

# 海南岛空气质量概况及预报效果检验

佟金鹤, 符传博, 刘丽君

海南省气象科学研究所, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2023年11月10日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

GRACEs模式是海南岛空气质量预报业务主要参考模式产品之一, 为全面了解该模式对海南岛的预报效果, 提高业务人员对模式产品的订正能力, 使用海南岛18个市县的空气质量实况观测数据对GRACEs模式的预报产品进行预报效果检验。结果显示: (1) 2019~2021年, 海南岛空气质量以优良为主, 优良天气占比98.74%, 良等级及以上天气中, 首要污染物以O<sub>3</sub>为主(88.72%), 其次为PM<sub>2.5</sub> (5.88%)和PM<sub>10</sub> (5.33%); (2) GRACEs模式预报的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub> (平均误差)和RMSE (均方根误差)最低, AQI和O<sub>3</sub>误差水平较高, 归一化偏差(NMB)显示O<sub>3</sub>和AQI数值上均接近0, PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>预报值普遍高于实测值; (3) 空气质量为优等级时, 空气质量等级TS评分最高, 模式欠缺对良二级以上等级的预报能力; 无首要污染物时, 首要污染物预报TS评分最高, 首要污染物为O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>时, TS评分较低。

## 关键词

GRACEs, 误差分析, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>

# Overview of Air Quality in Hainan Island and Verification of Forecasting Effectiveness

Jinhe Tong, Chuanbo Fu, Lijun Liu

Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster, Prevention and Mitigation of Hainan Province, Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou Hainan

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The GRACEs model was one of the main reference model products for air quality forecasting in Hainan Island. In order to comprehensively understand the forecasting effect of this model on Hainan Island and improve the correction ability of forecaster for model products. The air quality observation data of 18 stations in Hainan Island were used to verify the air quality forecasted of

**GRACEs model. The results showed as follows: (1) During 2019~2021, the air quality of Hainan Island was mainly good, with the proportion of 98.74%. In the second-class weather and above, the main pollutant was O<sub>3</sub> (88.72%), followed by PM<sub>2.5</sub> (5.88%) and PM<sub>10</sub> (5.33%). (2) The MB (mean error) and RMSE (root mean square error) of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>'s concentration were the lowest, followed by AQI and O<sub>3</sub>. The Normalized Mean Bias (NMB) showed that O<sub>3</sub> and AQI are close to 0, and the forecast results of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> are generally higher than the observation. (3) When the air quality belongs to the level of excellent, the TS was the highest, however, the model lacked the ability to predict levels above the second class. When there was no primary pollutant, the TS of the primary pollutant forecast was the highest, while the TS became lower when the primary pollutant is O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> or PM<sub>10</sub>.**

## Keywords

GRACEs, Error Analysis, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国城市环境具有明显的复合型大气污染特征, 各种污染物在大气中同时存在和产生, 通过相互作用、彼此耦合构成复杂的大气污染体系[1]。大气化学模式是用于空气质量研究的数学工具, 使用数值技术模拟污染物在大气中经历的迁移、扩散和化学生成等各种物理和化学过程是城市大气环境研究的主要手段[2] [3]。空气质量模式经历了以局地烟流扩散模式、箱模式以及拉格朗日轨迹模式为主的第一代空气质量模式、以欧拉网格模型为主的第二代空气质量模式和系统模拟整个大气环境中各个空间尺度上所有物理化学过程的第三代空气质量模式[4]。目前应用较为广泛的区域环境质量模型包括简单的扩散模式(如工业多源模式 ISC3 等)、建立在质量平衡理论上的箱式模式(如多维多箱模型等)、针对特定污染问题研究的欧拉数值模型(如空气流域模型 UAM 等)、以及综合的多污染物、多尺度空气质量模式(如 CAMx、Models-3 等)以及一些大气环流与化学完全在线耦合大气-化学模式(如 RAMS-Chem、MM5-Chem、WRF-Chem 等) [5] [6] [7]。在中国大气化学模式预报效果检验方面, 杨亚丽等[8]和符传博等[9]分别检验了中国气象科学研究院自主研发的区域天气-大气化学-大气气溶胶双向耦合模式预报系统(CUACE)对银川和海口 AQI (空气质量指数)、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、O<sub>3</sub> 的预报性能, 芦华[10]等检验了 CUACE 对重庆主城区 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>、和能见度预报水平, 并使用多元线性回归方法进行了订正。

