

电波科学学报
Chinese Journal of Radio Science
ISSN 1005-0388, CN 41-1185/TN

《电波科学学报》网络首发论文

题目：两种数据在海洋大气折射环境中的应用评估
作者：成印河，彭上博，赵彬彬，张玉生，郭相明，高超
收稿日期：2022-08-04
网络首发日期：2022-12-07
引用格式：成印河，彭上博，赵彬彬，张玉生，郭相明，高超. 两种数据在海洋大气折射环境中的应用评估[J/OL]. 电波科学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//41.1185.tn.20221206.1411.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

成印河, 彭上博, 赵彬彬, 等. 两种数据在海洋大气折射环境中的应用评估[J]. 电波科学学报. DOI: 10.12265/j.cjors.2022169
CHENG Y H, PENG S B, ZHAO B B, et al. Estimation of two reanalysis datasets on the application to atmospheric refractive environment over the global Sea [J]. Chinese journal of radio science. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2022169

两种数据在海洋大气折射环境中的应用评估

成印河^{1*} 彭上博¹ 赵彬彬¹ 张玉生² 郭相明² 高超¹

(1. 江苏海洋大学海洋技术与测绘学院, 连云港 222005; 2. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模块化技术重点实验室, 青岛 266107)

摘要 海上大气折射率是影响电波传播的重要因子, 是构建电波环境数据库的重要元素. 再分析数据是重要的数据源, 因此本文利用典型海域的 GPS 探空数据从两个方面开展了欧洲中期天气预报中心的 ERA-I (ERA-interim) 和美国国家环境预报中心 FNL (FiNaI) 再分析数据大气折射环境的应用评估, 包括直接应用和作为初始场开展数值模拟. 结果表明: 在靠近大洋的“开阔”海域, FNL 再分析数据对大气折射率环境的适应性更好, 其中在北极、南极海域, FNL 数据计算的修正大气折射率的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 4.7 和 2.8 M 单位; 而在相对封闭的海域, ERA-I 再分析数据刻画的大气折射更准确. 大气波导识别方面, ERA-I 数据能识别大部分波导, 而 FNL 数据只能识别小部分波导尤其是海上波导, 在波导高发的中东地区, 正确率为 58.1% 和 45.4%. 在数值模拟中, 两种不同数据初始场对模拟大气折射率的影响不大, 各站点计算修正大气折射率的 RMSE 均小于 1 M 单位. 研究结果可对不同海域大气折射环境研究提供参考.

关键词 ERA-I; FNL; 大气折射率; WRF 模式; 大气波导

中图分类号 TN011; P732 **文献标志码** A

DOI 10.12265/j.cjors.2022169

Estimation of two reanalysis datasets on the application to atmospheric refractive environment over the global sea

CHENG Yinhe^{1*} PENG Shangbo¹ ZHAO Binbin¹ ZHANG Yusheng² GUO Xiangming² GAO Chao¹

(1. College of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract Atmospheric refractivity over the sea is one of important factors which affects the electromagnetic wave propagation, and is also a basic element which comprises dataset of electromagnetic environment. Since reanalysis data is an indispensable data source to study the atmospheric refractivity, comparative analysis of two kinds of reanalysis datasets, including ERA-I data and FNL provided by ECMWF and NCEP respectively, were performed to analyze the atmospheric refractive environment based on the GPS sounding data in the direct application and numerical simulation as the initial field. The results show that the FNL dataset is better in the open sea facing the ocean, and the root mean square errors of the modified atmospheric refractivity from the FNL data are 4.7 and 2.8 M units in the Arctic and Antarctic respectively. However, in continental or marginal sea, ERA-I reanalysis data depict atmospheric refractive index more accurate and ERA-I data can identify most ducting cases against FNL data especially in the sea. For instance in the Middle East where ducting events are highly prevalent, the correct rates of ducting identified by ERA-I and FNL reanalysis data are 58.1% and 45.4%. On the numerical simulations, the results produced by WRF model with two datasets as initial fields have almost the same errors, and the overall root mean square errors of the modified atmospheric refractivity at each station are less than 1M units. This results provided a reference for the study of atmospheric refractive environment in different sea areas.

收稿日期: 2022-08-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41776029); 中国电波传播研究所稳定支持项目(A132001W13); 江苏省六大人才高峰高层次项目(RJFW-036); 全国大学生创新创业训练计划项目(55090052022080); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(TAPP); 江苏海洋大学人才引进基金项目

通信作者: 成印河 Email: yinhe_9951@163.com

引言

电波环境是指影响电波传播的地面、海面、对流层、电离层等全空间环境和全频段全要素传播效应^[1],是武器装备和系统信息化的重要组成部分,与气象水文、地理信息密切相关.在电波环境中,大气折射环境是非常重要的组成部分,主要包括负折射、正常折射、超折射、大气波导等,其中大气波导环境可使电磁波实现超视距探测、通信等^[2].因此开展电波环境研究具有重要的科学意义和应用价值.

