时间隔和水平分辨率 0.25° 的 NCEP-
135 FNL 分析场，积分时间为 2020 年 5 月 29 日 20: 00 至 30 日 14: 00。物理过程
136 包括 Thompson 云微物理参数化方案 (Thompson et al., 2008)、多尺度 Kain-
137 Fritsch 积云对流参数化方案 (Zheng et al., 2016)、RRTM 长波辐射方案
138 (Mlawer et al., 1997)、Dudhia 短波辐射方案 (Dudhia, 1989)、Mellor-Yamada-
139 Janjic TKE 边界层参数化方案 (Janjić, 1994)、Monin-Obukhov 近地层方案
140 (Janjić, 1994; Janjić, 2002) 和 Noah-MP 陆面模式方案 (Niu et al., 2011)。

141 前期对比试验显示，开启和关闭观测 Nudging 对结果的影响影响较小，未
142 能合理地再现出对流和降水。类似的，仅开启和关闭高空格点 Nudging 的影响
143 可以忽略。地面格点 Nudging 直接决定着对流的发展和后续降水的形成。为
144 此，针对地面格点 Nudging 对华南地区暖区暴雨模拟能力的效果，共设计了 8
145 组试验。Nudging 地面全气象要素的作为控制试验 (EXP1)，EXP2 - EXP8 为
146 Nudging 不同地面要素的敏感性试验。根据 Nudging 地面要素 10 m 风，2 m 温
147 度和湿度的情况，8 组敏感性试验的参数配置如表 1 所示。需要指出的是，本
148 次模拟开启和关闭观测 Nudging 的结果差异很小，所有试验均关闭观测
149 Nudging，只对地面格点 Nudging 的地面要素进行敏感性试验。格点 Nudging 使
150 用的地面格点分析场由 Obsgrid 程序利用模式要素和观测资料输出。鉴于地面
151 格点分析场的质量对 Nudging 的效果有直接影响，本研究对地面格点分析场进
152 行了相应的检验。从模式初始时刻观测和地面格点分析场的对比来看 (图略)，
153 地面格点分析场和观测一致，性能相当于区域高分辨再分析资料 (Yin et al.,
154 2023)。

155

156 表 1 地面格点 Nudging 试验设置。Nudging 地面要素包括 10 m 风，2 m 温度和水汽

157 Table 1. Configurations of surface grid nudging experiments. Nudging surface elements including

158 10 m wind, 2 m temperature, and 2 m water vapor

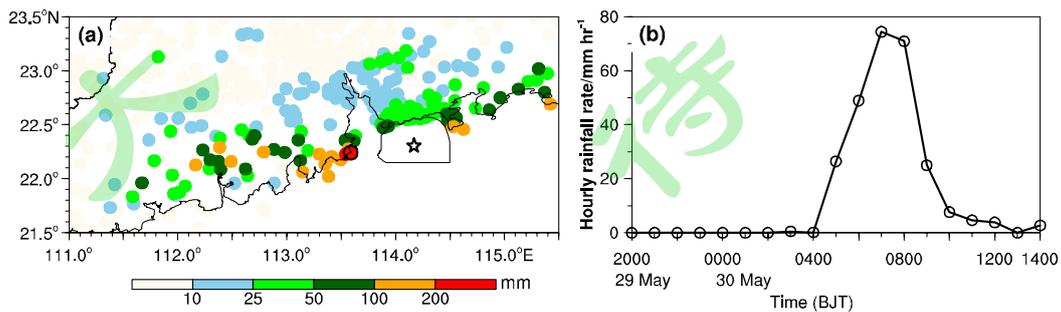
试验名称	2 m 水汽	2 m 温度	10 m 风场
EXP1	开启	开启	开启
EXP2	关闭	关闭	关闭
EXP3	开启	开启	关闭
EXP4	开启	关闭	开启
EXP5	关闭	开启	开启
EXP6	关闭	关闭	开启
EXP7	关闭	开启	关闭
EXP8	开启	关闭	关闭

159

160 3 个例概况

161 3.1 降水特征和对流演变

162 图 1a 显示的是 2020 年 5 月 29 日 20: 00 至 30 日 14: 00 共 18 小时累积观
 163 测降水空间分布。可以看出，降水雨带主要集中在广东省沿海地区，呈西南东
 164 北向分布。珠海市香洲区自动观测站（站号：G1209）观测的累积最大降水量
 165 小时降水量分别为 264.9 mm 和 74.4 mm。尽管本次暖区降水对华南来说不是特
 166 别强，一个显著的问题是业务数值预报几乎完全漏报了降水。观测最大累积降
 167 水和最大小时降水站点的降水率时间演变如图 1b 所示。可以看出，降水量从
 168 04: 00 开始快速增加，至 07: 00 达到顶峰，持续了 1 小时候后快速减弱，2 小
 169 时后降水率较少到 10 mm h⁻¹ 以下。整个过程小时降水超过 20 mm 持续时间了 5
 170 个小时（04: 00 - 09: 00），约占 18 h 累积降水的 83%。

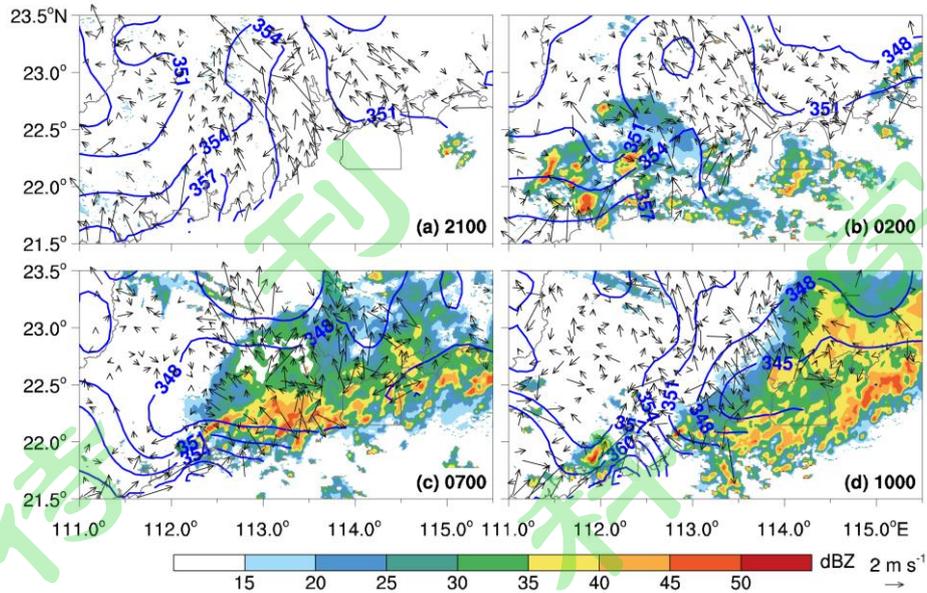


171

172 图 1 (a) 2020 年 5 月 29 日 20: 00 - 30 日 14: 00 (北京时) 共 18 小时观测累积降水空
173 (单位: 毫米) 间分布和 (b) 最大小时降水站 (站号:G1209, 也是最大累积降水站) 降水
174 时间演变 (a) 图中五角星 (☆) 代表香港探空站, 圆形 (○) 代表最大小时降水站点位
175 置

176 Fig. 1 (a) Spatial distribution of 18 h accumulated rainfall (unit: mm) during the period from 20:00
177 on 29 May to 14:00 (Beijing Standard Time) on 30 May 2020. (b) Temporal evolution of hourly
178 rainfall rates for the station (station number: G1209, also of maximum rainfall accumulation)
179 where maximum hourly rainfall was observed. The signs of a star (☆) and a circle (○) in (a)
180 represent the Hongkong sounding station and the maximum hourly rainfall station, respectively
181

182 图 2 显示的是 29 日 21: 00 至 30 日 10: 00 对流系统的时空演变。根据首
183 次出现雷达反射率大于 35 dBZ 为对流触发的定义 (Weckwerth and Parsons,
184 2006), 5 月 30 日 02: 00, 在广东省沿海西部形成了多个分散对流单体, 雷达
185 回波最大值超过 45 dBZ (图 2b)。需要强调的是, 对流的发生发展与地面湿舌
186 相对应 (图 2a, b), 来自南边海洋的暖湿气流相当位温较陆地上大气高 3 K,
187 两者之间的温度梯度有利于暖气团的爬升, 从而触发对流 (Wu and Luo,
188 2016)。对流系统整体沿东北方向移动, 07: 00 形成了沿海岸线的带状分布
189 (图 2c), 但对流系统的组织较为松散。10: 00, 对流系统逐渐减弱, 向东移
190 入海洋 (图 2d)。与对流系统的发展相对应, 随着线状对流系统的逐渐形成,
191 降水逐渐增大, 在 07: 00 达到峰值。在此期间偏南风较小, 这可能是对流系统
192 沿着海岸线发展成线状, 并向东北海岸线传播, 而不是向北进入内陆的原因之一
193 一 (Liu et al., 2018)。