广东省气象局以 CMAQ 化学模式为基础, 气象模式依托 GRAPES 模式, 污染源模式依托 SMOKE 模式, 研发了华南区域大气成分业务数值预报模式系统(Guang-zhou Regional Atmospheric Composition and Environment Forecasting System)。GRACEs 可综合考虑区域和城市尺度下复杂相互作用的对流层 O<sub>3</sub>、酸沉降、能见度、细颗粒物和其它空气污染问题, 是目前华南区域气象中心业务运行的大气成分数值模式系统[11]。邓雪娇等[12]评估了 GRACEs 模式对华南地区 PM<sub>2.5</sub> 的模拟能力, 认为 GRACEs 模式预报性能比较稳定, 但预报结果与观测值的相关系数较低, 绝对误差较大。目前尚未见对 GRACEs 在海南地区模拟能力的系统性分析。本研究通过平均误差、平均偏差、均方根误差等多种误差检验方法检验模式对主要污染物浓度模拟效果; 使用 TS 评分、漏报率、空报率、预报偏差等衡量模式对空气质量等级和首要污染物的预报效果, 从而加深对该模式模拟能力的理解, 提高对该模式产品的订正能力。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 海南岛空气质量数据

海南岛 18 市县六种大气污染物(SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>)浓度观测数据来源于海南省生态环境厅。原始数据为 18 站逐小时数据,按照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012) [13] 中的相关定义,处理为日值数据,并计算各污染物的空气质量分指数及空气质量指数。

### 2.2. GRACEs 模拟数据

华南区域大气成分数值模式系统(GRACEs)采用高时空分辨率的三重嵌套模式域,分辨率分别为 27 km、9 km、3 km,第二重网格格距 9 km 覆盖了包括海南岛在内的泛华南地区。模式垂直分层为 25 层,模式系统每天自动运行两次,分别提供当天 08 时和 20 时起报的未来 96 h 逐小时空气质量预报产品[11] [12]。本研究使用第二重网格下的六种污染物浓度数据计算得到逐日污染物浓度数据、空气质量分指数及空气质量指数数据。

### 2.3. 检验方法

对污染物浓度和 AQI 使用的误差分析方法包括平均误差(Mean Bias, MB)、归一化平均误差(Normalized Mean Bias, NMB)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE) [11] [14], 具体公式如下:

$$\begin{aligned} \text{MB} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \\ \text{NMB} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) / O_i \\ \text{RSME} &= \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

其中  $M$  代表预报值,  $O$  代表观测值,  $N$  为样本总数。

对于模式预报的首要污染物和空气质量等级评估方法,本文主要采用的是 TS 评分、漏报率(Point Over, PO)、空报率(Not Hit, NH)和预报偏差(Bias, B)来进行检验[8] [15], 具体公式为:

$$\begin{aligned} \text{TS} &= \frac{\text{NA}}{\text{NA} + \text{NB} + \text{NC}} \\ \text{B} &= \frac{\text{NA} + \text{NB}}{\text{NA} + \text{NC}} \\ \text{PO} &= \frac{\text{NC}}{\text{NA} + \text{NC}} \\ \text{NH} &= \frac{\text{NB}}{\text{NA} + \text{NB}} \end{aligned}$$

式中, NA、NB 和 NC 的物理意义如表 1 所示。TS 数值越大表示首要污染物或空气质量等级的预报准确性越高。漏报率(PO)和空报率(NH)表示漏报次数和空报次数与实测次数之比,数值越小表示该模式对某首要污染物或某空气质量等级的预报准确率越高。预报偏差 B 大于 1 时,表示某首要污染物或某空气质量等级在预报中出现的次数偏多于实际出现的次数;反之,预报偏差 B 小于 1 时则表示模式对该首要污染物或该空气质量等级少报。