在开展电波环境研究和应用中,全球海洋大气折射环境非常复杂,如何有效获取数据是关键.利用探空气球、探空火箭等平台获得大气温度、露点温度、相对湿度和高度等气象要素^[3-4],根据经验公式计算大气折射率,分析海上大气折射环境是非常有效的手段.尽管该数据垂直分辨率较高,能够较准确地分析海洋大气折射率环境^[5-6],但局限性较大,如海上探空站数量较少,分布不均匀,并且大部分观测站在近岸;而科考船的探测时间序列短,且空间分布有限.另外利用大气数值模式计算生成的再分析数据产品获得大气折射环境也是近年来应用的主要手段.该数据通常会同化地面、高空、遥感等多种观测数据,利用全球大气数值模式产生时间序列长,覆盖范围广、数量丰富、空间分辨率高数据产品,为全球大气折射环境应用提供了数据支撑,因此在国内外大气折射环境应用中大多考虑使用再分析数据产品.目前主要使用的再分析数据有欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)、美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)以及国内的国家气象科学数据中心提供的全球再分析数据;其中ECMWF和NCEP应用较多.Engeln等对利用ECMWF提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据针对全球波导气候开展了统计分析^[7].成印河等^[8-9]和王华等^[10]利用ECMWF提供的再分析数据,分别统计了中国南海和中国近海的波导发生概率和分布特征.陈莉等利用NCEP提供的FNL再分析数据统计分析了中国近海大气波导的时空分布^[11],利用再分析数据开展了大气折射环境尤其是波导环境的研究,但没有给出全球海域大气折射误差情况.成印河等^[12]利用GPS探空数据评估了ERA-I再分析数据在南海大气折射率的适用性,指出低层大气折射率误差较大.针对其他参数如温度、湿度等气象要素部分学者开展了区域研究,指出不同的再分析数据存在不同的适用区域^[13-19],如南半球恶劣天气条件下FNL数据在波浪预报方面比ERA-I数据更具优势^[17];南极区域ERA-I在气温方面明显优于FNL,近海面气压方面误差较大^[18].虽然两种主流全球数据用途较广,但在分析大气折射环境方面还不清楚.

除了直接利用两种再分析数据外,也可以作为

中尺度天气预报模式的初始场,利用数值模拟技术开展大气折射环境分析研究. Thompson等^[20]利用COAMPS模式做控制试验,研究海风和离岸风对大气波导的影响;Wang等^[21]英国气象局的MetUM模式,分析了海表面温度空间分辨率对大气波导的影响.国内的陈莉等^[22]利用MM5模式输出结果给出了我国近海大气波导天气学特征;成印河等^[23]利用WRF模式模拟了南海的大气波导过程.但是这些研究者以不同的再分析数据作为初始场开展模拟研究,并没有整体评价两种再分析数据适用性.在气象要素方面,张懿等^[24]将FNL和ERA5数据作为初始场,利用WRF模式模拟了四川盆地的气象要素并做了对比分析,指出该初始场对模拟结果的影响.因此,本文选择典型区域的探空数据,针对FNL和ERA-I再分析数据在全球大气折射环境直接和间接应用进行了评估分析.

1 再分析数据与WRF

1.1 再分析数据及探空数据

ERA-I再分析数据是采用四维变分系统融合无线电探空、卫星遥感数据生成的一种全球再分析数据,具有多种空间分辨率,在垂向上分为60层,低层分辨率较高,高层分辨率越低,在1000 m以下分辨率在200 m之内.FNL数据是由NCEP提供的采用全球资料同化系统,融合了各种地面、船舶、探空、卫星等观测资料.该数据主要包括温度、比湿等,在垂向上有27个标准等压层,低层较密,高层稀疏.

本文主要利用探空站GPS观测数据,对比分析同时期的ERA-I和FNL两种再分析数据描述大气折射环境的准确性.全球海域低空异常的大气折射环境如大气波导时空分布规律,选择中国南海、阿拉伯海、地中海、太平洋东海岸和极地地区作为典型区域,开展大气折射环境对比分析,具体探空站点分布见图1.

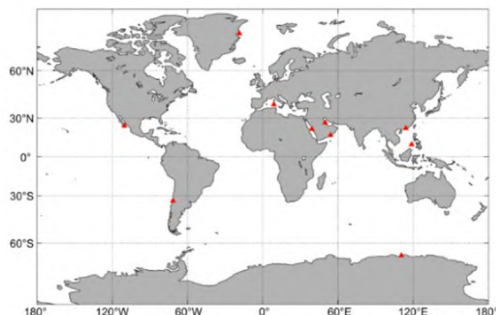


图1 典型探空站点分布

Fig.1 Distribution of the typical radiosonde stations

该探空数据来自美国怀俄明州大学的网站,本文采用2015年7月8日至2019年7月31日的1、4、7、10月份的全球ERA-I和FNL数据,空间分辨率均为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间间隔均为6 h.本文主要提取00:00和12:00UT两个时次数据,主要参数包括气温、比湿、气压、位势高度等数据.其中ERA-I

数据使用距离海面较低的 18 层在 3 000 m 以下的模式数据^[7]. FNL 数据选择距离 3 000 m 以下较低的 10 层数据, 高度采用位势高度. 通过质量控制进行野点剔除, 如气温必须在 -80~45 °C, 相对湿度在 0~100% 等, 得到了 7 508 个探空廓线, 探空站数据情况详见表 1.

表 1 各探空站数据情况
Tab.1 Radiosonde profiles of each station

| 探空站 | 区域 | 经纬度 | 廓线数 |
|-------|--------------|----------------------|-------|
| 85586 | 太平洋东海 岸南部 | 71.31°W, 33.65°S | 252 |
| 76405 | 太平洋东海 岸北部 | 110.30°W, 24.17°N | 407 |
| 89611 | 南极海岸 | 110.52°E, 66.28°S | 945 |
| 04320 | 北极海岸 | 18.66°W, 76.76°N | 966 |
| 16546 | 地中海 | 8.85°E, 39.35°N | 1 011 |
| 41316 | 阿拉伯海 | 54.08°E, 17.03°N | 391 |
| 40417 | 波斯湾 | 49.81° 26.45°N | 770 |
| 41024 | 红海 | 39.18°E, 21.70°N | 910 |
| 45004 | 南海北部 | 114.17°E, 22.31°N | 978 |
| 98618 | 南海南部 | 118.73°E, 9.75°N | 878 |

1.2 修正大气折射率

在大气折射环境研究中, 一般采用修正大气折射率指数描述大气折射环境随高度的变化. 修正大气折射率指数 M , 是气温、大气压和水汽压等物理量表示的经验函数^[8],

$$M = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) + 0.157z \quad (1)$$

式中: T 是大气温度(K); P 是大气压强(hPa); e 是水汽压(hPa); z 为海拔高度(m).