194

195 图 2 观测雷达组合反射率（填色，单位：dBZ）、2 m 相当位温（等值线，单位：K）和 10
 196 m 风场（箭头，单位：m s⁻¹）的时空演变（a）29 日 21: 00, (b) 30 日 02: 00, (c) 07:
 197 00, (d) 10: 00

198 Fig. 2 Observed radar composite reflectivity (shadings, unit: dBZ), 2 m equivalent potential
 199 temperature (isolines, unit: K), superimposed with 10-m surface wind vectors (arrows, unit: m s⁻¹).
 200 (a) 21:00, 29 May, (b) 02:00, 30 May, (c) 07:00, (d) 10:00

201

202 3.2 环流形势

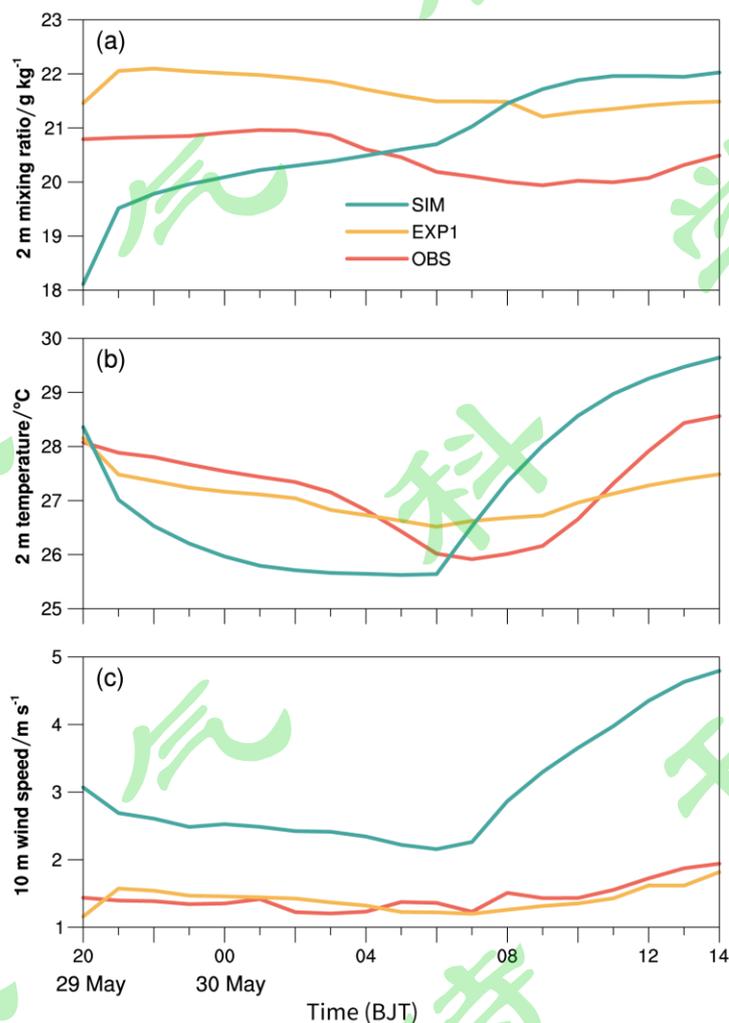
203 2020 年 5 月 29 日 20: 00 的大气环流形势（图略）表明，500 hPa，广东沿
 204 海西北方向较远处有一槽，但对广东沿海地区的直接影响较小。来自南海的大
 205 量水汽输送，使对流触发区域的可降水量超过 62 mm。850 hPa，对流触发区域
 206 以北的风速超过 10 m s⁻¹。950 hPa，对流触发区域南部为暖湿偏南气流（ $\theta_e \geq$
 207 348 K），风速约 8 m s⁻¹。2020 年 5 月 29 日 20: 00 香港站的探空表明大气对流
 208 有效位能（CAPE）达到 1306 J kg⁻¹，对流抑制能（CIN）仅为 2 J kg⁻¹，抬升凝
 209 结高度（LCL）为 932 hPa，自由对流高度为（LFC）923 hPa，大气可降水量约
 210 61 mm（图略）。低 CIN，LCL 和 LFC，高 CAPE 有利于对流的形成。水平风由
 211 低层西南风随高度转为西风。

212

213 4 Nudging 试验

214 4.1 模拟评估

215 图 3 为观测、EXP1 和关闭 Nudging 试验的区域平均 2m 水汽混合比、2 m
216 温度和 10 m 风速的时间演变。在 2 m 水汽混合比方面，关闭 Nudging 的模拟前
217 期值较观测值低，而 EXP1 的数据更接近观测（图 3a）。在夜间，关闭 Nudging
218 试验的 2 m 温度偏低，且在降温速率显著快于观测，与此对照，EXP1 在温度变
219 化上与观测更为一致（图 3b）。此外，关闭 Nudging 试验高估了 10 m 风速，而
220 EXP1 则更趋近于观测（图 3c）。综合而言，关闭 Nudging 试验与观测存在较大
221 偏差，而地面格点 Nudging 方法能够显著提高地面气象要素场模拟的准确性。

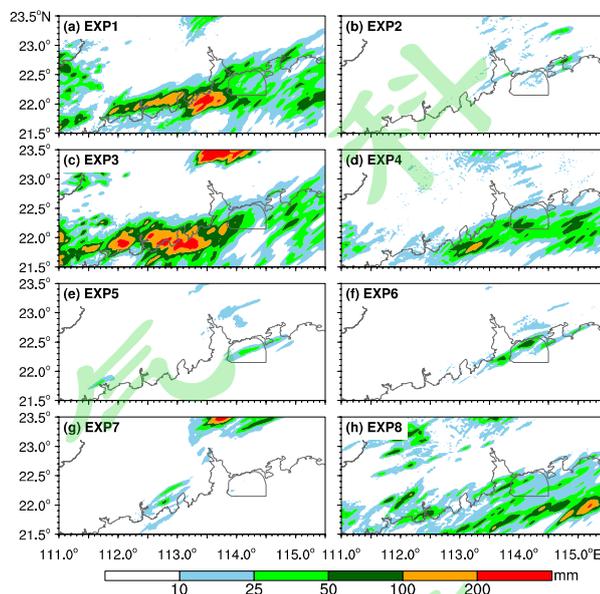


222 图 3 2020 年 5 月 29 日 20: 00 - 30 日 14: 00 区域平均 (21.5°N-23.5°N, 111.0°E-115.5°E)
223 (a) 2 m 水汽混合比 (单位: g kg^{-1})、(b) 2 m 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (c) 10 m 风速 (单
224 位: m s^{-1}) 随时间演变。红色、绿色和橙色线分别表示观测、纯 WRF 模拟和全场 Nudging
225 (EXP1)
226

227 Fig. 3 Time evolutions of domain-averaged (a) 2 m water vapor mixing ratio (unit: g kg^{-1}), (b) 2 m
228 temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), and (c) 10 m wind (unit: m s^{-1}). The red, green, and orange lines represent
229 observation, WRF simulation without nudging, and nudging all observation (i.e., EXP1),
230 respectively.

231 图 4 为 8 组试验的 18 小时累积降水空间分布情况。EXP2、EXP5、EXP6、
232 EXP7 均未能模拟出沿海雨带，沿海最大 18 小时累积降水分别为 61.5、37.2、
233 84.9 和 60.0 mm（图 4b, e, f 和 g）。EXP4 和 EXP8 成功模拟了沿海雨带，但
234 降水强度和落区与观测存在较大偏差（图 4d 和图 4h）。对照各试验，EXP1 和
235 EXP3 较好地再现了强降水的空间分布，最大值分别为 233.6 mm 和 281.1 mm
236（图 4a 和图 4c），与最大观测值 264.9 mm 接近。在模拟时段中，超过 10
237 mm、50 mm 和 100 mm 的 18 小时累积降水站点占比分别为 45.98%、11.36%和
238 4.16%。EXP1 相应的格点占比分别为 48.14%、9.32%和 2.90%，而在 EXP3
239 中，这个比例为 53.11%、18.54%和 8.28%。综上，EXP1 在模拟的广东沿海强
240 降水带在强度和空间分布上均最接近观测。

241



242

243 图 4 2020 年 5 月 29 日 20 时 - 30 日 14 时共 18 小时的 8 组（即 EXP1-EXP8）试验累积降
244 水空间分布（单位：mm）。