**Table 1.** Classification of air quality forecast verification

**表 1.** 空气质量预报检验分类

|      |    |    |
|------|----|----|
| 观测预报 | 有  | 无  |
| 有    | NA | NC |
| 无    | NB | —  |

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 海南岛空气质量状况

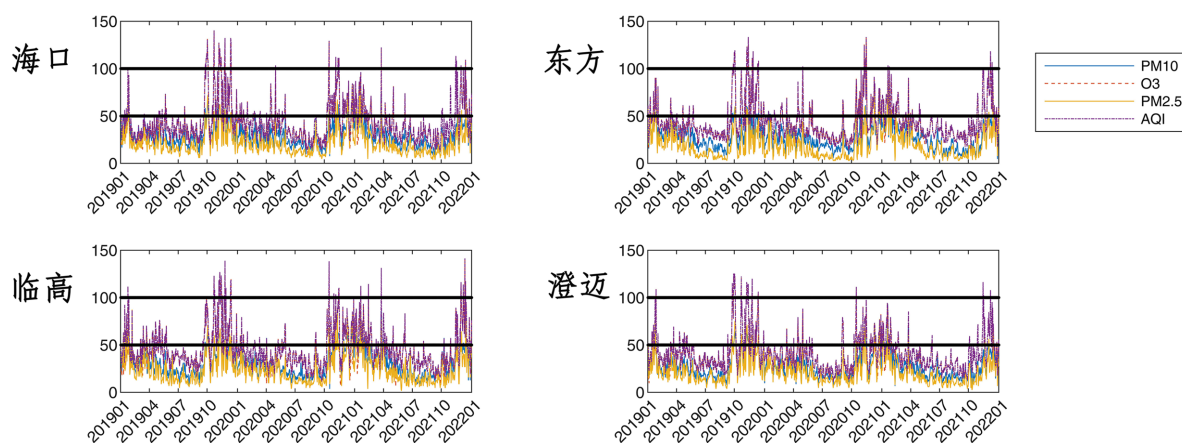
表 2 为 2019~2021 年海南岛空气质量观测数据的统计结果(研究时段未发生中度污染及以上天气, 一级天气无首要污染物), 可以看出海南岛空气质量以一级为主, 优良天气占比达到 98.74%; 二级以上天气中, 首要污染物以 O<sub>3</sub> 为主(88.72%), 其次为 PM<sub>10</sub> (5.33%)和 PM<sub>2.5</sub> (5.88%), 在三级天气中, 臭氧为首要污染物的比例达到了 99.19%。

**Table 2.** Air quality Statistics of Hainan Island (unit: %)

**表 2.** 海南岛空气质量状况统计(单位: %)

| 空气质量等级                    | 发生次数占比 | 首要污染物本等级占比     |                  |                   |
|---------------------------|--------|----------------|------------------|-------------------|
|                           |        | O <sub>3</sub> | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> |
| 一级(AQI ≤ 50, 优)           | 83.45  | -              | -                | -                 |
| 二级(50 < AQI ≤ 100, 良)     | 15.29  | 87.86          | 5.77             | 6.30              |
| 三级(100 < AQI ≤ 150, 轻度污染) | 1.26   | 99.19          | -                | 0.81              |
| 二级及以上(AQI > 50)           | 16.55  | 88.72          | 5.33             | 5.88              |

图 1 为海南岛 18 个市县的空气质量指数和三种主要污染物(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>)的空气质量分指数日值折线图, 从中可以看出, 在 18 个市县中, O<sub>3</sub> 均是贡献最大的大气污染物, O<sub>3</sub> 分指数与 AQI 基本一致, PM<sub>2.5</sub> 分指数水平整体低于 PM<sub>10</sub> 分指数。时间上, 空气质量指数呈现出明显的季节性变化, 夏半年空气质量指数数值较低, 变化相对平稳; 冬半年空气质量指数明显升高, 且波动更大。空间上, 五指山、琼中等中部地区空气质量指数最低, 几乎无轻度污染事件发生; 海口临高东方等海南岛西北部地区空气质量指数较高, 二级、三级以上天数较多。