探空数据中水汽压由相对湿度计算得出^[6],

$$e_s = 6.112 \times \exp \left(17.502 \times \frac{T}{T+240.79} \right) \quad (2)$$

$$e = e_s \times rh \quad (3)$$

式中: e_s 为饱和水汽压 (hPa); T 为大气温度 (°C); rh 为相对湿度 (%). 在两种再分析数据中, 水汽压由比湿计算给出,

$$e = \frac{Pq}{0.622 + 0.378q} \quad (4)$$

式中, q 为比湿(%).

为了评估两种再分析数据及其应用的数值模式中的结果, 以探空数据为标准, 我们利用相关系数、平均误差、绝对误差和均方根误差(root mean square error, RMSE)四个参数开展统计分析.

相对系数 (R) 是反映两个变量之间密切程度的统计物理量, 表达式为

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (5)$$

式中: x_i 是离散的再分析数据或模式输出数据; y_i 是相应的观测数据; \bar{x} , \bar{y} 为其数组的平均值; n 代表每层的样本数量.

平均误差 (mean error, ME) 是等精度测量中所有测量值随机误差的算术平均值. 本文是指再分析数据或其数值模拟结果与观测值之间的 ME,

$$ME = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \right] / n \quad (6)$$

绝对误差 (absolute error, MAE) 是测量值和真值之间的绝对值平均值, 避免了相互抵消问题. 该参数可准确反映评估数据的误差大小, 表示为

$$MAE = \left[\sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \right] / n \quad (7)$$

RMSE 用来衡量再分析数据或数值模拟结果同探空数据之间的偏差, 对一些极值点非常敏感, 表示为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

以图 1 中典型探空观测为真值, 统计分析以上四种参数随高度的分布, 来评估两种再分析数据大气折射应用情况.

1.3 中尺度天气预报模式 WRF

采用同样的参数化方案, 将两种再分析数据输入到中尺度天气预报模式 WRF, 围绕图 1 中典型区域开展大气折射环境数值模拟工作, 评价其作为初始场预报大气折射环境的能力. 模拟区域采用三重嵌套, 积分步长为 60 s, 垂向采用不等间距底层加密分层, 共 42 层, 3 000 m 以下为 28 层, 子母网格距分别为 45 km、15 km、5 km, 采用参考文献[23]中的方案, 见表 2. 模拟时间与探空观测时间一致, 从 2015 年 7 月 8 日至 2019 年 7 月 31 日期间的 1、4、7、10 四个月份; 利用第三重嵌套区域输出结果开展对比分析. 图 2 为地中海、红海、波斯湾和部分阿拉伯海区域的数值模拟. 其他典型区域不再详细列出.

表 2 WRF 模式通用的参数化方案

Tab.2 Universal parameterization schemes applied in the WRF model

| 参数化方案 | 参数设置 |
|----------|-------------------------|
| 微物理方案 | Lin 方案 |
| 长波辐射方案 | RRTM 长波辐射方案 |
| 短波辐射方案 | Dudhia 短波辐射方案 |
| 路面过程方案 | Noah 路面方案 |
| 积云参数化方案 | Kain-Fritsch(new Eta)方案 |
| 边界层参数化方案 | YSU 方案 |
| 近地面参数化方案 | Monin-Obukhov 方案 |

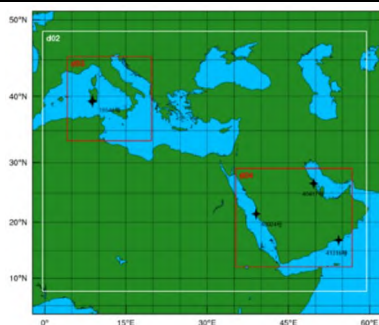


图2 WRF 模式模拟区域实例
Fig.2 A case of simulation area of WRF model

1.4 数据匹配方法

以探空站为中心位置, 分别与两种再分析数据和 WRF 模式模拟结果做匹配. 时间上以 GPS 探空开始记录时间的前后 30 min 以内, 空间上采用双线性插值法^[18] 利用距离探空站最近的再分析数据和模式模拟结果四个点内插到观测点上作为匹配数据. 图 3 为基于香港站匹配好的 GPS 探空数据、ERA-I 和 FNL 再分析数据计算的修正大气折射率廓线.

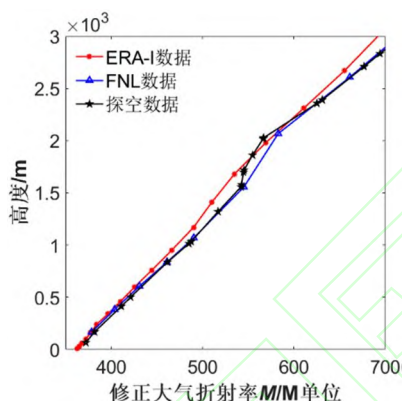


图3 2016年1月3日12时香港站三种匹配典型数据修正大气折射率指数廓线

Fig. 3 Three matched typical profiles of modified atmospheric refractivity index at 12 UTC, Jan 3, 2016, at Hongkong Station

两种再分析数据采用线性插值法, 统一插值到 50 m 空间间隔上进行各气象参数比较. 由于 WRF 计算的垂直分辨率较高, 采用最邻近插值方法插值到同一高度上.

2 结果分析

2.1 直接应用结果分析

2.1.1 基于整体 RMSE 比较情况

基于全球典型探空站数据, 表 3 给出了各站点两种再分析数据的修正大气折射率指数 RMSE 的统计情况.