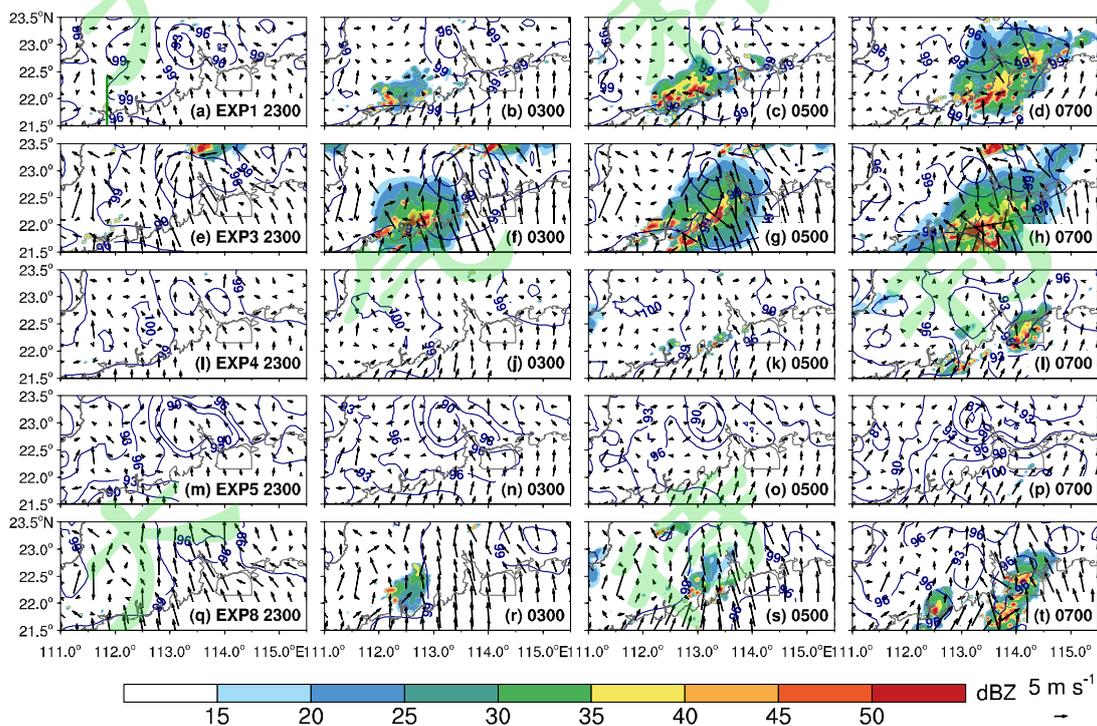
245 Fig. 4 Spatial distribution of 18-h simulated rainfall (unit: mm) during the period from 20:00 29 to
246 14:00 30 May 2020 taken from experiments EXP1-EXP8

247

248 与雷达观测相比，EXP1 较好地再现了对流触发和发展的总体特征。对流触
 249 发的位置与观测接近（广东省西部沿海），但推迟了约 2 小时（图 5a 和图 2a）。
 250 此外，西南-东北走向的沿海线状对流也与雷达观测接近（图 5d 和图 2c）。
 251 EXP1 中对流触发时间延迟的原因可能与模式的起转时间（spin-up）有关。此
 252 外，初始条件和物理方案均会影响模拟对流系统的触发时间。尽管存在时间上
 253 的差异，EXP1 在对流触发和发展的空间位置、水平尺度和结构等方面与雷达观
 254 测最接近。

255 4.2 Nudging 地面水汽的影响

256 图 5 显示的是 EXP1（图 5a-d）、EXP3（图 5e-h）、EXP4（图 5i-l）、EXP5
 257 （图 5m-p）和 EXP8（图 5q-t）的雷达组合反射率、地面相对湿度和风场时空
 258 演变。EXP1、EXP3、EXP4 和 EXP8 均 Nudging 地面水汽。可以看出，四组试
 259 验的相对湿度都明显增加，在广东省沿海地区都触发对流。值得指出的是，
 260 尽管四组实验都能触发对流且对流系统都沿海岸向东北方向发展，但由于其他
 261 Nudging 设置的差异，导致了对流系统在强度、空间位置和组织性上存在显著
 262 差异。EXP5 关闭地面水汽 Nudging，沿海地区的增湿过程缓慢，未能模拟出对
 263 流的发生发展（图 5m-p）。因此，Nudging 地面水汽可以有效地改善水汽条
 264 件，直接决定了对流的触发。



265

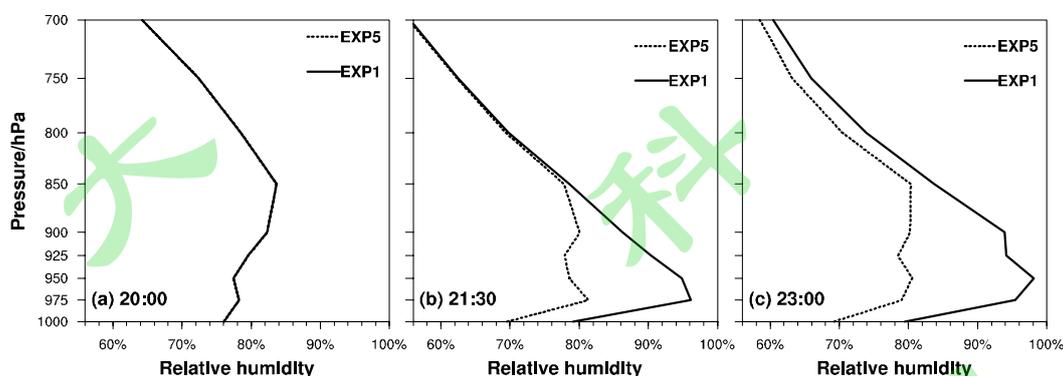
266 图 5 对流系统发生发展阶段组合反射率（填色，单位：dBZ），地面 2 m 相对湿度（蓝色等

267 值线，单位：%）与 10 m 风场（箭头，单位： m s^{-1} ）时空演变。a-d、e-h、i-l、m-p 和 q-
268 t 分别为 EXP1、EXP3、EXP4、EXP5 和 EXP8 的模拟结果

269 Fig. 5 Spatial-temporal evolutions of composite reflectivity (shadings, unit: dBZ), 2-m relatively
270 humidity (blue isolines, unit: %), and 10-m horizontal wind (arrows, unit: m s^{-1}) during convective
271 initiation and development stages. The markers of a-d, e-h, i-l, m-p, and q-t denote the
272 simulations of EXP1, EXP3, EXP4, EXP5, and EXP8, respectively

273

274 图 6 为 EXP1 和 EXP5 的对流触发区域（ $111.5^{\circ}\text{E} - 112.5^{\circ}\text{E}$ ， $21.6^{\circ}\text{N} -$
275 22.2°N ）平均相对湿度廓线的时间演变。在初始时刻，两组试验具有相同的相
276 对湿度廓线（图 6a）。在 21: 30，850 hPa 以下的相对湿度开始出现显著差异。
277 具体而言，EXP1 在 975 hPa 的相对湿度高达 96%，EXP5 仅为 81%（图 6b）。
278 对流触发时，EXP1 在 950 hPa 高度上相对湿度超过 98%，而 EXP5 在该高度的
279 相对湿度仅约 80%（图 6c）。EXP1 的边界层水汽含量在三小时内迅速增长至接
280 近饱和，这为对流的触发和发展提供了充足的水汽。



281

282 图 6 EXP1（实线）和 EXP5（虚线）对流触发区域平均相对湿度廓线时间演变。（a）29 日
283 20: 00，（b）21: 30，（c）23: 00

284 Fig. 6 Temporal evolution of domain-averaged relative humidity profiles within convective
285 initiation region take from EXP1 (solid line) and EXP5 (dash line) on 29: (a) 20:00, (b) 21:30, (c)
286 23:00

287

288 950 hPa 高度上 EXP1 和 EXP5 对流触发区域平均水汽混合比 (q_v) 的时间
289 演变如图 7a 所示。可以看出，EXP1 中的 q_v 在早期迅速增加，之后增长趋势放
290 缓， q_v 从 16.62 g kg^{-1} 增至对流触发时的 21.52 g kg^{-1} 。与之相比，EXP5 中的 q_v

291 增加缓慢，最终只达到 17.58 g kg^{-1} 。为了进一步量化和诊断对流触发区域的边
292 界层增湿过程，计算了 950 hPa 的 单层水汽收支。 q_v 收支方程如下：

293
$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -\bar{V} \cdot \nabla_h q_v - \omega \frac{\partial q_v}{\partial p} + QBL + QCM + QNU + R \quad (1)$$