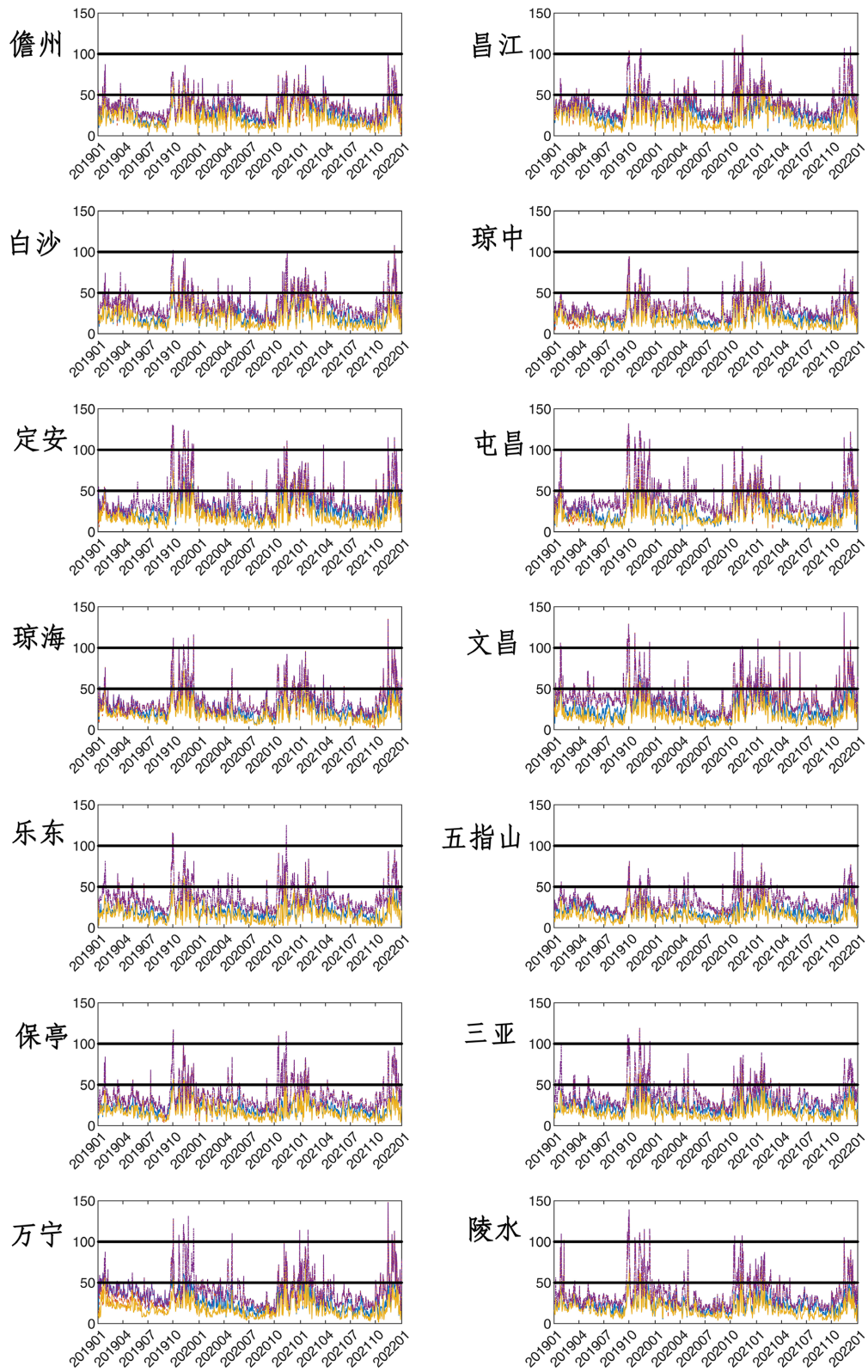