表3 修正大气折射率指数 RMSE
Tab.3 RMSE of the modified atmospheric refractivity

| 探空站 | RMSE/M 单位 | |
|------------|-----------|------|
| | ERA-I | FNL |
| 南海北部站点 | 7.3 | 7.3 |
| 南海南部站点 | 6.9 | 11.3 |
| 太平洋东海岸北部站点 | 11.8 | 15.7 |
| 太平洋东海岸南部站点 | 14.6 | 10.0 |
| 北极站点 | 7.6 | 4.7 |
| 南极站点 | 4.2 | 2.8 |
| 地中海站点 | 10.9 | 18.5 |
| 阿拉伯海站点 | 22.1 | 12.8 |
| 波斯湾站点 | 12.2 | 25.3 |
| 红海站点 | 13.7 | 14.5 |

由表 3 可知, 在南海地区, ERA-I 再分析数据的修正大气折射率指数的 RMSE 在北部地区与 FNL 再分析数据相当; 在南部优于 FNL 再分析数据, 误差小 4.4 M 单位. 在太平洋东海岸则呈现相反的趋势, ERA-I 再分析数据对于大气折射的描述在北部地区误差较小, 为 11.8 M 单位, 优于 FNL 再分析数据的 15.7 M 单位; 南部地区与之相反. 在南、北两极地区, 两种再分析数据描述大气折射环境误差是最小的, RMSE 均小于 10 M 单位, 但 FNL 数据描述误差更为精确. 在中东地区除阿拉伯海外, ERA-I 再分析数据得到的误差 FNL 数据最小.

从 RMSE 全球分布来看, 极地地区、太平洋沿岸、阿拉伯海等较为靠近大洋地区的“开阔”海域, FNL 再分析数据分析大气折环境更准确; 南海、红海、地中海等靠近大陆的海域, ERA-I 再分析数据较准确.

2.1.2 绝对和平均误差比较情况

由于大气折射环境是一个三维立体空间, 在垂向上误差随高度变化^[12], 图 4 给出了各站点修正大气折射率指数的绝对误差分布情况. 在南海地区, 两种再分析数据在北部地区的绝对误差大体相同, 在 5.5 M 单位附近; 但在南部地区 ERA-I 再分析数据计算的修正大气折射率误差明显更小. 在太平洋北部地区, ERA-I 再分析数据在 1 800 m 以下明显较小, 超过该高度后两种再分析数据基本相似; 在南部地区相反, ERA-I 再分析数据在 500~2 200 m 误差较小, 其他高度误差较大, 最大值约 40 M 单位; 而 FNL 数据的误差分布比较均匀, 在 10 M 单位以内. 极地地区, FNL 数据的绝对误差廓线明显更接近 0, 尤其是北极地区; 在地中海、波斯湾和红海中东内陆地区, ERA-I 再分析数据比 FNL 数据误差相对较小, 更接近于 0; 但在阿拉伯海 ERA-I 数据的绝对误差呈“S”型曲线分布, 且在 1 000 m 左右存在极值, 明显大于 FNL 数据.

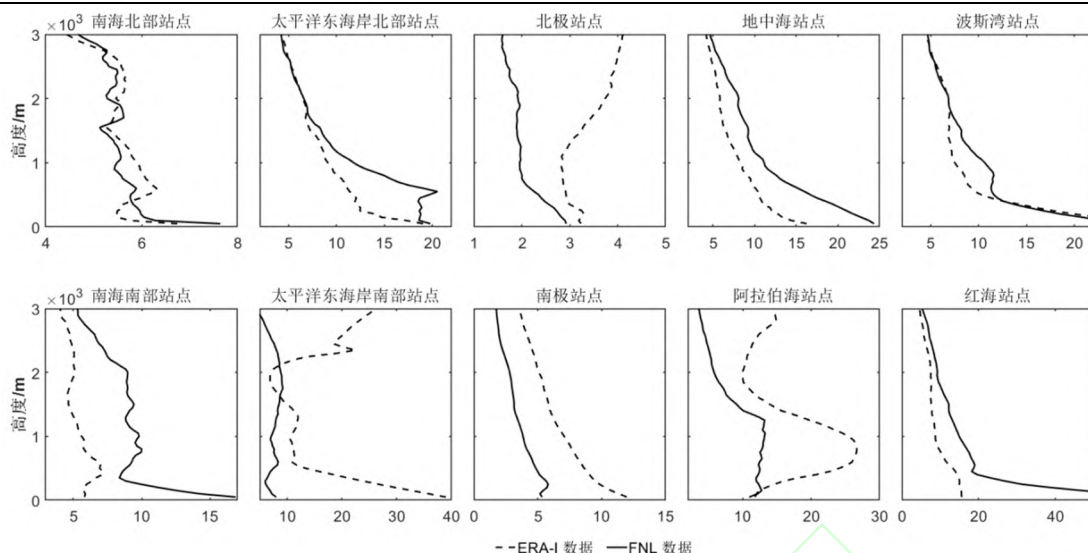


图 4 各站点修正大气折射率指数的绝对误差分布

Fig.4 Distribution of overall absolute errors of modified atmospheric refractivity index at each station

同时利用平均误差对大气折射率廓线分布进行统计, 结果如图 5 所示. ME 表征的两种数据误差全球分布与误差绝对值表征情况一致. 在南海南部、太平洋东海岸北部、地中海和红海地区, ERA-I 再分析数据描述大气折射环境误差相对较小, 描述较为准确; 在南、北两极, 阿拉伯海域和太平洋东海岸南部等海域, FNL 数据在描述大气折射环境方面优势明显, 误差较小; 在波斯湾和南海北部两种数

据误差区别不明显. 但在平均误差垂直分布上, 两者误差尤其是 FNL 数据误差, 在多数站点分布趋势一致, 误差随高度增加而减小, 越低差别较大, 如在低层 1 000 m 以下误差差别较大, 有时甚至符号相反. 例如太平洋东海岸北部沿海, ERA-I 再分析数据描述大气折射率偏大, 是正的误差; 而 FNL 数据是负值, 给出大气折射率偏小.