294 $\partial q_v / \partial t$ 为 q_v 的局地变化项， $-\bar{V} \cdot \nabla_h q_v$ 和 $-\omega \cdot \partial q_v / \partial p$ 为水平和垂直输送项， QBL
295 为边界层湍流混合的影响， QCM 为积云对流和微物理过程产生的凝结和蒸发效
296 应， QNU 为 q_v 的 Nudging 倾向， R 为残余项。 $\partial q_v / \partial t$ 使用中央差分计算：

297 $(\partial q_v / \partial t)|_i = (q_v|_{t+\Delta t} - q_v|_{t-\Delta t}) / 2\Delta t$ ，其中 $\Delta t = 6 \text{ min}$ 。 QBL 、 QCM 和 QNU 使用模

298 式输出值。水平输送项由模式输出的总水汽输送项减去垂直输送项所得。此
299 外，残余项由 $\partial q_v / \partial t + \bar{V} \cdot \nabla_h q_v + \omega \cdot \partial q_v / \partial p - QBL - QCM - QNU$ 计算所得。图 7b

300 和图 7c 分别显示的是公式 (1) 中两组试验 950 hPa 所有项在对流触发区域内的

301 平均值时间演变。可以看出 (图 7b)，EXP1 启动初期， q_v 的 Nudging 倾向项导

302 致边界层水汽急剧增长，模式值向观测值逼近后，Nudging 的作用迅速衰减。

303 相比之下，水平输送和边界层湍流混合项影响较小，而积云对流和微物理过程

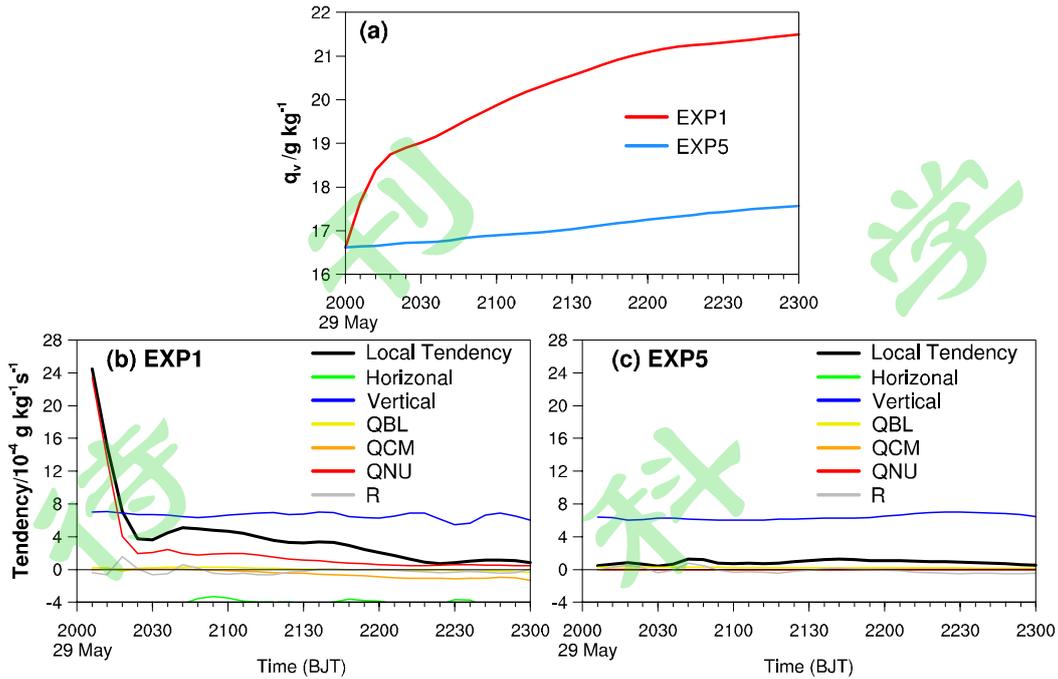
304 在对流触发前凝结作用增强。21:06 至 23:00，垂直输送项成为边界层增湿的

305 主要来源。对比发现，由于 EXP5 关闭了 Nudging 水汽，垂直输送成为边界层

306 增湿的主要来源，其增湿效应被负的水平输送大幅抵消。值得指出的是，珠江

307 入海口西北区域的 950 hPa 水汽收支诊断表明 (未给出)，在缺乏水汽垂直输送

308 的背景下，以 Nudging 倾向为主导的边界层增湿过程无法触发对流。



309

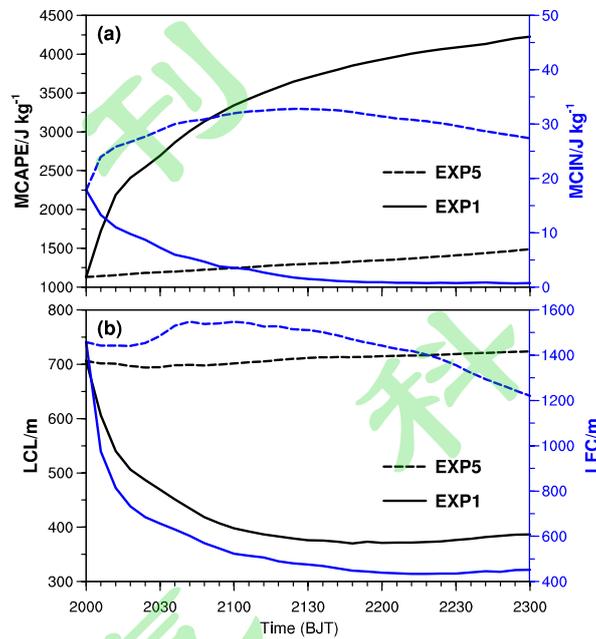
310 图 7 950 hPa 层 2020 年 5 月 29 日 20: 00–23: 00 对流触发区域平均时间演变: (a) 水汽混
 311 合比 q_v (单位: g kg^{-1}), (b) EXP1 和 (c) EXP5 水汽收支方程计算的各项 (单位: $10^{-4} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 的。
 312 a 中红色和蓝色线分别表示 EXP 和 EXP5; b 和 c 中黑色、绿色、蓝色、黄
 313 色、橙色、红色和灰色线分别表示为局地变化项、水平输送项、垂直输送项、边界层湍流
 314 混合项、蒸发和凝结项、Nudging 倾向项和残差项

315 Fig. 7 Temporal evolution of domain-averaged (a) water vapor mixing ratio (unit: g kg^{-1}) and (b)
 316 all terms (unit: $10^{-4} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) of water vapor budget calculated from the simulations of (b) EXP1
 317 and (c) EXP5 at 950 hPa within convective initiation region during 20:00 to 23:00 29 May 2020.
 318 The red and blue lines in (a) represent EXP1 and EXP5. Black, green, blue, yellow, orange, red,
 319 and grey lines represent the terms of local tendency, horizontal transport, vertical transport,
 320 tendency caused by vertical turbulence mixing in the boundary layer, evaporation and
 321 condensation, nudging tendency, and residual, respectively

322

323 通过 Nudging 地面水汽的调整, 边界层的快速增湿, 从而加强了对流触发
 324 区域内的低层大气不稳定性。5 月 29 日 20: 00 至 23: 00, 对流触发区域的平
 325 均最大对流有效位能 (CAPE) 从 1130.1 J kg^{-1} 增加到 4227.1 J kg^{-1} (图 8a)。而
 326 在 EXP5 中, MCAPE 仅增加到 1487.0 J kg^{-1} (图 8a)。此外, EXP1 的最大 CIN
 327 由 17.9 J kg^{-1} 降至 0.8 J kg^{-1} (图 8a), 这与 20: 00 的香港探空计算的实际 CIN

328 接近。抬升凝结高度（LCL）和自由对流高度（LFC）在此期间分别从 706 m
329 和 1457 m 下降到 387 m 和 453 m（图 8b），与观测相当。



