

基于低层环流相似的海南岛降水订正研究*

李玉梅^{1, 2, 3} 李 勋^{1, 2, 3} 冯 箫^{1, 2, 3} 吴 俞^{1, 2, 3}

1 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203

2 西沙国家气候观象台, 海口 570203

3 海南省气象台, 海口 570203

提 要: 针对传统历史同期频率匹配法 (Hist-FMM) 不区分环流背景、难以订正降水落区偏差的问题, 以 925 hPa 风向和风速为约束条件, 用低层环流相似的检索代替按日期截取样本, 建立改进的频率匹配订正方案 (Sim-FMM)。由降水与 925 hPa 风场的耦合关系分析和参数敏感性试验确定两套参数方案: 常规降水订正采用风向 30° 风速 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的宽容差窗口且不设历史同期约束, 以保证样本量; 暴雨以上降水叠加历史同期约束并将容差窗口收紧为风向 10° 风速 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 使样本同时满足环流相似和气候背景相近。利用 2023 年 12 月至 2026 年 5 月海南岛 416 个观测站的降水资料和 ECMWF 模式产品检验发现, Sim-FMM 总体优于 Hist-FMM。冬季冷空气过程中相似环流样本的引入减少了大范围空报, 晴雨准确率较 Hist-FMM 提升 1.9%; 春夏季局地强降水过程中模式对暴雨量级低估得到改善, 2024—2026 年春季暴雨以上 TS 评分比 Hist-FMM 提高 8.4%。Sim-FMM 秋季强降水的订正效果不及 Hist-FMM, 这与秋季降水季节集中性强、单时次区域平均风场难以反映台风和切变线等非均匀结构有关。

关键词: 频率匹配法; 相似环流; 降水订正; 局地强降水

中图分类号: P456.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.092201

Research on Precipitation Correction for Hainan Island Based on Low-Level Circulation Similarity

LI Yumei^{1, 2, 3} LI Xun^{1, 2, 3} FENG Xiao^{1, 2, 3} WU Yu^{1, 2, 3}

1 Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou 570203

2 Xisha National Climatological Observatory, Haikou 570203

3 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

Abstract: The traditional historical frequency matching method (Hist-FMM) selects training samples by calendar date and does not distinguish circulation backgrounds, so it has difficulty in correcting the positional bias of model rainfall areas. In this paper, an improved scheme (Sim-FMM) is proposed, in which historical samples are retrieved by the similarity of 925 hPa wind direction and speed instead of calendar proximity. The tolerance settings are obtained from the coupling analysis between precipitation and the 925 hPa wind field and from sensitivity experiments. A wide window (30° in wind direction and 4 m s^{-1} in wind speed) without seasonal constraint is used for general precipitation, and a narrow window (10° and 1 m s^{-1}) together with a

*海南省自然科学基金项目(425QN500)、珠江流域(华南区域)气象科研开放基金项目(ZJLY202409-HAI01)和中国气象局暴雨基金项目(BYKJ2025M24)共同资助

2026 年 3 月 20 日收稿; 2026 年 9 月 22 日收修定稿

第一作者: 李玉梅, 从事天气预报研究. E-mail: 0526lym@163.com

通讯作者: 李勋, 正高, 从事天气预报研究. E-mail: cyrilpat@sina.com

±45-day seasonal constraint is used for rainstorms so that the samples can simultaneously meet the similar circulation and climate background. Verification based on observations at 416 stations over Hainan Island and ECMWF forecasts from December 2023 to May 2026 shows that the Sim-FMM scheme performs better than Hist-FMM as a whole. In the winter cold-air cases, false alarms over large areas are reduced and the rain/no-rain accuracy is increased by 1.9%. In spring and summer, the systematic underestimation of rainstorm magnitude is alleviated, with the spring rainstorm threat score (TS) raised by 8.4% during 2024—2026. For autumn heavy rainfall, however, Sim-FMM is slightly inferior to Hist-FMM. This is probably related to the strong seasonal concentration of autumn heavy rainfall and the limited ability for the regional average wind field at a single time to represent the heterogeneous structures of typhoons and shear lines.

Key words: frequency matching method, circulation similarity, precipitation correction, localized heavy rainfall

引 言

降水客观释用与订正的方法主要有频率匹配法（李俊等，2014；Zhu and Luo, 2015；智协飞和吕游，2019；潘留杰等，2022）、最优 TS 评分阈值法（吴启树等，2017；赵瑞霞等，2020）、概率匹配法（Chien et al, 2004；Clark et al, 2009；Gallus et al, 2010；Berenguer et al, 2012；Surcel et al, 2014；陈博宇等，2016）和最优百分位法（代刊等，2018；陈圣劼等，2019；张华龙等，2022）等。频率匹配法（FMM）依据预报与实况降水累积频率分布的差异做分位数映射，物理意义清楚，计算量小，订正效果稳定，在国内业务中应用最广。李俊等（2015）将其用于 AREM 模式降水订正，雨量与雨区范围的系统性偏差明显减小；苏翔等（2021）和王丽芳等（2021）的对比试验也显示，当模式雨区位移偏差不大、干湿偏差突出时，FMM 对各量级降水的强度与落区面积均有改善，TS 评分提高。智协飞和吕游（2019）、潘留杰等（2022）进一步把 FMM 与卡尔曼滤波结合，使不同时效和量级的订正效果得到改进。

这些方法多按预报时效、雨量阈值或固定时段划分训练集，按环流形势分类建模的工作仍较少。模式偏差与天气系统和环流背景关系密切：环流配置和天气尺度强迫不同，模式对水汽输送、辐合上升和降水落区的模拟能力也不同，偏差特征因而存在区别。李晓兰和符娇兰（2021）发现，5 月长波槽影响下 ECMWF 模式降水落区易出现西北向偏移；陈龙等（2024）检验表明，CMA-GD 模式的降水预报性能随风场类型变化，偏差与环流配置相关。李俊等（2014）也指出，降水偏差不止取决于时效和阈值，还与天气过程有关，应做分类订正。高星星等（2023）把降水分为系统性与非系统性两类分别进行频率匹配，分类方案的暴雨 TS 评分等指标优于未分类方案。

海南岛地处热带，常年处于非地转平衡状态，低层环流通过水汽输送与辐合影响对流活动，进而影响降水分布（Zhu et al, 2021；吴俞等，2023）。若不区分环流型地把历史同期所有样本全部用于频率匹配，各类环流的样本混在一个训练集里，模式在特定形势下的偏差

会被平均掉，订正效果随之下降。为此，本文以 925 hPa 风向、风速检索与预报时刻环流相似的历史样本，代替按日期截取样本的做法，建立基于低层环流相似性的频率匹配订正方案，并用观测和模式资料分季节、分流型检验其订正能力。