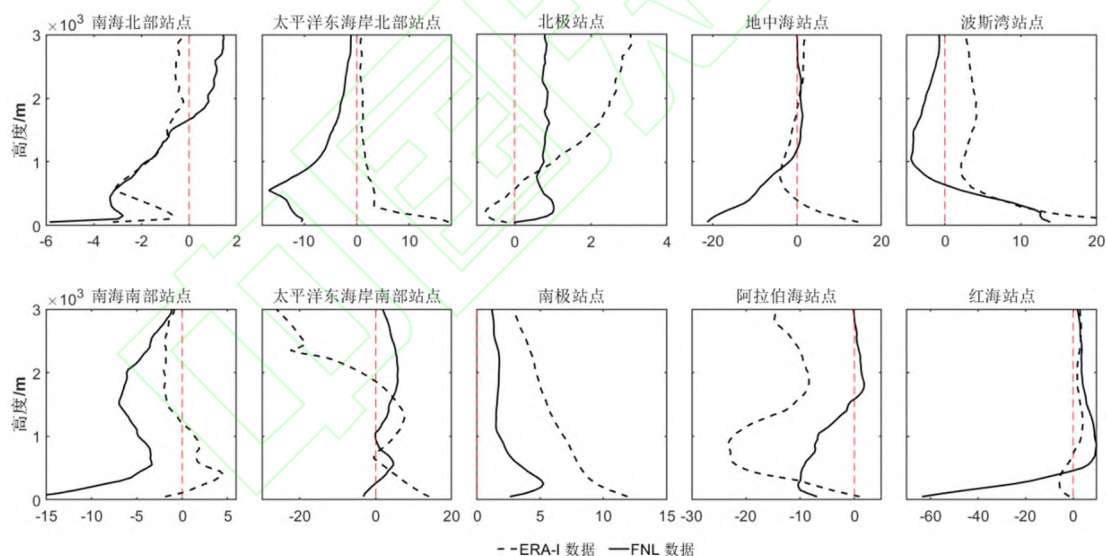


图 5 各站点修正大气折射率指数的平均误差分布

Fig.5 Distribution of overall errors of the modified atmospheric refractivity at each stations

各站点的绝对误差和平均误差分布进一步表明, 在相对“开阔”的海域, FNL 再分析数据刻画大气折射环境较为准确; 在相对封闭的内陆海域, ERA-I 再分析数据描述大气折射环境较为准确.

2.1.3 相关系数比较结果

两种数据描述大气折射率的误差是随高度不均匀分布的, 因此给出了两种数据在给定高度上与探空数据计算大气折射率的相关性, 如图 6 所示. 相关系数越大, 说明该数据刻画大气折射环境更为合适.

从图 6 相关系数的分布可知, 在南海北部海域

两种数据基本一致, 分布在 0.9 左右; 在南部低层两种数据随高度与探空数据的相关性较差, 不足 0.5, 越高相关性变高, 但 ERA-I 再分析数据的相关系数始终大于 FNL 数据 0.1 左右. 除了南北两极站点外, 在其他站点也具有相似的特点, 两种数据与探空数据相关系数随高度增加而变大, 但在低空差距明显. 如在太平洋东海岸北部海域, ERA-I 数据的相关系数从 0.8 左右随高度变大, 而 FNL 数据从 0.6 左右, 而南部海域 FNL 数据的相关性变化稳定, 而 ERA-I 数据在低空出现了负相关情况. 相关系数分布同样表明, 在南海南部、太平洋东海岸北部、地中海、波斯湾和红海相对内陆海域, ERA-I 再分析数据分

析大气折射环境较为合适；在南、北两极，阿拉伯 数据刻画大气折射率较为合适，这与上文的分析结
 海域和太平洋东海岸南部相对开阔海域海域，FNL 论是一致的。

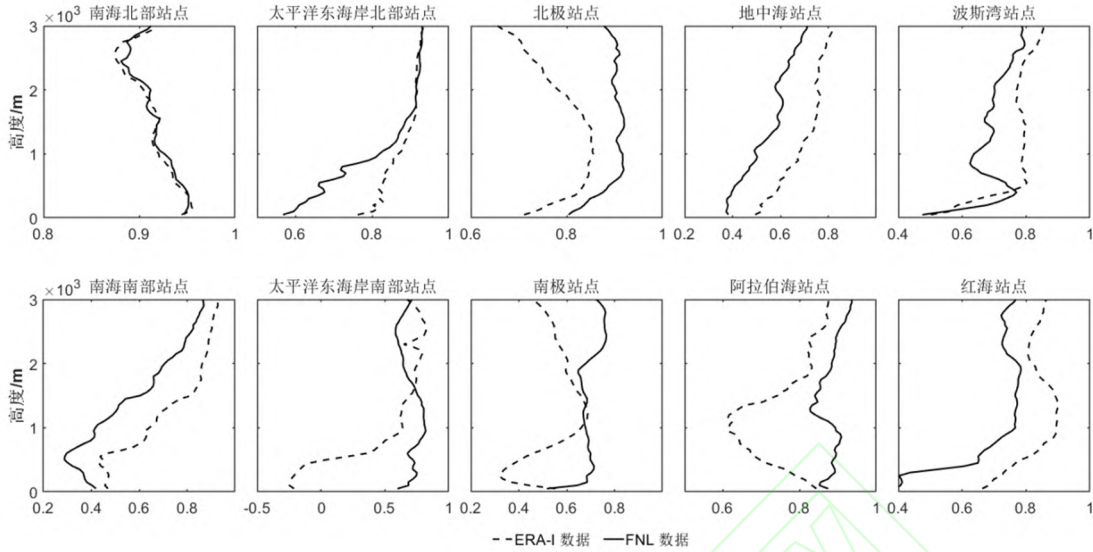


图6 各站点修正大气折射率相关系数随高度的分布

Fig.6 Distribution of correlation coefficient of the modified atmospheric refractivity at each station

2.2 大气波导事件统计

大气波导是大气折射环境极其重要的组成部分，因此两种再分析数据能否正确识别大气波导也

是电磁环境重点研究对象. 表4给出了两种再分析数据识别大气波导的情况.