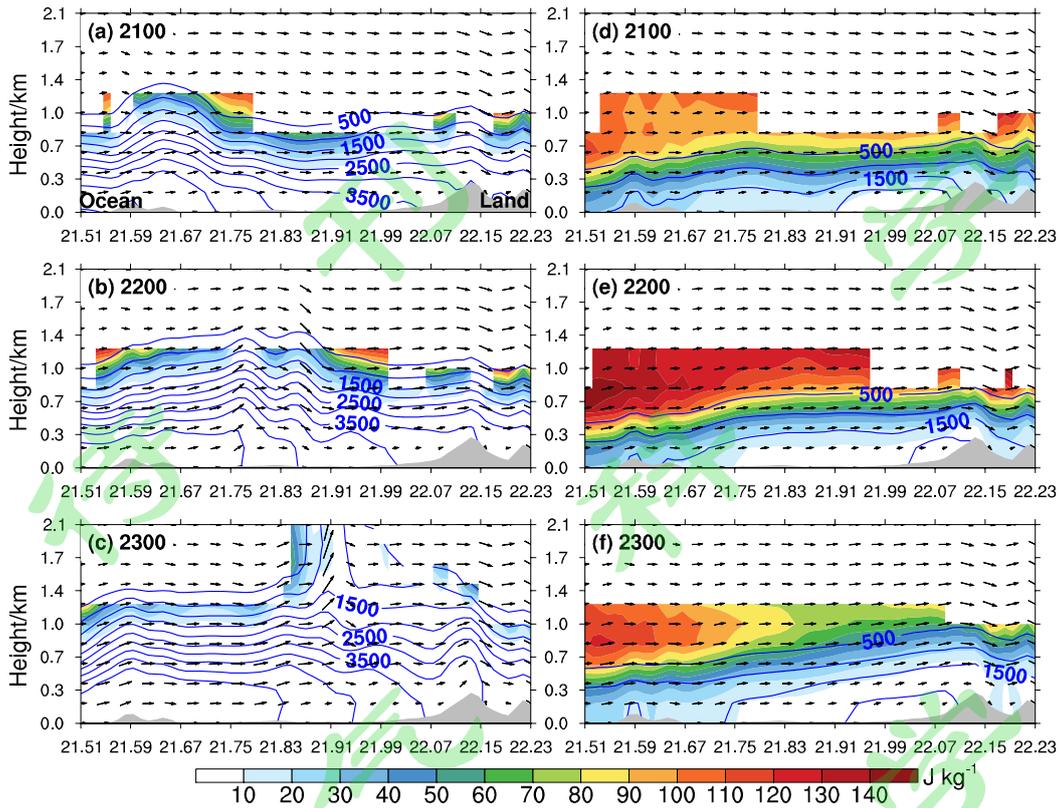
330

331 图 8 2020 年 5 月 29 日 20:00–23:00 EXP1 和 EXP5 对流触发区域平均 (a) MCAPE 和
332 MCIN (单位: J kg^{-1}), (b) LCL 和 LFC (单位: m) 的时间演变

333 Fig. 8 Temporal evolution of domain-averaged (a) MCAPE and MCIN (unit: J kg^{-1}) and (b) LCL
334 and LFC (unit: m) within convective initiation region during the period from 20:00 to 23:00 29
335 May 2020

336

337 EXP1 和 EXP5 过对流触发区域垂直剖面如图 9 所示。可以看出, EXP1 中
338 1 km 以下的 CAPE 较大, 21:00–23:00, 高 CAPE 从海洋向内陆延伸且不断
339 增强 (图 9a–c)。21:00, 位于 21.75°N 的 1 km 高度处 CIN 超过 60 J kg^{-1} , 垂
340 直运动相对较弱 (图 9a)。22:00 至 23:00, CIN 明显减弱, 2 km 以下出现较
341 强的垂直速度扰动克服 CIN, 较强的 CAPE 有助于气团进一步抬升, 加速对流
342 触发 (图 9b–c)。相比之下, EXP5 在 0.3–1.2 km 高度存在较大的 CIN (大于
343 100 J kg^{-1}), 低层垂直运动较弱, 不利于产生对流 (图 9d–f)。此外, 在 1 km
344 高度以下, EXP5 的 CAPE 远小于 EXP1, 对流发展的潜力较弱。因此, 水汽条
345 件的改善, CIN 和抬升条件的变化有利于触发对流, 而 CAPE 的增加为后续对
346 流的快速发生提供了能量条件。



347

348 图 9 沿图 5a 绿色线的 CIN (填色, 单位: $J kg^{-1}$)、CAPE (等值线, 单位: $J kg^{-1}$) 和合成
 349 风场 (箭头, 单位: $m s^{-1}$, 垂直速度扩大 10 倍) 高度-纬度剖面。a-c 和 d-f 分别为 EXP1
 350 和 EXP5 模拟结果。灰色阴影表示模式地形

351 Fig. 9 Height-latitude cross-section of CIN (shadings, unit: $J kg^{-1}$), CAPE (isolines, unit: $J kg^{-1}$),
 352 and in-plane wind vector (arrows, vertical motion amplified by a factor of 10) along green line in
 353 Fig .8a. a-c and d-f denote simulations of EXP1 and EXP5, respectively. Grey shading denotes
 354 model terrain

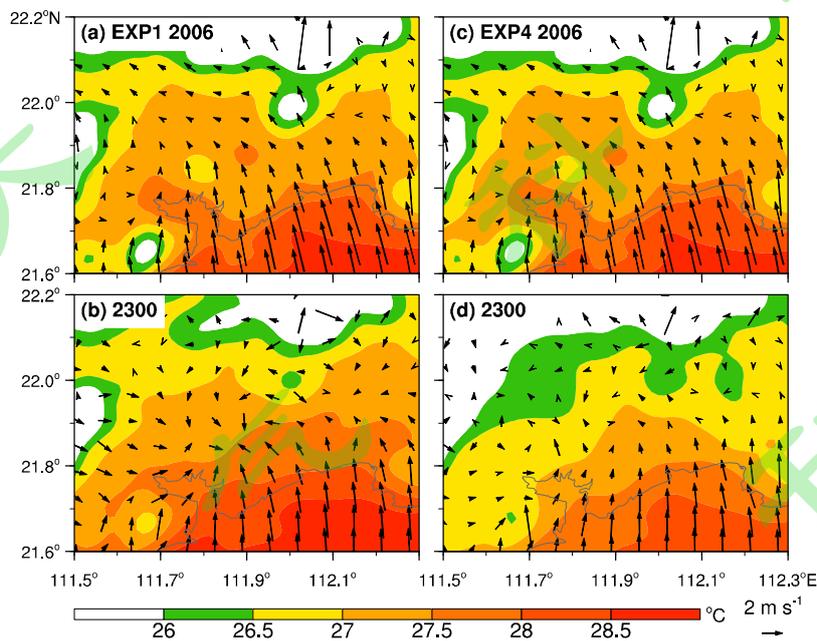
355

356 4.3 Nudging 地面温度的影响

357 根据 EXP1、EXP2、EXP4 和 EXP7 雷达组合反射率、地面相当位温和风场
 358 时空演变 (图略), 可以看出, EXP2 中夜间几乎没有雷达回波, 仅在 30 日
 359 08: 00 在珠江入海口东南侧洋面上出现少量的弱雷达回波。EXP7 仅开启了地
 360 面温度 Nudging, 30 日 08: 00 仅在海岸附近出现零星的弱雷达回波。表明, 在
 361 水汽条件不利的情况下, 仅 Nudging 地面温度不足以触发对流, 这与 2017 年 5
 362 月 7 日由城市热岛触发的个例不同 (尹金方等, 2022)。与 EXP2 相比, EXP7 的

363 Nudging 设置对夜间海岸对流的模拟没有改进。30 日 04: 00, EXP4 中在广东
 364 省沿海地区触发对流, 比 EXP1 延迟了 5 小时。其中位于 112.1°E, 21.8°N 附近
 365 形成了一个直径大于 10 km 的对流单体, 而在 113.1°E, 21.9°N 附近形成了三个
 366 紧邻的直径小于 10 km 的对流单体, 两者相距 130 km 以上。与控制试验
 367 (EXP1) 相比, EXP4 关闭了地面温度 Nudging。对流触发之后, 与 EXP1 中形
 368 成的长度达 300 km 的线状对流不同, EXP5 的对流单体最终形成了长度仅
 369 100km 的两个对流系统。因此, 这两组试验表明, Nudging 地面温度可加速夜
 370 间的对流触发, 且能更好地促进对流系统组织和发展, 进而产生更强的降水。

371 显示的是 EXP1 和 EXP4 的地面温度和风场的时空演变。在模式初始时
 372 刻, EXP1 和 EXP4 的初始温度场相同。在模式启动后, EXP4 的沿海地面温度
 373 快速减弱, 模式积分 3 小时后陆地一侧的地面温度降至 27°C 以下 (图 10c 和
 374 d)。而 EXP1 中的地面温度得到了很好的维持, 降温速度慢 (图 10a 和 b)。综
 375 合而言, Nudging 地面温度可减缓夜间近地面降温, 从而有利于对流的发生发
 376 展。



377
 378 图 10 地面 2 m 温度 (填色, 单位: °C) 和 10 m 风场 (箭头, 单位: m s⁻¹) 的时空演变。
 379 a - b 和 c - d 分别为 EXP1 和 EXP4 的模拟结果