1 资料和方法

1.1 资料

本研究采用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）ERA5 全球再分析资料的 925 hPa 风场数据（Hersbach et al, 2020），时段为 2016 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日，水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，用于分析海南岛低层环流特征。模式资料为 ECMWF 细网格（EC）每日 08 时和 20 时（北京时，下同）起报 24 h 时效的 925 hPa 风场，水平分辨率 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ，用于环流相似性检索；另取 12~36 h 时效的 24 h 累计降水量预报，经双线性插值处理至海南岛智能网格（ $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 分辨率），作为频率匹配的订正对象。实况降水取自 2020 年 1 月 1 日至 2026 年 5 月 20 日海南岛 416 个气象观测站（18 个国家基准站和 398 个区域自动站）的逐日 24 h 累计降水量（08 时至次日 08 时和 20 时至次日 20 时），用作频率匹配的训练真值和检验基准。分析低层风速与降水空间对应关系时，另用中国气象局多源融合实况分析产品（CLDAS）（师春香等，2019），分辨率与插值后的模式数据一致，为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。

1.2 相似环流频率匹配订正方案

FMM 通过修正模式预报降水与实况降水的累积频率分布差异来消除系统性干湿偏差，使订正后的预报频率分布与实况一致（李俊等，2014；Zhu and Luo, 2015；苏翔等，2021；王丽芳等，2021）。传 Hist-FMM 按固定时间窗口（如目标日期前后 45 d）截取历史样本，做法简单，但未区分环流背景，不同环流型样本混在一起，订正的针对性不足。Sim-FMM 以低层环流相似代替日期邻近，在全历史样本库中检索与预报时刻 925 hPa 风向、风速相近的样本，构建动态训练集。两种方案的区别只在训练样本的选取方式，订正算法相同，均用分位数映射。

1.2.1 相似性判据构建

海南岛降水主要由低层水汽输送和辐合造成，取海南岛及周边区域（ $17^\circ \sim 21^\circ \text{N}$ ， $107.5^\circ \sim 112.5^\circ \text{E}$ ）平均的 925 hPa 风场作为相似性判据。预报时刻的区域平均风向、风速为 $t(\theta_{\text{fcst}}, V_{\text{fcst}})$ ，历史库中某时刻的区域平均风场为 $t'(\theta_{\text{hist}}, V_{\text{hist}})$ ，两者同时满足以下约束条件时判定为环流相似：

$$\begin{aligned} |\theta_{\text{hist}} - \theta_{\text{fcst}}| &\leq \Delta\theta \\ |V_{\text{hist}} - V_{\text{fcst}}| &\leq \Delta V \end{aligned}$$

式中： $\Delta\theta$ 和 ΔV 为风向、风速的容差阈值。敏感性试验给出两套取值：常规降水取 $\Delta\theta = 30^\circ$ 、 $\Delta V = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；强降水要求入选样本的环流更接近，故叠加历史同期约束，容差收紧至 $\Delta\theta = 10^\circ$ 、 $\Delta V = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

考虑到业务计算效率和低层环流在短时段内的稳定性,取累积降水时段中间时刻的 925 hPa 预报风场代表该时段的环流特征。订正 T 日 08 时至 $T+1$ 日 08 时的 24 h 累计降水时,检索基准用模式 $T-1$ 日 20 时起报的 T 日 20 时的预报风场。

1.2.2 动态训练集生成与降水订正

每个待订正时刻,Sim-FMM 在全历史库中检索所有满足相似条件的样本组成动态训练集,Hist-FMM 则固定截取同期 ± 45 d 样本。两种方案均用分位数映射做非线性订正,步骤为:(1)统计训练集内模式预报降水的累积频率分布,得到不同分位数对应的预报降水量;(2)统计同批样本实况降水的累积频率分布,得到相同分位数对应的观测降水量;(3)以分位数为纽带建立预报值与观测值的映射关系;(4)对实时预报值按该映射线性插值,得到订正后的降水量。

为避免极端值外插引发过度订正,订正后降水量的上、下限分别取 300 mm 和 0.1 mm,低于 0.1 mm 记为无降水。

1.3 试验设计与检验指标

对照试验设试验组(Sim-FMM)和对照组(Hist-FMM):前者按 925 hPa 风场约束动态检索样本,后者取当前日期前后 ± 45 d 的历史同期样本(目标年仅用前 45 d,以模拟实时业务)。

检验用海南岛 416 个观测站的降水实况,格点数据插值到站点时采用临近点插值,即将站点周围四个网格点中距离最近的一个格点值赋给站点(熊敏谔, 2013)。主要评价指标为晴雨准确率和 TS 评分(Schaefer, 1990),辅助指标包括空报率、漏报率以及偏差(Bias)等。

2 海南岛降水与 925 hPa 环流的耦合特征及订正依据

2.1 低层环流气候态特征

用 2016 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日逐日 08 时 ERA5 再分析资料,按 5°间隔统计研究区域 925 hPa 风向的出现频次(图 1a)。海南岛低层盛行风向集中在 $40^{\circ}\sim 240^{\circ}$,即风向玫瑰图中自东北经东、东南、南至西南的扇区;出现频次由高到低依次为东到东北风、南到西南风、东到东南风和东南风。

逐月分布(图 1b)显示季风转换特征:夏季(6–8 月)受西南季风控制,风向集中,以南到西南风为主;秋季(9–11 月)为转换期,盛行风向由西南风转向东北风,变率较大;冬季(12 月至次年 2 月)受冷空气主导,12 月的风向集中度最高、离散度最小,以稳定的东北风为主,冷空气南下影响最为频繁且主力路径偏西、偏南;1–2 月除东北气流外,偏东风及东南风的出现频次明显增加,冷空气主体路径转为偏东、偏北,冷高压东移出海后底部回流对海南岛的影响增强;春季(3–5 月)再由冬季型东北风向夏季型西南风过渡。

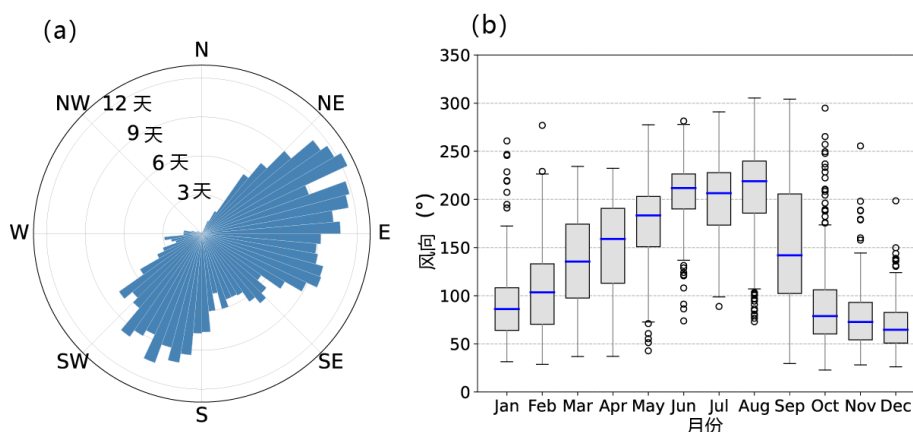


图1 2016—2025 年海南岛附近区域平均 925 hPa 风向特征

(a) 风向年均日数玫瑰图, (b) 逐月风向箱线图

Fig.1 Characteristics of regionally averaged wind direction at 925 hPa around Hainan Island during 2016–2025