表4 各站点波导事件统计

Tab.4 Ducting events statistics at each station

| | | | 探空数据 | | 合计 |
|-------|-------|-----|-------------|-------------|--------------|
| | | | 有波导 | 无波导 | |
| 南海 | ERA-I | 有波导 | 870(46.9%) | 866(46.7%) | 1736(93.5%) |
| | | 无波导 | 77(4.1%) | 43(2.3%) | 120(6.5%) |
| | | 合计 | 947(51.0%) | 909(49.0%) | 1856(100.0%) |
| | FNL | 有波导 | 42(2.3%) | 3(0.2%) | 45(2.4%) |
| | | 无波导 | 905(48.8%) | 906(48.8%) | 1811(97.6%) |
| | | 合计 | 947(51.0%) | 909(49.0%) | 1856(100.0%) |
| 中东海域 | ERA-I | 有波导 | 1583(51.3%) | 856(27.8%) | 2439(79.1%) |
| | | 无波导 | 434(14.1%) | 209(6.8%) | 643(20.9%) |
| | | 合计 | 2017(65.4%) | 1065(34.6%) | 3082(100.0%) |
| | FNL | 有波导 | 415(13.5%) | 82(2.7%) | 497(16.1%) |
| | | 无波导 | 1602(52.0%) | 983(31.9%) | 2585(83.9%) |
| | | 合计 | 2017(65.4%) | 1065(34.6%) | 3082 |
| 太平洋海岸 | ERA-I | 有波导 | 323(49.0%) | 176(26.7%) | 499(75.7%) |
| | | 无波导 | 111(16.9%) | 49(7.4%) | 160(24.3%) |
| | | 合计 | 434(65.9%) | 225(34.1%) | 659(100.0%) |
| | FNL | 有波导 | 131(19.9%) | 39(5.9%) | 170(25.8%) |
| | | 无波导 | 303(46.0%) | 186(28.2%) | 489(74.2%) |
| | | 合计 | 434(65.9%) | 225(34.1%) | 659(100.0%) |
| 极地海域 | ERA-I | 有波导 | 425(22.3%) | 956(50.0%) | 1381(72.3%) |
| | | 无波导 | 49(2.5%) | 481(25.2%) | 530(27.7%) |
| | | 合计 | 474(24.8%) | 1437(75.2%) | 1911(100.0%) |
| | FNL | 有波导 | 44(2.3%) | 16(0.8%) | 60(3.1%) |
| | | 无波导 | 430(22.5%) | 1421(74.4%) | 1851(96.9%) |
| | | 合计 | 474(24.8%) | 1437(75.2%) | 1911(100.0%) |

大气波导识别正确率为再分析数据和探空站数据同时发生波导和没有发生波导的概率之和. 由

表4可知, ERA-I和FNL再分析数据在南海区域的波导识别正确率分别为49.2%和51.1%,其中ERA-I

和 FNL 两种再分析数据识别大气波导比例为 46.9% 和 2.3%, 与大气波导发生概率 51.0% 相比差距较大, 因此 FNL 数据在描述大气波导方面较差. 在中东海域、太平洋沿岸地区和南北两极海域也是类似的结论, 如中东海域 ERA-I 和 FNL 再分析数据的波导识别正确率分别为 51.3% 和 13.5%, 这与该海域实际发生波导概率为 65.4% 相比, 差别明显.

显然, FNL 再分析数据在识别大气波导方面较差, 但 ERA-I 再分析数据通常会高估波导发生概率, 这主要是由 ERA-I 再分析数据垂直分辨率比 FNL 数据高引起的. 为此利用 2015 年 7 月 8 日到 2019 年 7 月 31 日两种全球再分析数据进行了低空波导统计, 见图 7 和图 8.

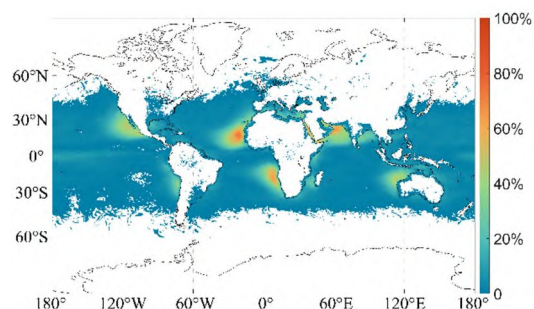


图 7 FNL 再分析数据全球波导发生概率分布
Fig.7 Global distribution of duct probability with FNL reanalysis data

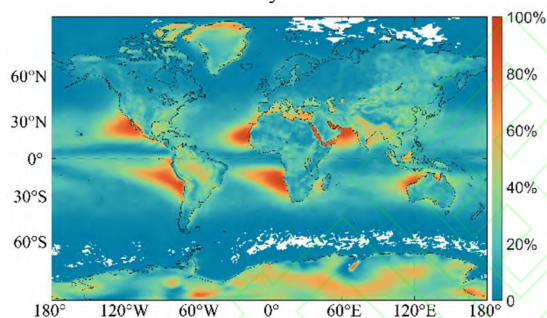


图 8 ERA-I 再分析数据全球波导发生概率
Fig.8 Global distribution of duct probability with ERA-I reanalysis data