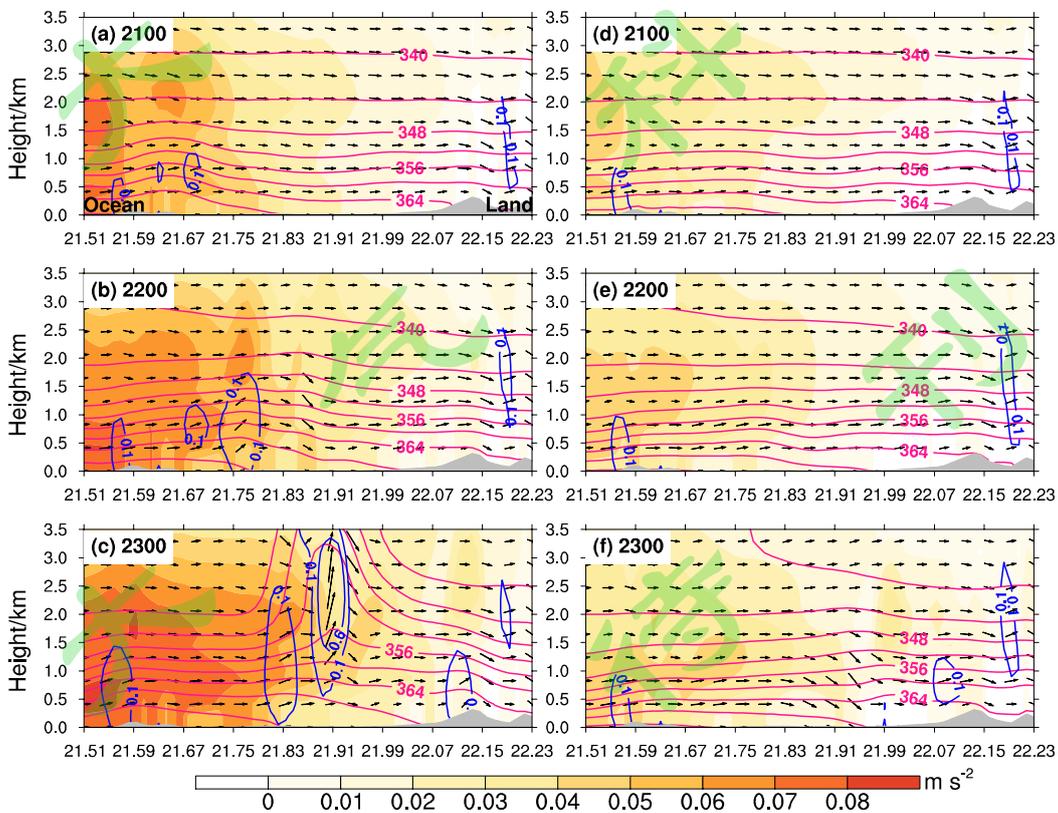
380 Fig. 10 Spatial-temporal evolutions of surface 2 m temperature (shadings, unit: °C) and 10 m wind
 381 (arrows, m s⁻¹). a - b and c - d denote the simulations of EXP1 and EXP4, respectively

382

383 为了探究 Nudging 地面温度对于夜间对流触发的具体影响，计算了对流触
 384 发之前的热浮力 B (m s^{-2})。具体公式为 (Weisman and Rotunno, 2004):

385
$$B = g \frac{\theta'}{\theta} + 0.61g(q_v - \bar{q}_v) - gq_c - gq_r \quad (2)$$

386 其中 g 为重力加速度 (m s^{-2})， θ' 为位温扰动 (K)， $\bar{\theta}$ 为区域平均位温 (K)， q_v
 387 为水汽混合比 (kg kg^{-1})， \bar{q}_v 为平均水汽混合比 (kg kg^{-1})， q_c 为云水含量 (kg
 388 kg^{-1})， q_r 为雨水含量 (kg kg^{-1})。EXP1 和 EXP4 的热浮力垂直剖面如图 11 所
 389 示。可以看出，模式启动 1 小时，EXP1 的热浮力整体由海洋向内陆递减，热浮力
 390 最大值出现在海洋上空约 1–2 km 高度，达到 0.06 m s^{-2} (图 11a)。随着时间的
 391 推移，EXP1 热浮力逐渐增强且向内陆扩展，23: 00 对流触发时最大热浮力
 392 可达到 0.08 m s^{-2} (图 11a-c)。此外在 21: 00，EXP1 在 $21.51^\circ\text{N} - 21.67^\circ\text{N}$ 的岛屿
 393 上空出现了相当位温扰动和强度为 0.1 m s^{-1} 的多个垂直速度扰动中心 (图
 394 11a)。22: 00，垂直速度扰动增强，范围扩大。23: 00，上升气流向北移动，
 395 后者速度超过 0.6 m s^{-1} 。相比之下，EXP4 相当位温扰动变化不明显，对应较小
 396 的热浮力和上升运动 (图 11d-f)。

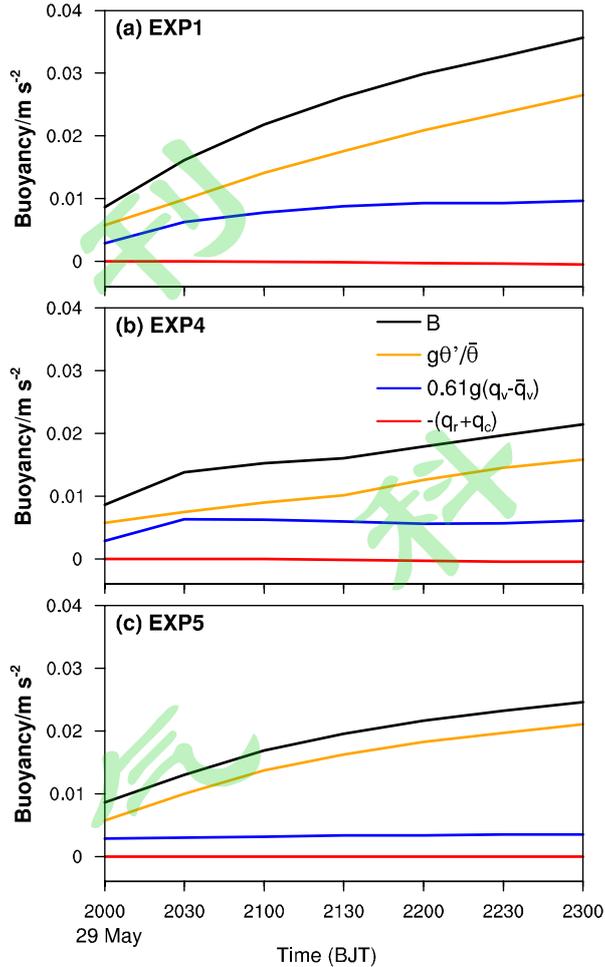


397

398 图 11 沿图 5a 绿色线的热浮力 (填色, 单位: m s^{-2})、相当位温 (粉色等值线, 单位: K)、

399 垂直速度（蓝色等值线，单位： m s^{-1} ）和合成风场（箭头，单位： m s^{-1} ，垂直速度扩大 10
400 倍）高度-纬度剖面 a-c 和 d-f 分别为 EXP1 和 EXP4 的模拟结果。灰色阴影表示模式地形
401 Fig. 11 Height-latitude cross-section of thermal buoyancy (shadings, unit: m s^{-2}), equivalent
402 potential temperature (pink isolines, unit: K), vertical motion (blue isolines, unit: m s^{-1}), and in-
403 plane wind vector (arrows, unit: m s^{-1} , vertical motion amplified by a factor of 10) along green
404 line in Fig. 5a. a-c and d-f denote simulations of EXP1 and EXP4, respectively. Grey shadings
405 denote model terrain

406
407 为了阐明热浮力公式中各项在对流触发前的具体贡献，进一步对比了
408 EXP1、EXP4 和 EXP5 中边界层（1 km 以下）对流触发区域平均各项随时间的
409 演变（图 12）。可以看出（图 12a），EXP1 的热浮力从 20: 00 的 0.0087 m s^{-2} 增
410 长到 23: 00 的 0.036 m s^{-2} ，其主要贡献项是位温扰动。此外，水汽作用项增长
411 较缓慢，云雨水项影响小。相比之下，EXP4 和 EXP5 中 23: 00 的热浮力影响
412 较小，分别增加到了 0.021 和 0.025 m s^{-2} （图 12b）。值得指出的是，尽管 EXP1
413 和 EXP5 都 Nudging 了地面温度，但 23: 00 之前 EXP5 的位温扰动项低于
414 EXP1，仅增长至 0.021 m s^{-2} （图 12a 和 c）。对比 EXP1 和 EXP4 表明，仅
415 Nudging 地面水汽时水汽作用项弱于同时 Nudging 地面温度和水汽（图 12a 和
416 b）。综合而言，仅 Nudging 地面温度能使位温扰动快速增长，仅 Nudging 地面
417 水汽使水汽作用项快速增长（图 12b 和 c），但它们的贡献都小。温度和湿度同时
418 Nudging 中各自的贡献，意味着温度和湿度的相互作用一定程度上促进了两者
419 贡献。