(a) rose chart of annual mean days of wind direction, (b) boxplot of monthly wind direction

2.2 降水与低层风向的耦合关系

按海南岛 925 hPa 盛行风向的分布与气象学方位定义, 把风向划分为 5 个扇区: 东北风 (NE, $25^{\circ} \sim 70^{\circ}$)、偏东风 (E, $70^{\circ} \sim 115^{\circ}$)、东南风 (SE, $115^{\circ} \sim 160^{\circ}$)、偏南风 (S, $160^{\circ} \sim 205^{\circ}$) 和西南风 (SW, $205^{\circ} \sim 250^{\circ}$), 2020–2025 年各扇区盛行日数分别为 425、556、353、416、369 d。各扇区对应的年均降水频率和降水量空间分布见图 2, 不同风向下降水空间分布差别明显, 这与地形强迫和环流背景的共同作用有关。

东北风与偏东风下 (图 2a, 2b), 降水呈“中东多、西南少”的格局, 偏东风时降水最强, 其频率和降水量在各扇区中最大。东北风控制时, 降水中心在五指山北侧的琼中一带, 频率为 45%~65%, 平均日降水量为 4~6 mm, 属冬季冷空气降水; 偏东风时, 中心位于中东部的琼中、万宁、琼海等地, 频率超过 65%, 平均日降水量可达 16 mm 以上, 与秋季偏东急流降水一致。

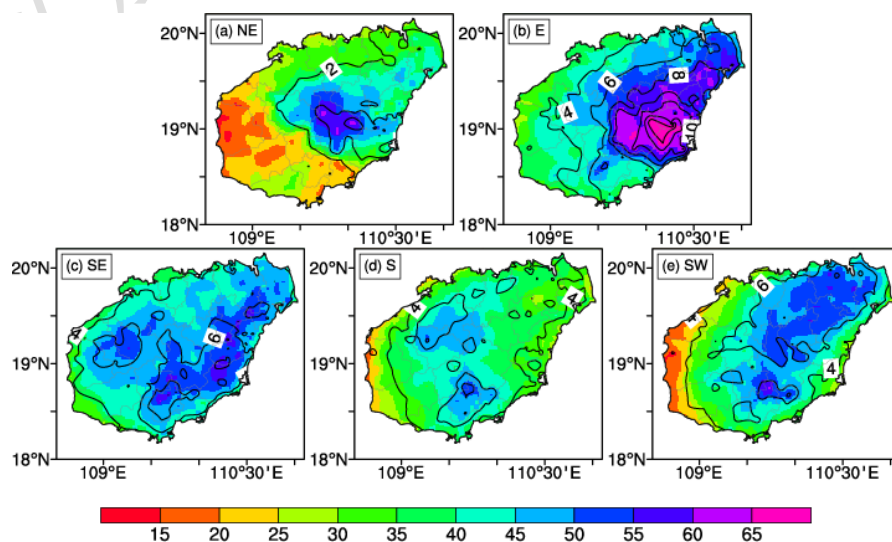


图 1 2020—2025 年不同风向下海南岛年均降水频率（填色，单位：%）及平均日降水量（等值线，单位：mm）的空间分布

(a) 东北风(NE), (b) 偏东风(E), (c) 东南风(SE), (d) 偏南风(S), (e) 西南风(SW)

Fig.2 Spatial distribution of annual average precipitation frequency (colored, unit: %) and average daily rainfall (contour, unit: mm) in Hainan Island under different wind directions in 2020—2025

(a) NE wind, (b) E wind, (c) SE wind, (d) S wind, (e) SW wind

东南风、偏南风与西南风下，降水中心随风向移动（图 2c, 2d, 2e）。东南风时高值区在东部和东南部内陆，频率为 50%~55%，平均日降水量为 6~8 mm；偏南风时中心移到南部内陆和西北部内陆，频率约为 45%，平均日降水量约为 6 mm；西南风时高值区北移至中北部，频率约为 50%，平均日降水量约为 6 mm。这三种风向多出现在春、夏季，此时南半部降水多发生于夜间至次日上午，北半部降水则以午后为主，与海陆风辐合线的日变化和地形有关。

吴俞等（2023）分析海南岛暖季（4—9 月）非台风降水与 850 hPa 流场的关系，发现不同方向气流对应的降水高频区差别明显：偏南气流下降水主要在西北部与中部，西南气流下降水落区随风速强弱分别位于东北部或中西部。本研究用层次（925 hPa）和季节跨度与之不同，但同样表明低层风向对降水落区有决定作用。

2.3 降水与低层风速的耦合关系

风速不只表征水汽输送动力条件，也影响降水的空间分布。取图 1a 中出现频次最高的两类风向，即东到东北风与西南风，分别计算海南岛陆地的纬向平均（经度-风速）和经向平均（纬度-风速）降水频率分布（图 3）。

东北风下（图 3a），全岛降水频率普遍低于 50%，呈“东多西少”，与图 2a 一致。6~10 m s^{-1} 最有利于降水，此时东部频率最高，为 30%~45%；4~6 m s^{-1} 时，东部地区频率最低，不足 20%；10~14 m s^{-1} 时频率又回落至 20%~30%。统计时段内未出现平均风速低于 4 m s^{-1} 的东北风个例，说明影响海南岛的东北气流通常具有一定强度。

西南风下（图 3b），降水频率整体较高，且降水量中心随风速变化明显。Zhu et al (2021) 曾指出，海南岛暖季对流降水落区与低层西南风风速关系密切：风速偏弱时水汽在山区辐合抬升，风速偏强时降水系统更易向背风一侧的平原传播。本文结果与之相符，并量化了降水中心随风速的变化：风速小于 5 m s^{-1} 时，降水高频区集中在五指山以南，超过 60% 的频率中心位于 18.6°N 附近。5~7 m s^{-1} 时频率中心北移到中部山区（18.7°~19.2°N），气流向北输送水汽的能力随风速增大而增强；8~10 m s^{-1} 时中心继续北移到北部地区（19.6°~20.1°N）；风速超过 10 m s^{-1} 后降水频率反而下降，降水高频区收缩到北部沿海；大于 12 m s^{-1} 时全岛陆地降水频率基本低于 25%，过强的西南气流可能使水汽快速过境而少有降水。