从图 7 可知, FNL 能够识别出热带和副热带海域的大气波导情况, 温带部分海域及两极地区未能识别大气波导事件. 在识别的波动区域中, 能够发现一些大气波导高发区如阿拉伯海地区、大西洋东海岸、太平洋东海岸以及澳大利亚西海岸, 这与

ERA-I 给出的结果一致, 见图 8. 但 ERA-I 再分析数据在阿拉伯海地区、大西洋东海岸、太平洋东海岸以及澳大利亚西海岸可识别出波导, 波导最高概率达到 80% 以上, 比 FNL 数据高; 同时在两极地区也能够识别波导, 给出的全球结果与 Engeln 等^[7]在 2004 年给出的全球波导发生概率一致.

综上所述, FNL 再分析数据能够识别出海上波导高发区, 与 ERA-I 给出的结果一致, 但识别出的概率通常较小. 这主要是由 FNL 数据分辨率不足造成的, 因此使用时需进行必要处理, 如文献[11]利用该数据时采用 MM5 前置模块进行了插值处理.

2.3 初始场数值模拟结果分析

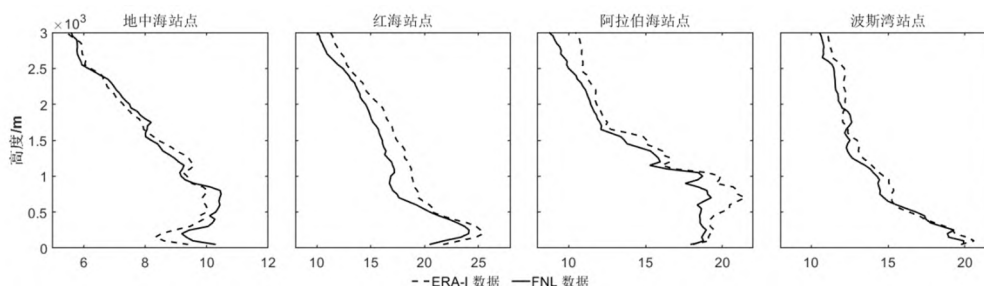
从 Engeln 等^[7]2004 年给出的全球统计结果中, 阿拉伯海与地中海地区是低空大气波导的高发区, 因此以该海域为例, 利用中尺度数值模式 WRF 开展了数值模拟研究. 表 5 给出了中东海域 4 个站点数值模拟的修正大气折射率的 RMSE 情况.

表 5 中东海域数值模拟结果的 RMSE
Tab.5 RMSE of simulation results in Middle East Sea

| 探空站 | 修正大气折射率/M 单位 | |
|--------|--------------|------|
| | ERA-I | FNL |
| 地中海站点 | 11.1 | 11.3 |
| 红海站点 | 22.0 | 21.4 |
| 阿拉伯海站点 | 21.2 | 19.8 |
| 波斯湾站点 | 18.3 | 18.0 |

由表 5 可知, 两种数据模拟的波导强度的 RMSE 在地中海最小, 分别为 11.1 M 单位和 11.3 M 单位, 红海最大分别为 22.0 M 单位和 21.4 M 单位. 因此两种数据作为初始场模拟的结果整体上差距较小, 大部分站点差距在 1 M 单位左右.

为进一步验证这一结论, 分别计算了两种数据修正大气折射率指数绝对误差, 平均误差、相关系数随高度的分布, 如图 9 所示.



(a) 绝对误差分布
(a) Distribution of overall absolute error

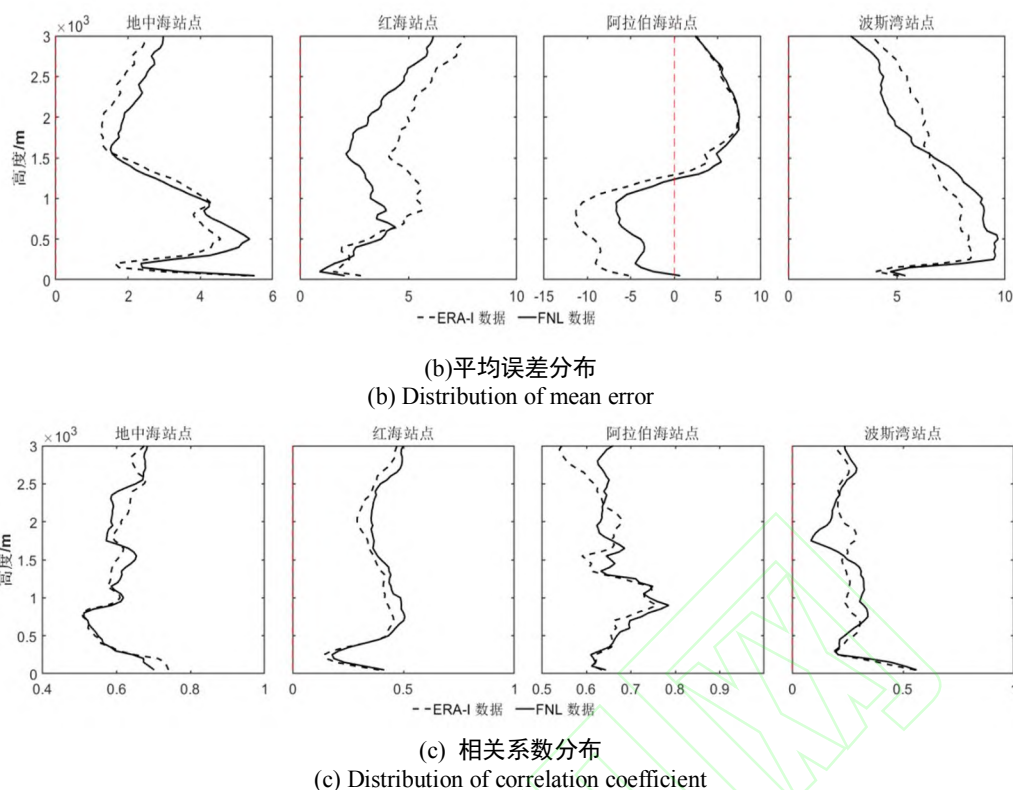


图9 4个站点修正大气折射率绝对误差、平均误差和相关系数随高度的分布
Fig.9 Distribution of correlation coefficient of the modified atmospheric refractivity at four stations