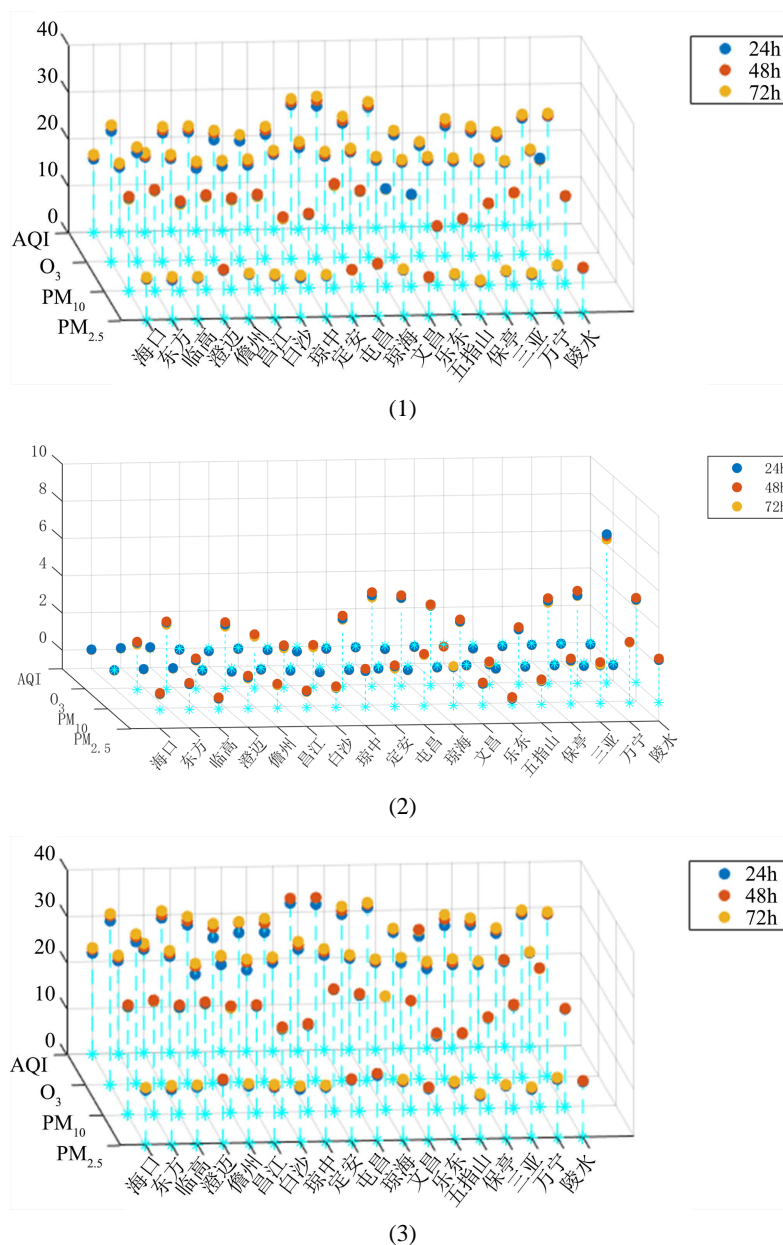