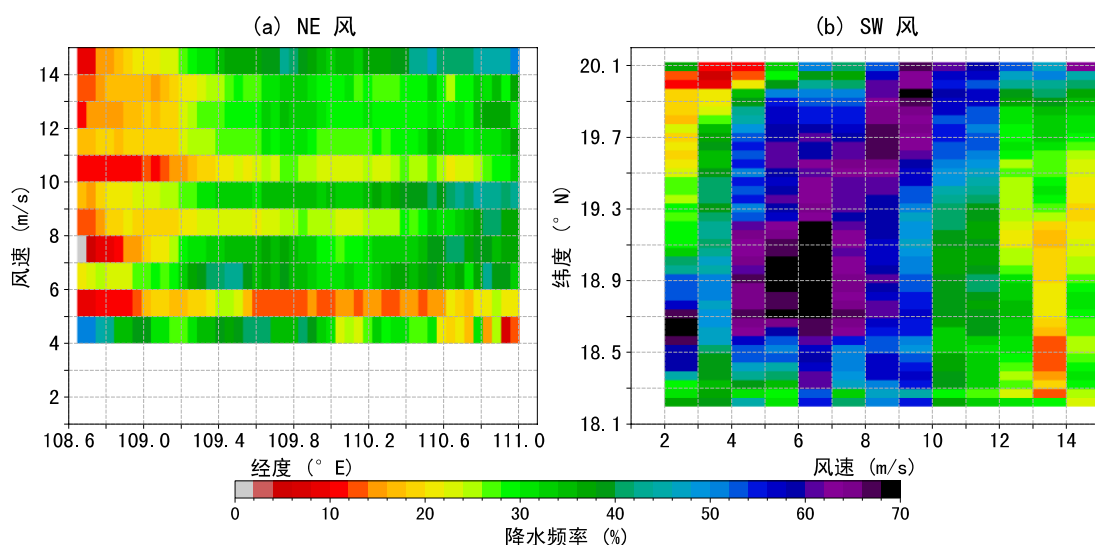


图2 2020—2025年海南岛陆地平均降水频率随风速的分布特征

(a) 东北风影响下的纬向平均分布, (b) 西南风影响下的经向平均分布

Fig.3 Characteristics of land-averaged precipitation frequency in Hainan Island as a function of wind speed in 2020—2025

(a) zonal mean under NE winds, (b) meridional mean under SW winds

以上结果表明, 925 hPa 风向与风速共同影响海南岛降水的空间分布。各风向都存在相对有利的风速区间。据此, 以下将按 925 hPa 风向、风速双重相似检索历史样本, 使训练集内的环流特征尽量一致, 并用敏感性试验确定容差取值, 检验 FMM 在不同流型下订正效果。

3 相似环流样本采集方案试验

为确定容差取值, 设计多组对照试验, 比较不同风向、风速容差下的晴雨准确率和暴雨以上 TS 评分。风向容差取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 四个量级, 风速容差取 1、2、3、4、5 m s^{-1} 五个量级, 共 20 种组合, 分别采集样本并回算预报。试验训练时段为 2023 年 12 月 1 日至 2025 年 11 月 30 日, 共 24 个月, 包含海南岛各季节的典型环流和主要天气过程。检验时效为 36 h, 结果如图 4a, 4b 所示。

3.1 无历史同期约束下的风场容差敏感性

图 4a 给出晴雨准确率对风向、风速容差的响应, 小雨以上 TS 评分 (图略) 的变化相似。固定其中一项容差时, 两类评分基本随另一项容差增大呈上升, 在 $30^{\circ} 4 \text{ m s}^{-1}$ 的组合下最优, 晴雨准确率 75.58%, 小雨以上 TS 评分 0.541。暴雨以上降水 (图 4b) 则不同, TS 评分主要取决于风速容差: 各风向容差下的最优值都出现在 1 m s^{-1} , 其中 $10^{\circ} 1 \text{ m s}^{-1}$ 最高, 为 0.243。可见强降水对低层风场的细微差别十分敏感, 容差放宽会引入不相似的样本, 反而降低订正效果。

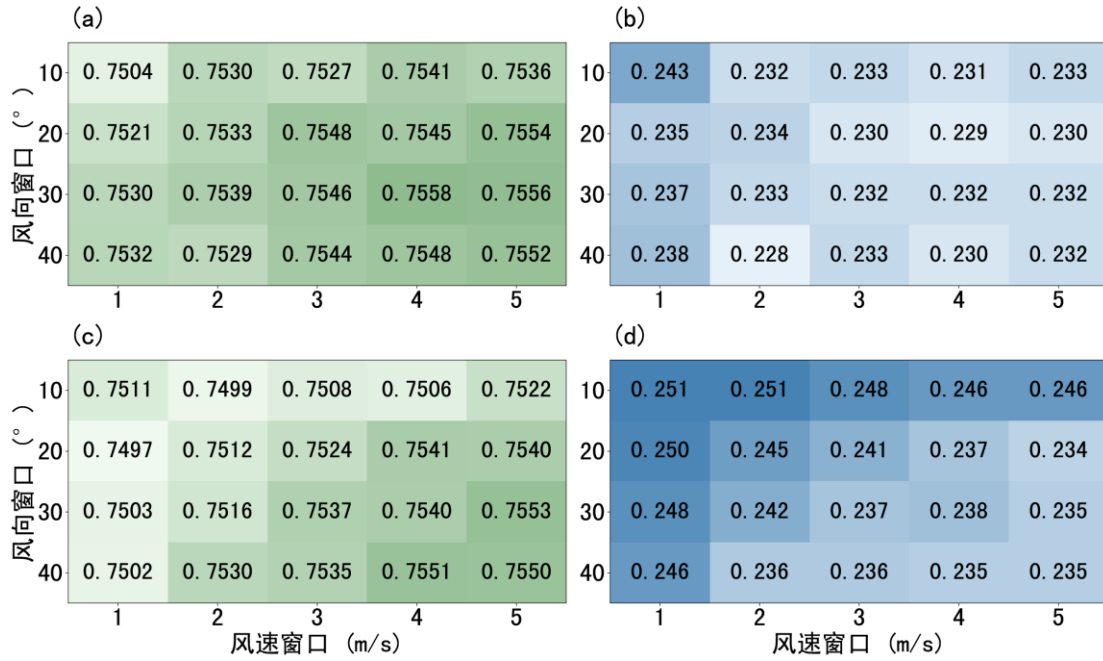


图4 不同约束条件下 Sim-FMM 参数敏感性试验结果无历史同期约束(a)晴雨准确率、(b)暴雨 TS 评分及有历史同期约束(c)晴雨准确率、(d)暴雨 TS 评分

Fig.4 (a) Rain/no-rain accuracy and (b) TS score rainstorm without historical analog constraints, and (c) rain/no-rain accuracy and (d) TS score of rainstorm with historical analog constraints for Sim-FMM parameter sensitivity experiments under different constraints

同一时段 Hist-FMM 的晴雨准确率为 74.71%，小雨以上 TS 评分为 0.528，暴雨以上 TS 评分为 0.253。与之相比，Sim-FMM 在常规降水上有优势，晴雨准确率（75.58%）和小雨以上 TS 评分（0.541）分别提高 1.17%和 2.46%；暴雨以上 TS 评分（0.243）则低 3.95%。