420

421 图 12 2020 年 5 月 29 日 20: 00–23: 00 在 1 km 以下对流触发区域平均热浮力及其影响项随
 422 时间演变: (a) EXP1, (b) EXP4, (c) EXP5。黑色表示热浮力, 橙色、蓝色和红色线分
 423 别表示位温扰动项, 水汽作用项, 和云水雨水作用项

424 Fig. 12 Temporal evolutions of domain-averaged thermal buoyancy and its influence terms within
 425 the convective initiation region below 1 km from (a) EXP1, (b) EXP4, and (c) EXP5. The black
 426 line represents thermal buoyancy; orange, blue, and red lines represent the terms of potential
 427 temperature turbulence, water vapor, cloud and rain water, respectively

428

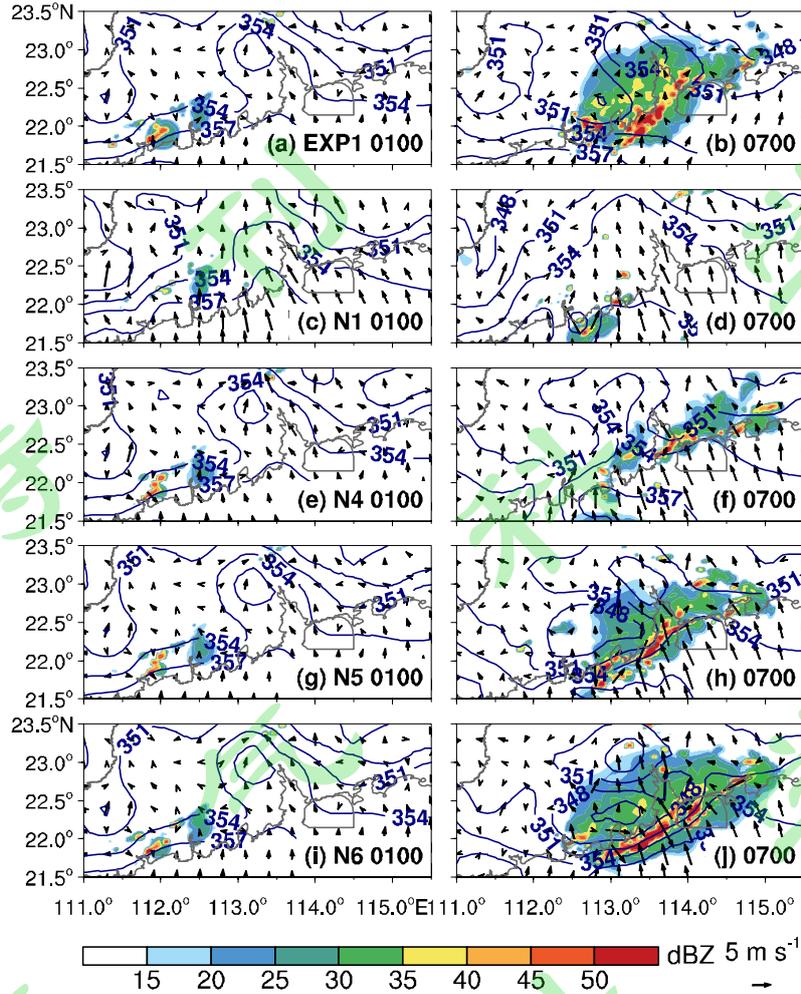
429 4.4 Nudging 地面风场的影响

430 EXP1 和 EXP3 的对比表明 (图略), Nudging 地面风场可削弱对流系统的
 431 强度。对流触发时, 对流单体在对流触发区域呈波状排列, 其数量、强度都大
 432 于 EXP1, 洋面上的风速更强, 西南风和东南风的辐合更强。在随后的对流的
 433 发展中, 受到 Nudging 地面风场的调整, EXP1 中对流系统南部洋面以西南风为

434 主，风速较小且风向辐合较弱。EXP4 中对流系统西南侧和东南方向的近地层风
435 则分别为西南风和较强的东南风，风速更大且风向辐合更强。此外，EXP2 和
436 EXP6 的对比表明，EXP2 高估了地面风场，而 EXP6 通过 Nudging 地面风场降
437 低了地面风速，但由于水汽不足无法在夜间触发对流。综合而言，Nudging 地
438 面风场通过调整对流系统南侧气流的风速和风向，使模拟结果更接近观测，一
439 一定程度上减小了暖湿气流的辐合，进而抑制了对流系统过强的问题。

440 5 Nudging 时长对预报结果的影响

441 EXP1 中，Nudging 作用于整个模式积分过程，较好地再现了本次对流的发
442 生发展。然而，全程 Nudging 只能用于历史个例的模拟，缺乏对未来天气预报
443 的应用价值。因此，设计了 N1–N6 六组敏感性实验，Nudging 地面全气象要素
444 时长分别为 1 至 6 小时，均在强降水发生前停止。结果表明，N1、N2 和 N3 结
445 果相似，未能合理地再现出对流发生。因此，仅给出 N1、N4、N5 和 N6 的模
446 拟结果。尽管四组实验都在 23:00 触发了对流，但在随后的对流系统强度就存
447 在着一定差距。这表明即使前期有力的水汽条件触发对流，但后续水汽供应不
448 足，对流系统也未能够快速发展。具体而言，N1 未在沿海发展出中 α 尺度对流
449 系统（图 13b 和图 13g）。显而易见，对流系统的组织性和强度随着 Nudging 时
450 长的增加而接近 EXP1（图 13h, i 和 j）。N6 的雷达回波特征已较好地再现对流
451 了对流的发生发展。N1、N4、N5 和 N6 的 18 小时累积最大降水量分别为
452 97.4、171.3、267.4 和 211.1 mm。随着 Nudging 时长的增加，模式对 50mm 和
453 100mm 累积降水的模拟效果更加接近观测。综合而言，在本次个例模拟中，
454 Nudging 全地面气象要素 6 小时便能够较合理地再现出对流系统的时空演变和
455 降水特征。



456

457 图 13 同图 5。但为 (a-b) EXP1, (c-d) N1, (e-f) N4, (g-h) N5 和 (i-j) N6 的模拟结
458 果

459

Fig. 13 Same as Fig. 5 but for (a-b) EXP1, (c-d) N1, (e-f) N4, (g-h) N5, and (i-j) N6

460

461 6 结论与讨论

462

463 本研究针对业务数值预报漏报明显的 2020 年 5 月 30 日 02:00 - 14:00 广
464 东沿海一次暖区极端降水事件进行了数值模拟, 采用地面格点 Nudging 方法设
465 计了系列模拟试验, 探讨了影响此次降水发生发展的主要因子。主要结论如
466 下:

466

467

468

(1) 总体而言, 地面格点 Nudging 地面全要素能够较好地模拟本次降水事件。格点 Nudging 地面水汽促使边界层内水汽接近饱和, 明显增加了环境 CAPE 值, 并降低了 CIN、LCL 和 LFC, 为对流的触发和快速发展提供了有利

469 条件，直接决定着对流的发生发展。

470 (2) 格点 Nudging 地面温度减缓了夜间地面气温的降温速度，增强位温扰
471 动增加了热浮力，从而增强了垂直速度扰动，加速了对流的触发，有利于对流
472 的组织，促进了沿海线状对流的形成。

473 (3) 格点 Nudging 地面风场能够有效地改进地面风场，尤其是风向，一定
474 程度上改善了强降水期间风向的辐合，进而抑制了对流过度的问题，使模拟结
475 果加接近观测值。

476 (4) 进一步的试验表明，Nudging 地面气全象要素 6 小时基本可以再现此
477 次华南暖区强降水过程，其 18 小时累积最大降水量可达 211.1 mm。因此，6 小
478 时的 Nudging 窗口可为今后业务同化应用提供参考。需要指出的是，尽管水汽
479 在前 3 小时之内迅速增加，但一定时间（3 小时）的水汽维持有助于对流的快
480 速发展。

481 除此个个例的模拟外，作者课题组利用 Nudging 地面观测资料模拟其它华
482 南暖区强降水事件也取得良好地模拟效果，但不同地面要素 Nudging 在不同的
483 个例中重要性有所不同。这也反映了模式对导致华南暖区强降水发生的物理机
484 制描述不足。今后，也将开展更多华南暖区极端降水模拟试验来验证地面格点
485 Nudging 技术对降水再现或预报的作用。此外，不同的初始场对华南暖区强降
486 水的模拟也有显著的差别。因此，在今后的研究中可针对不同初始场对华南暖
487 区强降水事件进行模拟，进一步了解华南暖区强降水事件对流触发和发展的影
488 响因子，从而为数值模式对华南暖区强降水的模拟提供参考。