Figure 1. Daily air quality index and sub-indices of three major pollutants (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>) at 18 stations in Hainan Island  
图 1. 海南岛 18 站逐日空气质量指数和三种主要污染物(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>)分指数

### 3.2. GRACEs 模式模拟效果检验

使用平均误差(Mean Bias, MB)、归一化平均误差(Normalized Mean Bias, NMB)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)等方法对模式预报的海南岛地区  $O_3$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  三种主要污染物 24 h、48 h、72 h 的预报结果进行误差分析, 结果如下:



**Figure 2.** Forecast effect of air quality index and main pollutant concentration (1-MB; 2-NMB; 3-RMSE)

**图 2.** 空气质量指数及主要污染物浓度预报效果(1-平均误差; 2-归一化平均误差; 3-均方根误差)

如图 2 所示, GRACEs 模式 24、48、72 小时预报结果在不同误差分析方法上表现较为稳定。MB (平均误差)和 RMSE (均方根误差)显示,  $PM_{2.5}$  误差最小, AQI 和  $PM_{10}$  次之,  $O_3$  最大, 表明  $PM_{2.5}$  预报值与

实测值最为接近, O<sub>3</sub> 偏差最大; 这主要是由于 O<sub>3</sub> 数值上较 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 明显偏大, 因此数值的误差也相应较大。

NMB (归一化平均误差) PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 均为正值, 表明模式对上述两种污染物的预报值低于实测值; O<sub>3</sub> 和 AQI 数值上均接近 0, 除东方和临高外 NMB 均 < 0, 表明模式对 O<sub>3</sub> 和 AQI 有较好的预报效果, 预报值整体稍高于实测值, 东方和临高稍低与实测值。

使用 TS、漏报率、空报率、预报偏差评估 GRACEs 模式对 24、48、72 小时空气质量等级(Level)的预报效果, 结果如下:

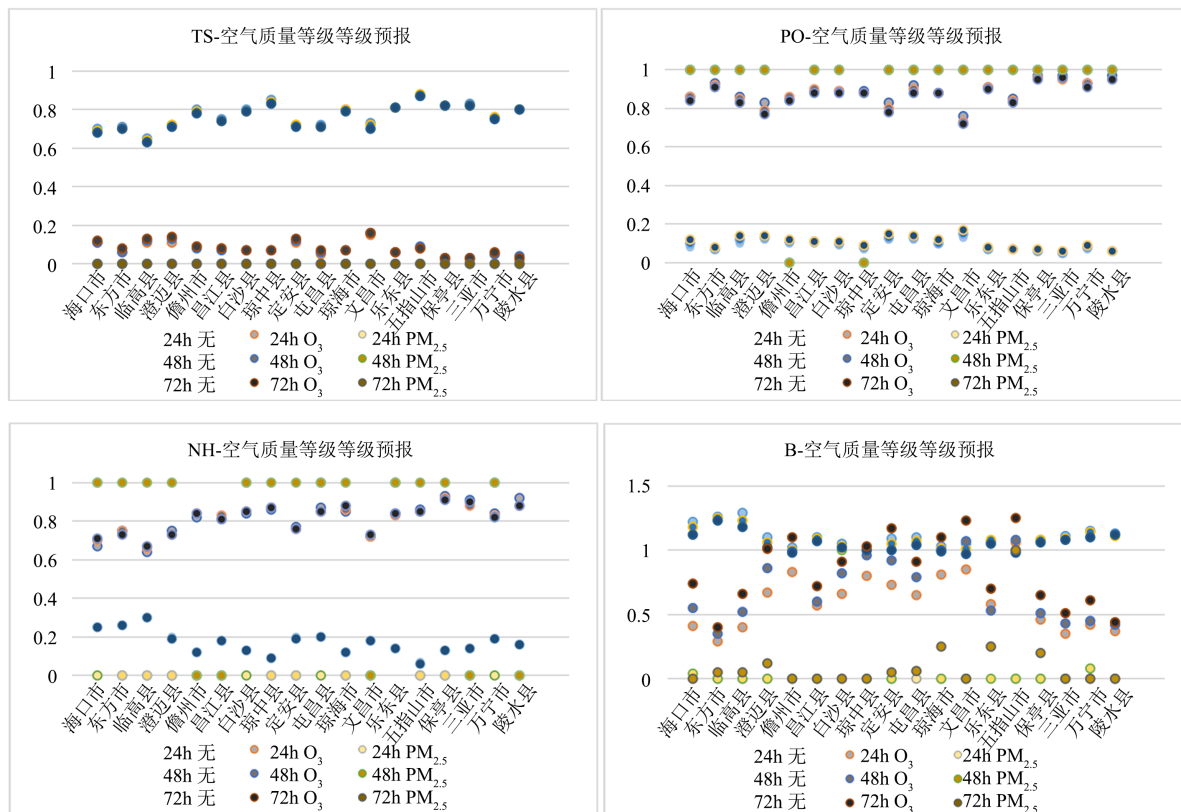


Figure 3. Effect of air quality level forecasting in GRACEs model (1-TS, 2-PO, 3-NH, 4-B)

图 3. GRACEs 模式空气质量等级的预报效果(1-TS、2-漏报率、3-空报率、4-预报偏差)