上述结果表明，只按环流相似取样本能提高常规降水预报技巧，但暴雨以上降水不及 Hist-FMM，需在选取样本时加入季节气候背景约束。

3.2 引入历史同期约束的改进效果

为此，在风场容差之外再加 45 d 历史同期窗口（记为历史同期 Sim-FMM），重新采集样本并检验，结果如图 4c，4d 所示。

常规降水（图 4c）的评分随容差增大而上升，与无约束方案趋势相同，但窄风向、窄风速时低于无约束方案（图 4a）。在 30°/5 m s⁻¹ 时最优，晴雨准确率 75.53%，略低于无约束结果，小雨以上 TS 评分 0.540，与无约束最优值接近。

暴雨以上降水（图 4d）的 TS 评分有所提高，在 10°/1 m s⁻¹、10°/2 m s⁻¹ 以及 20°/1 m s⁻¹ 三组参数下均接近 0.251，高于无历史同期约束时最优值 0.243，也更接近 Hist-FMM 的 0.253，纯风场匹配损失的强降水预报技巧得到部分弥补。

4 订正效果评估

4.1 分季节订正效果

按上述最优参数做分季节检验，比较 EC 原始预报、Hist-FMM 和 Sim-FMM。Sim-FMM 在晴雨准确率检验中（图 5a）用无历史同期约束的 $30\%4\text{ m s}^{-1}$ 组合，暴雨及以上 TS 评分检验（图 5b）用叠加 45 d 历史同期约束的 $10\%1\text{ m s}^{-1}$ 组合。检验时段包括训练期（2023 年 12 月至 2025 年 11 月）和独立验证期（2025 年 12 月至 2026 年 5 月）。

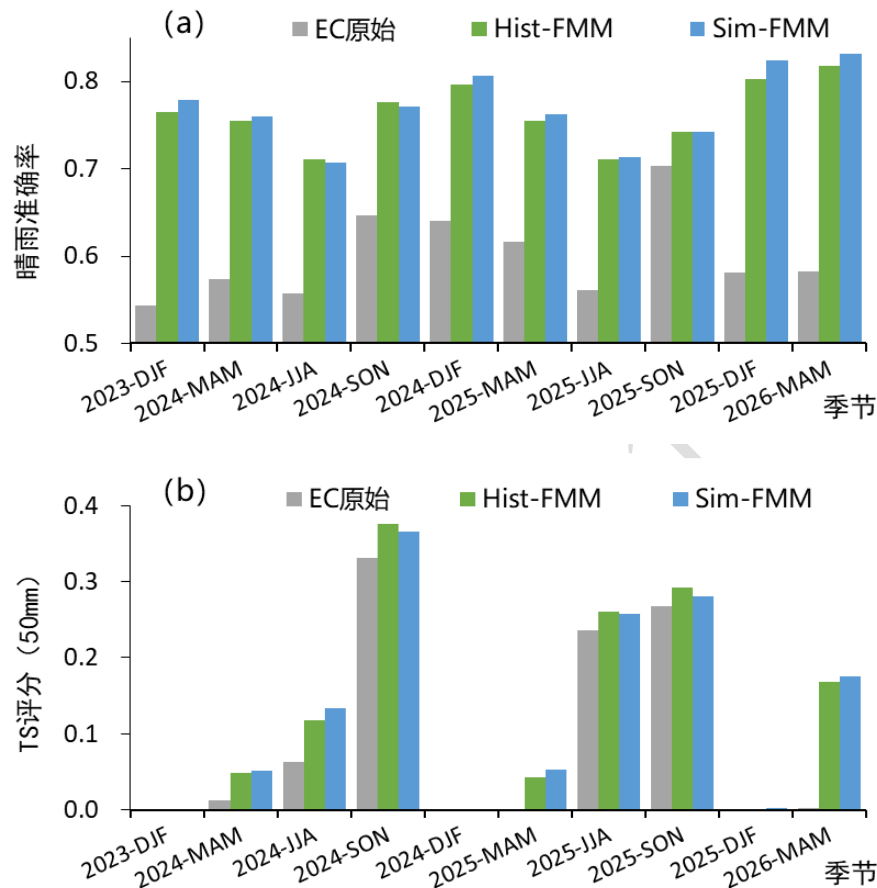


图3 EC 原始预报、Hist-FMM 与 Sim-FMM 的分季节评分对比

(a)晴雨准确率, (b)暴雨以上 TS 评分

Fig.5 Seasonal verification results of ECMWF forecast, Hist-FMM correction and Sim-FMM correction

(a) rain/no-rain accuracy, (b) TS for rainstorm and above

由图 5 可见，两种 FMM 方案对 EC 原始预报都有较好订正能力，季节差异明显。晴雨准确率（图 5a）：Sim-FMM 连续三年在冬、春季均高于 Hist-FMM，夏、秋季与之持平或略偏低。冬季差别最大，2023—2025 年冬季平均晴雨准确率 Hist-FMM 为 78.8%，Sim-FMM 为 80.3%，提高 1.9%。暴雨以上 TS 评分（图 5b）：2024—2026 年春季 Sim-FMM 为 0.094，Hist-FMM 为 0.086，提高 8.4%，对 EC 春季暴雨漏报有一定弥补（EC 平均暴雨以上 TS 评分仅 0.005）。夏季两年结果相反，2024 年夏季 Sim-FMM 较好，2025 年夏季 Hist-FMM 较好，可能与影响系统不同有关，2024 年夏季无热带气旋影响海南岛，2025 年夏季则多个热

带气旋影响。秋季 Sim-FMM 总体不如 Hist-FMM，2024、2025 年秋季暴雨以上 TS 评分均偏低 0.01 左右。

上述季节差异与降水机制有关：海南岛冬季降水由冷空气东北气流造成，频次低、量级小；春夏季主要受南到东南气流影响（图 1b），以局地强降水为主。冬季靠风场匹配识别相似的冷空气过程，落区预报更细，空报减少；春夏季则用较窄的风场容差提高局地强降水的捕捉能力。以下从训练期（2023 年 12 月至 2025 年 11 月）和独立验证期（2025 年 12 月至 2026 年 5 月）各选一次典型过程做对比。

4.2 冬季冷空气降水的订正效果

图 6 给出两次冬季降水过程的订正效果。2024 年 12 月 2 日 08 时至 3 日 08 时，全岛出现分散性小阵雨，主要在东北部和南部局部（图 6a₁）。EC 原始预报全岛大部有小雨，空报范围较大，晴雨准确率仅 40.1%（图 6b₁）。Hist-FMM 订正后降水集中到东北部，准确率升至 62.6%（图 6c₁），但细节仍不足；Sim-FMM 消去东北部大部分虚假降水，同时保留南部局地的降水信号，与实况更为接近，晴雨准确率 74.9%（图 6d₁）。