- 490 Bao X H, Luo Y L, Gao X Y 2021. The synoptic impacts on the convection initiation of a warm -
491 sector heavy rainfall event over coastal South China prior to the monsoon onset: a numerical
492 modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126.
493 doi:<https://doi.org/10.1029/2020jd034335>
- 494 Bowden J H, Otte M J, Nolte C G, et al. 2012. Does nudging squelch the extremes in regional
495 climate modeling?[J]. *Journal of Climate*, 25: 7046-7066. doi:[https://doi.org/10.1175/JCLI-D-](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00048.1)
496 12-00048.1
- 497 Chen X C, Zhang F Q, Zhao K 2016. Diurnal variations of the land-sea breeze and its related
498 precipitation over South China[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73: 4793-4815.
499 doi:<https://doi.org/10.1175/jas-d-16-0106.1>
- 500 Deng A, Stauffer D, Gaudet B, et al. 2009. Update on WRF-ARW end-to-end multi-scale FDDA
501 system [M], 10th WRF Users' Workshop, National Center for Atmospheric Research, Boulder,
502 CO, USA: 14.
- 503 Du Y, Chen G X 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China.
504 Part II: Convection Initiation[J]. *Monthly Weather Review*, 147: 543-565. doi:10.1175/mwr-d-
505 18-0102.1
- 506 Dudhia J 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment
507 using a mesoscale two-dimensional model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46: 3077-
508 3107. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- 509 何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展 [J]. *应用气象学报*, 27: 559-569. He Lifu,
510 Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. *J*
511 *Appl Meteor Sci. (in Chinese)*, 27(5): 559-569. doi:[https://doi.org/10.11898/1001-](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20160505)
512 7313.20160505
- 513 Janjić Z I 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection,
514 viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. *Monthly Weather Review*, 122: 927-945.
515 doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- 516 Janjić Z I 2002. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP
517 meso model[J]. *NCEP Office Note*, 437.
- 518 Leidner S M, Stauffer D R, Seaman N L 2001. Improving short-term numerical weather prediction
519 in the california coastal zone by dynamic initialization of the marine boundary layer[J].
520 *Monthly Weather Review*, 129: 275-294. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0275:ISTNWP>2.0.CO;2)
521 0493(2001)129<0275:ISTNWP>2.0.CO;2
- 522 李明妍, 崔志强, 王澄海. 2017. Nudging 方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究 [J]. *气候*
523 *与环境研究*, 22: 563-573. Li Mingyan, Cui Zhiqiang, Wang Chenghai. 2017. A numerical
524 simulation study on heavy rain processes in Northwest China using the nudging method[J].
525 *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22(5):563-573. doi:10.3878/j.issn.1006-
526 9585.2017.16177
- 527 Liu X, Luo Y L, Guan Z Y, et al. 2018. An extreme rainfall event in coastal South China during
528 SCMREX-2014: formation and roles of rainband and echo trainings[J]. *Journal of Geophysical*
529 *Research: Atmospheres*, 123: 9256-9278. doi:10.1029/2018jd028418
- 530 刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发. 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究 [J]. *大气科学*, 43: 119-
531 130. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa. 2019. Selection and classification of warm-sector
532 heavy rainfall events over South China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in*

533 Chinese), 43(1): 119-130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245
 534 鲁蓉, 孙建华, 傅慎明. 2018. 近海水汽初值和对流影响一次华南前汛期沿海强降水对流系统
 535 发展过程的机理研究 [J]. 大气科学, 42: 1-15. Lu Rong, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2018.
 536 Influence of offshore initial moisture field and convection on the development of coastal
 537 convection in a heavy rainfall event over South China during the pre-summer rainy season [J].
 538 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 1-15. doi:10.3878/j.issn.1006-
 539 9895.1705.16261
 540 Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. 2017. The southern china monsoon rainfall experiment
 541 (SCMREX)[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 98: 999-1013.
 542 doi:https://doi.org/10.1175/bams-d-15-00235.1
 543 Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous
 544 atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. Journal of
 545 Geophysical Research: Atmospheres, 102: 16663-16682. doi:10.1029/97jd00237
 546 Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with
 547 multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale
 548 measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 116.
 549 doi:https://doi.org/10.1029/2010JD015139
 550 Reen B P, Stauffer D R, Davis K J, et al. 2006. A case study on the effects of heterogeneous soil
 551 moisture on mesoscale boundary-layer structure in the Southern Great Plains, U.S.A. Part II:
 552 mesoscale modelling [J]. Boundary-Layer Meteorology, 120: 275-314.
 553 doi:https://doi.org/10.1007/s10546-006-9056-6
 554 Stauffer D R, Seaman N L 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area
 555 mesoscale model. Part I experiments with synoptic-scale data [J]. Monthly Weather Review, 118:
 556 1250-1277. doi:https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<1250:UOFDDA>2.0.CO;2
 557 Stauffer D R, Seaman N L 1994. Multiscale four-dimensional data assimilation [J]. Journal of
 558 Applied Meteorology, 33: 416-434. doi:http://www.jstor.org/stable/26186689
 559 Sun J, Zhang Y, Liu R, et al. 2019. A review of research on warm-sector heavy rainfall in China [J].
 560 Advances in Atmospheric Sciences, 36: 1299-1307. doi:10.1007/s00376-019-9021-1
 561 Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation
 562 using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow
 563 parameterization [J]. Monthly Weather Review, 136: 5095-5115.
 564 doi:https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1
 565 Wang H, Luo Y L, Jou B J-D 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an
 566 extreme rainfall event during SCMREX: Observational analysis [J]. Journal of Geophysical
 567 Research: Atmospheres, 119: 13,206-213,232. doi:https://doi.org/10.1002/2014jd022339
 568 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等. 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究 [J].
 569 大气科学, 41: 784-796. Wang Jianhong, Yang Yiya, Miao Chunsheng, et al. 2017. The numerical
 570 study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South
 571 China coast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 784-796.
 572 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16182.
 573 Weckwerth T M, Parsons D B 2006. A review of convection initiation and motivation for
 574 IHOP_2002 [J]. Monthly Weather Review, 134: 5-22. doi:https://doi.org/10.1175/MWR3067.1
 575 魏蕾, 雷恒池. 2012. 加密探空资料同化对一次降水预报能力改进研究 [J]. 气候与环境研究,
 576 17: 809-820. Wei Lei, Lei Hengchi. 2012. Improvement of precipitation forecasts by the

577 assimilation of encrypted sounding data[J]. Climatic and Environmental Research (in
578 Chinese),17(6):809-820. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.18
579 Weisman M L, Rotunno R 2004. “A theory for strong long-lived squall lines” revisited[J]. Journal
580 of the Atmospheric Sciences, 61: 361-382. doi:https://doi.org/10.1175/1520-
581 0469(2004)061<0361:ATFSL>2.0.CO;2
582 Wu M W, Luo Y L 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector
583 convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-
584 summer rainy season of 2015[J]. Journal of Meteorological Research, 30: 719-736.
585 doi:https://doi.org/10.1007/s13351-016-6089-8
586 尹金方, 黄洁, 史永强, 等. 2022. Nudging 地面加密观测改进数值模式对城市效应及其触发对
587 流的模拟: 一次夜间个例试验 [J]. 热带气象学报, 38: 331-342. Yin Jinfang, Huang Jie, Shi
588 Yongqiang, et al, 2022. Nudging surface intensive observations to improve the modeling of
589 urban effect and its associated convection: a nocturnal case study[J]. Journal of Tropical
590 Meteorology (in Chinese), 38(3): 331-342. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.026
591 Yin J, Liang X, Xie Y, et al. 2023. East Asia reanalysis system (EARS)[J]. Earth System Science
592 Data, 15: 2329-2346. doi:10.5194/essd-15-2329-2023
593 Yin J F, Zhang D L, Luo Y L, et al. 2020. On the extreme rainfall event of 7 may 2017 over the
594 coastal city of Guangzhou. Part I: Impacts of urbanization and orography[J]. Monthly Weather
595 Review, 148: 955-979. doi:https://doi.org/10.1175/mwr-d-19-0212.1
596 Zheng Y, Alapaty K, Herwehe J A, et al. 2016. Improving high-resolution weather forecasts using
597 the Weather Research and Forecasting (WRF) model with an updated kain–fritsch scheme[J].
598 Monthly Weather Review, 144: 833-860. doi:10.1175/mwr-d-15-0005.1
599

气
科
风
刊
气
信