从图 3 可以看出, 模式预报在不同时效下四个检验指标效果没有明显差别, 不同等级间差异表现为: TS 评分方面, 一级最高, 二级次之, 三级最低一致为 0; 二级天气的漏报率(PO)和空报率(NH)均较一级天气高; 一级预报偏差(B)以偏高为主; 二级预报偏差以偏低为主。模式欠缺对三级天气的预报能力。

图 4 为模式对首要污染物的预报效果检验(模式对首要污染物为 PM<sub>10</sub> 的情况均未正确预报, 故不在图中体现)。

从图 4 可以看出 GRACEs 仅在无首要污染物、即空气质量一级时效果较好, 24、48、72 小时预报结果的 TS 评分均在 0.6 以上, 漏报率在 0.2 以下, 空报率均小于 0.4, 预报偏差接近于 0。首要污染物为 PM<sub>10</sub> 和 O<sub>3</sub> (二级以上天气)时, TS 评分普遍在 0.2 以下, 漏报率空报率多在 0.7 以上, 预报偏差值较大; 相较而言, O<sub>3</sub> 的预报效果优于 PM<sub>2.5</sub> 的预报效果。模式对海口、琼海、文昌等市县 PM<sub>2.5</sub> 的预报偏差较其他测站明显偏大。

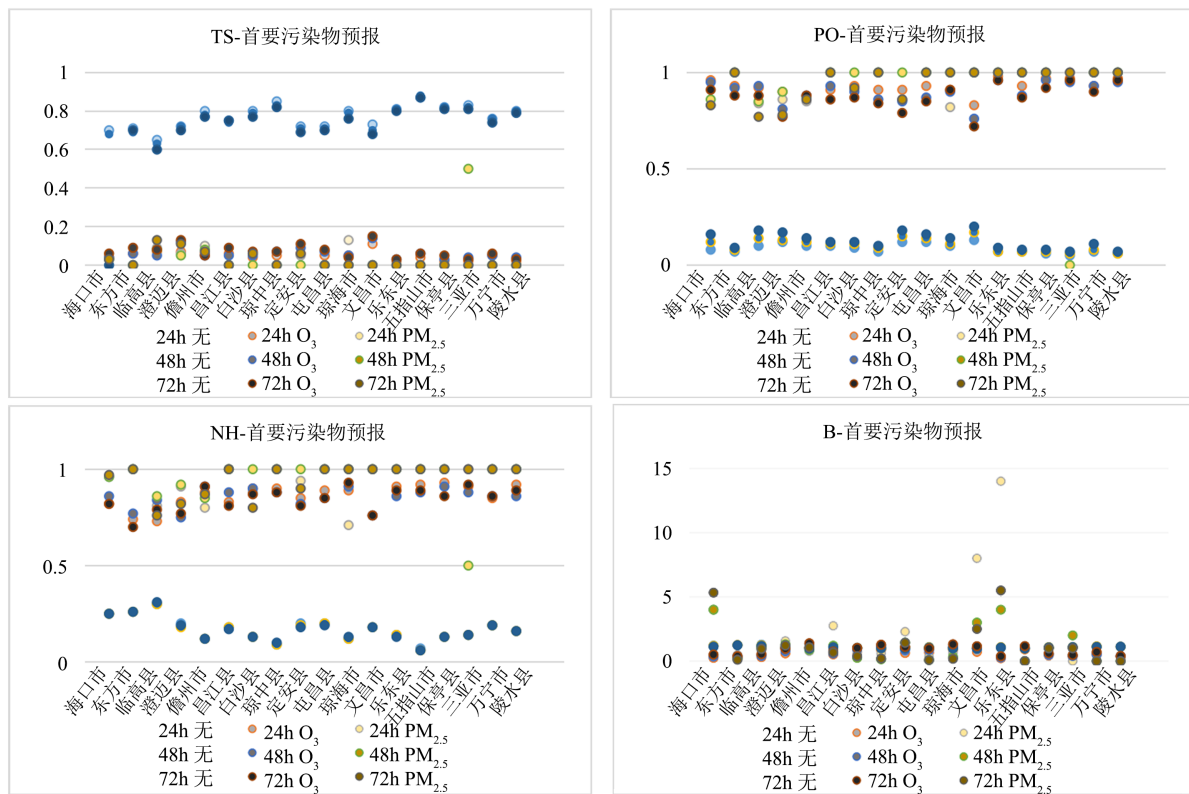


Figure 4. Effect of primary pollutants forecasting in GRACEs model (1-TS, 2-PO, 3-NH, 4-B)