2025 年 12 月 22 日 08 时至 23 日 08 时，降水主要在中部、东部及西南部（图 6a₂）。EC 原始预报降水覆盖全岛大部，北部和南部大范围空报，同时漏报西部东方市的降水（图 6b₂）。Hist-FMM 消去西北部和南部的虚假降水，保留中东部主要雨区，晴雨准确率 56.8%（图 6c₂）。Sim-FMM 进一步压缩北部和西部的降水范围，落区更接近实况（图 6d₂）。EC 对西部降水存在系统性漏报，FMM 类方法难以订正，本次过程的整体准确率因此受限；但 Sim-FMM 仍达 70.9%，高于 Hist-FMM。

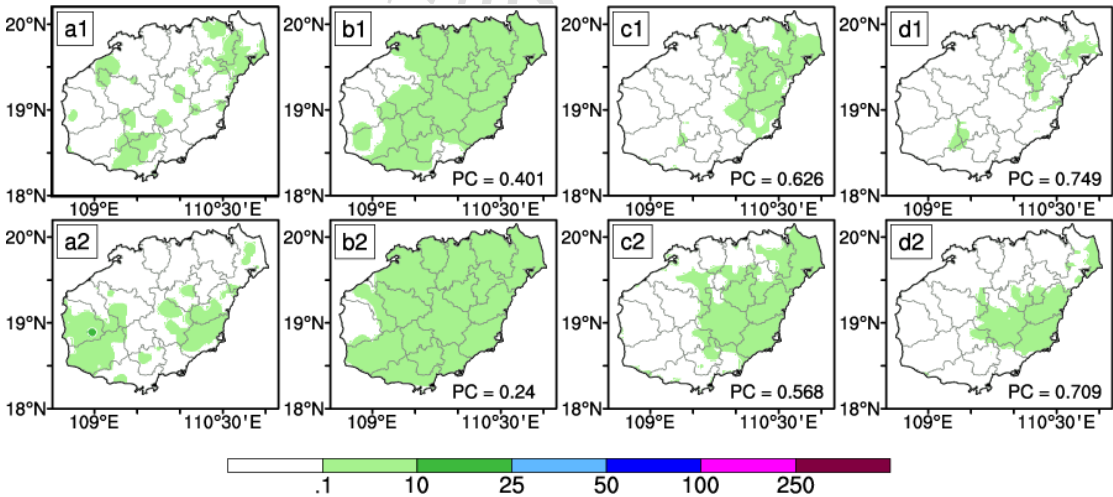


图 6 海南岛两次冬季降水过程累计降水量分布及订正效果

(a₁) 2024 年 12 月 2 日 08 时至 3 日 08 时实况，(a₂) 2025 年 12 月 22 日 08 时至 23 日 08 时实况，(b₁, b₂) EC 模式原始预报，(c₁, c₂) Hist-FMM 订正，(d₁, d₂) Sim-FMM 订正

Fig. 6 Accumulated precipitation and correction results of two winter rainfall events in Hainan Island

(a₁) observations (08:00 BT 2 to 08:00 BT 3 December 2024), (a₂) observations (08:00 BT 22 to 08:00 BT 23

4.3 局地强降水的订正效果

图 7、图 8 为两次春夏季过程的订正结果。2025 年 6 月 25 日 08 时至 26 日 08 时，东北部出现大到暴雨、局地大暴雨，南部有中到大雨（错误!未找到引用源。a₁）。EC 原始预报的降水形势大体正确，但量级偏小，只报出东北部中到大雨、局地暴雨（图 7b₁）。Hist-FMM 订正为东北部大到暴雨、南部局地大雨，暴雨落区与实况基本一致（图 7c₁）。Sim-FMM 进一步提高量级，报出东北部局地大暴雨，南部内陆大雨范围也比 Hist-FMM 大（图 7d₁）。分级检验（图 8a）显示，该过程暴雨及以下量级降水普遍空报（Bias>1）。Sim-FMM 的空报率略高，但大暴雨以上量级 TS 评分约 0.16，另两种产品在该量级没有预报能力；暴雨以上量级 Sim-FMM 与 Hist-FMM 相近，TS 评分均约 0.41。

2026 年 5 月 15 日 08 时至 16 日 08 时，北部沿海、东北部沿海和东南部内陆局地出现大到暴雨，个别站达大暴雨量级（图 7a₂）。EC 原始预报只给出东北部和东南部局地大雨的信号，未报出暴雨及以上量级降水（图 7b₂）。Hist-FMM 把北部沿海和东南部提升到暴雨量级，整体接近实况，但落区零散，中东部沿海和西南部内陆有暴雨空报（图 7c₂）。Sim-FMM 的暴雨落区更集中，东北部暴雨范围更大，并给出局地大暴雨的信号，东部沿海和西南部内陆的虚假强降水被降到大雨量级（图 7d₂）。分级检验（图 8b）显示，三种方案在小雨、中雨和大雨以上量级的 TS 评分接近，差别主要在于暴雨以上量级：EC 原始预报 TS 评分为 0，Hist-FMM 为 0.094，Sim-FMM 为 0.161，且 Sim-FMM 的暴雨空报率低于 Hist-FMM。

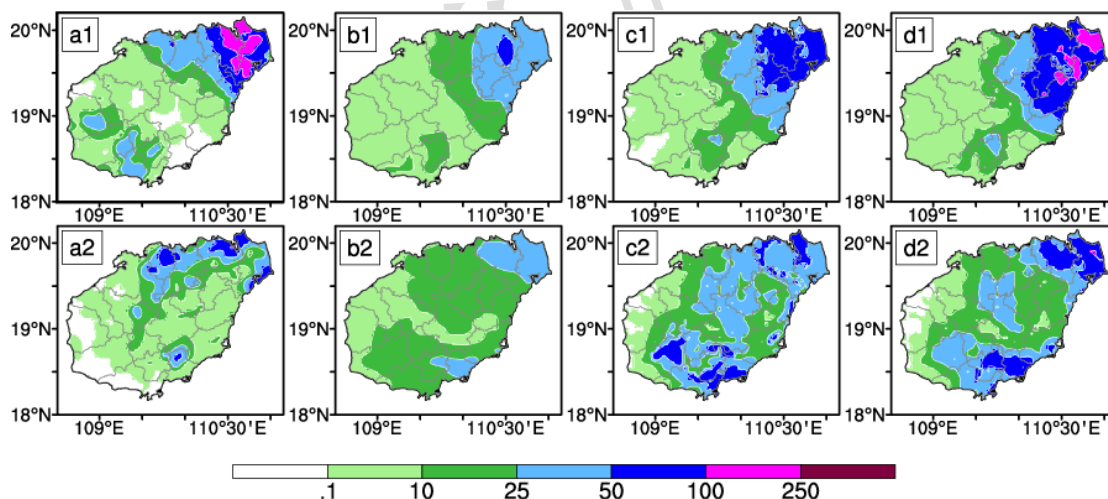


图 4 海南岛两次春夏季降水过程累计降水量分布及订正效果

(a₁) 2025 年 6 月 25 日 08 时—26 日 08 时实况, (a₂) 2026 年 5 月 15 日 08 时—16 日 08 时实况, (b₁, b₂) EC 模式原始预报, (c₁, c₂) Hist-FMM 订正, (d₁, d₂) Sim-FMM 订正

Fig.7 Accumulated precipitation and correction results of two spring-summer rainfall events in Hainan Island

(a₁) observations (08:00 BT 25 to 08:00 BT 26 June 2025), (a₂) observations (08:00 BT 15 to 08:00 BT 16 May 2026), (b₁, b₂) ECMWF forecasts, (c₁, c₂) Hist-FMM corrections, (d₁, d₂) Sim-FMM corrections

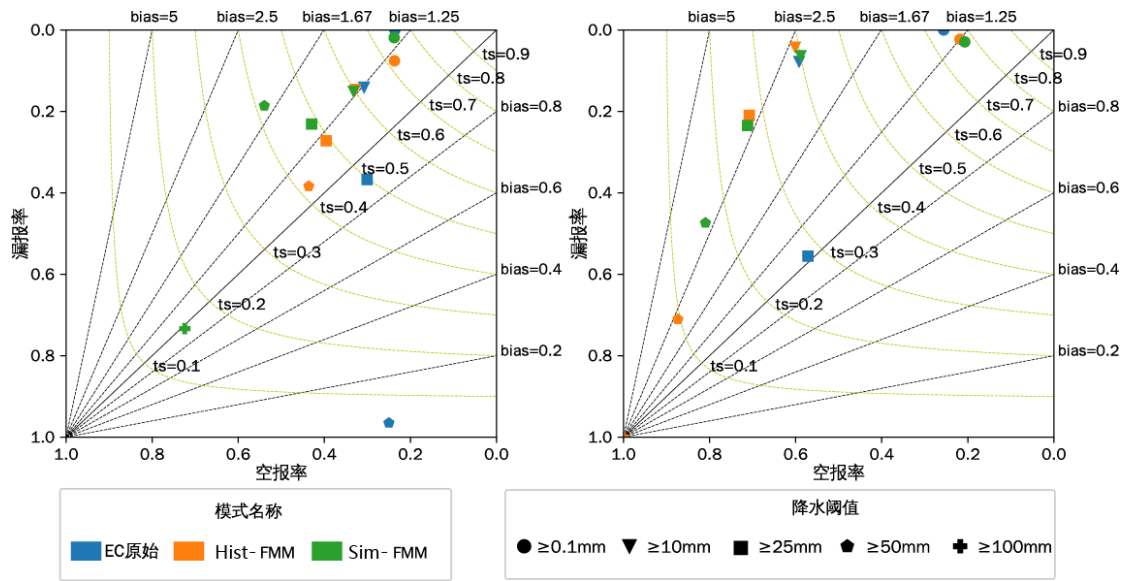


图5 两次春夏季降水过程的分级综合检验图

(a) 2025年6月25日08时至26日08时, (b) 2026年5月15日08时至16日08时

Fig.8 Hierarchical comprehensive verification of the two spring-summer rainfall events from (a) 08:00 BT 25 to 08:00 BT 26 June 2025 and (b) 8:00 BT 15 to 08:00 BT 16 May 2026

5 结论与讨论

本文用 ERA5 再分析资料、ECMWF 细网格预报和海南岛 416 个观测站降水资料, 分析海南岛降水与 925 hPa 风场的耦合关系, 并用 925 hPa 风向、风速的双重相似性代替日期邻近来选取频率匹配训练样本, 建立 Sim-FMM 方案, 分季节、分型别做了检验, 主要结论如下。

(1) 925 hPa 风向和风速共同影响海南岛降水的空间分布。风向决定降水中心所在的方位, 风速则影响中心位置: 西南风下, 降水高频中心随风速增大由五指山以南 (18.6°N 附近) 逐步北移到北部 (19.6°~20.1°N), 风速超过 10 m·s⁻¹ 后降水频率反而下降; 东北风下 6~10 m·s⁻¹ 最有利于东部降水。

(2) 两类降水需要不同的容差设置。常规降水用 30°/4 m·s⁻¹ 的宽窗口且不设历史同期约束, 样本量充足, 晴雨准确率最高 (75.58%); 暴雨以上降水用 10°/1 m·s⁻¹ 并叠加 ±45 d 历史同期约束, TS 评分可达 0.251, 接近 Hist-FMM 的 0.253。

(3) 2023 年 12 月至 2026 年 5 月的检验中, Sim-FMM 总体优于 Hist-FMM。冬季冷空气过程因风场匹配严格, 大范围空报减少, 2023—2025 年冬季平均晴雨准确率由 78.8% 提高到 80.3%, 2024 年 12 月 2 日和 2025 年 12 月 22 日两次过程分别达 74.9% 和 70.9%; 春夏季局地强降雨的量级低估得到改善, 2024—2026 年春季暴雨以上 TS 评分由 0.086 提高到 0.094。。

秋季 Sim-FMM 的订正效果不如 Hist-FMM。海南岛秋季降水多由台风、偏东急流和切变线造成 (马学款等, 2012; 冯文等, 2015; 李玉梅等, 2020), 季节集中性强; Hist-FMM

按日期取样本,天然含有这类季节背景;而 Sim-FMM 只按风场检索,容易从其他季节选入动力相似、热力背景差别较大的样本。此外,单时次的区域平均风场也难以表征台风、切变线非的辐合和切变结构,相似样本代表性不足。后续可加入相对涡度、散度等特征量,或对秋季主要影响系统单独建模订正。

Sim-FMM 适用于降水落区偏差小、量级存在系统性偏差的确定性模式降水预报,其效果还取决于历史样本库的时长与质量:样本库偏短时相似样本不足,拟合偏差偏大;偏长时又会引入气候态差别较大的样本。样本库时长如何选取,还需结合海南岛降水气候特征做进一步试验。

参考文献

- 陈博宇, 郭云谦, 代刊, 等. 2016. 面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验[J]. 气象, 42(12): 1465-1475. Chen B Y, Guo Y Q, Dai K, et al, 2016. Research for the ensemble member optimization correction technique on typhoon rainstorm forecast and its application experiment[J]. Meteor Mon, 42(12): 1465-1475 (in Chinese).
- 陈龙, 陈静静, 胡媚, 等, 2024. 华南快速循环同化模式在湖南不同环流型下的小时降水预报性能检验[J]. 气象, 50(4): 434-448. Chen L, Chen J J, Hu M, et al, 2024. Evaluation of hourly quantitative precipitation forecast of the Rapid Updating Cycle Assimilation and Forecasting System in South China based on circulation classification in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 50(4): 434-448(in Chinese).
- 陈圣劼, 刘梅, 张涵斌, 等, 2019. 集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估[J]. 气象, 45(7): 893-907. Chen S J, Liu M, Zhang H B, et al, 2019. Evaluation on forecasting heavy rainfall over Jiangsu Region using ensemble forecast techniques and products[J]. Meteor Mon, 45(7): 893-907 (in Chinese).
- 代刊, 朱跃建, 毕宝贵, 2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报, 76(4): 493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 493-510 (in Chinese).
- 冯文, 符式红, 赵付竹, 2015. 近 10 年海南岛后汛期特大暴雨环流配置及其异常特征[J]. 气象, 41(2): 143-152. Feng W, Fu S H, Zhao F Z, 2015. Circulation of extreme rainstorm and its anomalous characteristics during post-flood period of the last decade in Hainan Island[J]. Meteor Mon, 41(2): 143-152 (in Chinese).
- 高星星, 潘留杰, 娄盼星, 等, 2023. 一种改进的频率匹配法在网格降水预报订正中的应用[J]. 气象, 49(11): 1371-1383. Gao X X, Pan L J, Lou P X, et al, 2023. Application of an improved frequency matching method in grid precipitation forecast correction[J]. Meteor Mon, 49(11): 1371-1383 (in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 陈超君, 2014. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J]. 气象,