图 4. GRACEs 模式首要污染物的预报效果(1-TS、2-漏报率、3-空报率、4-预报偏差)

## 4. 结论

(1) 海南岛空气质量以优良为主,  $O_3$  是海南岛最主要大气污染物, 其次为  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$ 。时间上, 冬半年海南岛的空气质量指数偏高、波动较大, 夏半年空气质量指数较低, 数值变化较小。空间上, 海南岛中部地区如五指山琼中空气质量二级及以上天数占比最少、几乎无轻度污染事件发生, 海口临高东方等海南岛西北部地区二级及以上天数最多。

(2) GRACEs 模式在 24、48、72 小时预报时效上预报效果没有明显差异, 对  $O_3$  浓度和 AQI 预报值稍高于实测值, 对  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度的预报结果低于实测值;

(3) 模式对一级天气预报效果最好, 二级天气次之, 未能准确预报出三级天气; 模式对无首要污染物即一级天气的效果较好, 对二级及以上天气的首要污染物预报效果较差。对首要污染物为  $O_3$  的预报效果优于  $PM_{2.5}$  的预报效果。

## 基金项目

海南省自然科学基金青年基金项目“基于 CUACE 模式和 GRACEs 模式的海南岛空气质量集成预报(421QN0967)”；海南省气象局科研项目“基于 GRACEs 模式的海南岛空气质量预报效果检验(hnqxZC202109)”；国家自然科学基金地区基金项目“海南省城市臭氧污染的形成机理研究(42065010)”。

## 参考文献

- [1] 岳旭, 蒋璐君, 吴琼. 南昌市空气质量预报产品检验分析及统计订正试验[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(3): 212-218.



- 
- [2] 许建明. 城市大气环境数值技术的集成、改进和应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [3] 康志明, 桂海林, 花丛, 等. 国家级环境气象业务现状及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 64-69.
- [4] 谭成好, 陈昕, 赵天良, 等. 空气质量数值模型的构建及应用研究进展[J]. 环境监控与预警, 2014, 32(6): 1-7.
- [5] 陈朝晖. 区域大气环境质量问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [6] 丁国安, 郑向东, 马建中, 等. 近30年大气化学和大气环境研究回顾——纪念中国气象科学研究院成立50周年[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 796-814.
- [7] 王自发, 庞成明, 朱江, 安俊岭, 韩志伟, 廖宏. 大气环境数值模拟研究新进展[J]. 大气科学, 2008(4): 987-995.
- [8] 杨亚丽, 王建英, 赵蔚. CUACE模式对银川市市区重污染天气预报效果检验[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 215-219, 224.
- [9] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 2014-2016年海口市空气质量概况及预报效果检验[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 270-278.
- [10] 芦华, 吴钰, 刘伯骏, 等. 空气质量模式在重庆主城区预报效果检验订正[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(7): 176-184.
- [11] 李婷苑, 吴乃庚, 邓雪娇, 邓涛, 陈靖扬, 沈劲, 邓思欣, 梁华玲. 华南区域大气成分数值模式 GRACEs 预报性能评估[J]. 热带气象学报, 2021, 37(2): 207-217.
- [12] 邓雪娇, 邓涛, 麦博儒, 等. 华南区域大气成分业务数值预报 GRACEs 模式系统[J]. 热带气象学报, 2016, 32(6): 900-907.
- [13] 环境保护部. HJ 663-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [14] 杨关盈, 邓学良, 王磊, 等. 基于 CUACE 模式产品的订正方法比较研究[J]. 气象科学, 2017, 37(6): 839-844.
- [15] 李曼, 张载勇, 李淑娟, 等. CUACE 系统在乌鲁木齐空气质量预报中的效果检验[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(5): 63-68.