- 40(5): 580-588. Li J, Du J, Chen C J, 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction[J]. Meteor Mon, 40(5): 580-588(in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 陈超君, 2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究[J]. 气象, 41(6): 674-684. Li J, Du J, Chen C J, 2015. Applications of "Frequency-Matching" method to ensemble precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 41(6): 674-684 (in Chinese).
- 李晓兰, 符娇兰, 2021. 基于 CRA 技术的华南前汛期强降水 EC 模式预报误差分析[J]. 热带气象学报, 37(2): 194-206. Li X L, Fu J L, 2021. Forecast error analysis of EC model for heavy rainfall during annually first rainy season in South China based on CRA method[J]. J Trop Meteor, 37(2): 194-206 (in Chinese).
- 李玉梅, 李勋, 周方聪, 2020. 海南岛冷空气降水天气形势差异分析[J]. 气象与环境学报, 36(1): 43-50. Li Y M, Li X, Zhou F C, 2020. Analysis of the background differences of precipitation influenced by cold air in Hainan Island[J]. J Meteor Environ, 36(1): 43-50 (in Chinese).
- 马学款, 符娇兰, 曹殿斌, 2012. 海南 2008 年秋季持续性暴雨过程的物理机制分析[J]. 气象, 38(7): 795-803. Ma X K, Fu J L, Cao D B, 2012. Study on physical mechanism of the persistent heavy rainfall event in autumn 2008 over Hainan[J]. Meteor Mon, 38(7): 795-803 (in Chinese).
- 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等, 2022. 基于卡尔曼动态频率的 ECMWF 降水预报订正[J]. 气象, 48(1): 73-83. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al, 2022. ECMWF precipitation calibration based on the Kalman dynamic frequency matching method[J]. Meteor Mon, 48(1): 73-83 (in Chinese).
- 师春香, 潘昉, 谷军霞, 等, 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 77(4): 774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 774-783 (in Chinese).
- 苏翔, 袁慧玲, 朱跃建, 2021. 四种定量降水预报客观订正方法对比研究[J]. 气象学报, 79(1): 132-149. Su X, Yuan H L, Zhu Y J, 2021. A comparative study of four objective quantitative precipitation forecast calibration methods[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 132-149 (in Chinese).
- 王丽芳, 漆梁波, 周伟, 等, 2021. 频率匹配技术在暴雨预报中的应用及改进分析[J]. 暴雨灾害, 40(4): 352-361. Wang L F, Qi L B, Zhou W, et al, 2021. On the application and improvement of the frequency matching method to rainstorm forecasts[J]. Torrential Rain and Disasters, 40(4): 352-361 (in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等, 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报, 28(3): 306-317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al, 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3): 306-317 (in Chinese).
- 吴俞, 李玉梅, 李勋, 等, 2023. 海南岛暖季区域数值模式降水精细化预报检验[J]. 气象,

- 49(2): 235-248. Wu Y, Li Y M, Li X, et al, 2023. Verification of precipitation refinement forecast of regional numerical models in the warm season of Hainan Island[J]. Meteor Mon, 49(2): 235-248 (in Chinese).
- 熊敏谔, 2013. 滑动窗口的普通克里格方法在降水量插值中的应用[J]. 气象, 39(4): 486-493.
- Xiong M Q, 2013. Application of the moving window ordinary Kriging method in precipitation interpolation[J]. Meteor Mon, 39(4): 486-493 (in Chinese).
- 张华龙, 程正泉, 肖柳斯, 等, 2022. 集合百分位融合法在广东台风降水预报中的改进[J]. 气象, 48(1): 84-95. Zhang H L, Cheng Z Q, Xiao L S, et al, 2022. Improvement of the optimal percentile fusion method based on ensemble forecast of typhoon rainfall in Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 48(1): 84-95 (in Chinese).
- 赵瑞霞, 代刊, 金荣花, 等, 2020. OTS、MOS 和 OMOS 方法及其优化组合应用于 72 h 内逐 3 h 降水预报的试验分析研究[J]. 气象, 46(3): 420-428. ZHAO Ruixia, DAI Kan, JIN Ronghua, et al, 2020. Comparison of OTS, MOS, OMOS methods and their combinations applied in 3 h precipitation forecasting out to 72 h[J]. Meteor Mon, 46(3): 420-428 (in Chinese).
- 智协飞, 吕游, 2019. 基于频率匹配法的中国降水多模式预报订正研究[J]. 大气科学学报, 42(6): 814-823. Zhi X F, Lyu Y, 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method[J]. Trans Atmos Sci, 42(6): 814-823(in Chinese).
- Berenguer M, Surcel M, Zawadzki I, et al, 2012. The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part II: Intercomparison among numerical models and with nowcasting[J]. Mon Wea Rev, 140 (8): 2689-2705.
- Chien F C, Jou B J D, 2004. MM5 ensemble mean precipitation forecasts in the Taiwan area for three early summer convective (Mei-Yu) seasons[J]. Wea Forecasting, 19 (4): 735-750.
- Clark A J, Gallus Jr W A, Xue M, et al, 2009. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convectionparameterizing ensembles[J]. Wea Forecasting, 24 (4): 1121-1140.
- Gallus Jr W A, 2010. Application of object-based verification techniques to ensemble precipitation forecasts[J]. Wea Forecasting, 25 (1): 144-158.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Royal Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Schaefer J T, 1990. The critical success index as an indicator of warning skill[J]. Wea Forecasting, 5(4): 570-575.
- Surcel M, Zawadzki I, Yau M K, 2014. On the filtering properties of ensemble averaging for storm-scale precipitation forecasts[J]. Mon Wea Rev, 142 (3): 1093-1105.
- Zhu L, Bai L Q, Chen G X, et al, 2021. Convection initiation associated with ambient winds and

local circulations over a tropical island in South China[J]. Geophys Res Lett, 48(16): e2021GL094382.

Zhu Y J, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. Wea Forecasting, 30(5): 1109-1124.