由图 9(a)和(b)可知,其他条件相同的条件下,作为初始场时计算的4个站点的绝对误差和平均误差都明显偏小,两者差距较小,如地中海和波斯湾模拟的修正大气折射率指数误差几乎相同;两数据的平均误差在高度分布上都存在几乎一致的地方,如阿拉伯海探空站 1.5 km 以上高度、波斯湾站点 0.5 km 以下高度两数据误差分布几乎重合。同样针对其他海域也进行了数值模拟,整体上尽管大多数站点 FNL 数据作为初始场时计算的修正大气折射率指数稍微小些,但两者绝对误差和平均误差分别在 5 M 单位之内和 3 M 单位之内,差别较小。从图 9(c)中相关系数分布也表明大部分站点与探空观测相关系数随高度变化几乎完全一致,除阿拉伯海部分高度内相关系数差别较大。

3 结论

本文以全球典型的探空站观测数据为标准,针对 ERA-I 和 FNL 两种再分析数据在直接和间接分析大气折射环境进行了应用评估,初步得到以下结论:

1) 两种再分析数据在直接分析大气折射环境中,极地地区、太平洋沿岸等靠近大洋的“开阔”海域, FNL 再分析数据对大气折射率环境有更高的准确性;在红海、波斯湾等相对封闭的内陆海域, ERA-I 再分析数据刻画得大气折射环境较为精确。

2) 在识别大气波导事件中, ERA-I 再分析数据能够识别出较多的大气波导,而 FNL 再分析数据

的波导通常会很低,甚至高纬度海域识别不出大气波导事件。

3) 两种再分析数据作为中尺度模式 WRF 初始场,经过数值模拟预报的大气折射率误差几乎一致,对于大气折射环境的刻画没有明显差别。

该工作对于充分挖掘利用全球再分析数据,建立电波环境数据库提供理论指导,也可对无线电系统性能评估及优化提供环境支持。

参考文献

- [1] 康士峰,郭相明. 电波环境及微波超视距传播[J]. 微波学报, 2020, 36(1): 118-123.
KANG S F, GUO X M. Radiowave environment and microwave transhorizon propagation [J]. Journal of microwaves, 2020, 36(1): 118-123.(in Chinese)
- [2] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 2001: 109-110.
ZHANG P C, DU B Y, DAI T P. Radar meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 109-110.(in Chinese)
- [3] 范建业. 大气波导探测方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
FAN J Y. Study on the method of detecting atmospheric duct[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese)
- [4] 张玉生,郭相明,赵强,等. 大气波导的研究现状与思考[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 813-831.
ZHANG Y S, GUO X M, ZHAO Q, et al. Research status

- and consideration of atmospheric duct[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(6): 813-831. (in Chinese)
- [5] DING J L, FEI J F, HUANG X G, et al. Observational occurrence of tropical cyclone ducts from GPS dropsonde data[J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2013, 52: 1221-1236.
- [6] 张钜一, 丁佳奇, 赵小峰. 基于 GPS 探空数据的南海海域大气波导特征分析[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 841-846.
ZHANG J Y, DING J Q, ZHAO X F. Statistical analysis of atmospheric ducts in the South China Sea based on GPS sounding[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(6): 841-846. (in Chinese)
- [7] VON ENGELN A, TEIXEIRA J. A ducting climatology derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global analysis fields[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 2004, 109(D18), doi:10.1029/2003JD004380.
- [8] 成印河, 杨欣坤, 张玉生, 等. 基于 ECMWF 数据的中国近海低空波导特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(1): 86-96.
CHENG Y H, YANG X K, ZHANG Y S, et al. Duct characteristics over the China Seas based on ECMWF reanalysis data[J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2021, 52(1): 86-96. (in Chinese)
- [9] CHENG Y H, ZHA M L, YOU Z W, et al. Duct climatology over the South China Sea based on European Center for Medium Range Weather Forecast reanalysis data [J]. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, 2021, (222):105720.
- [10] 王华, 马贲, 焦林, 等. 基于 ECMWF 再分析数据的大气波导分布规律研究 [J]. 气象学报, 2021, 79(3): 521-530.(in Chinese)
WANG H, MA F, JIAO L, et al. The Analysis on distribution characteristics of atmospheric ducts based on ECMWF data[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 79(3):521-530. (in Chinese)
- [11] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海大气波导的时空特征分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 702-708.
CHEN L, GAO S H, KANG S F, et al. Statistical analysis on spatial-temporal features of atmospheric ducts over the Chinese regional seas[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(4): 702-708.(in Chinese)
- [12] 成印河, 游志伟, 张玉生, 等. ERA-I 数据在南海大气折射率环境中的应用评估[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 885-895.
CHENG Y H, YOU Z W, ZHANG Y S, et al. Evaluation on the application of atmospheric refractive index from ERA-I over the South China Sea[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(6): 885-895.(in Chinese)
- [13] 朱彦良, 凌超, 陈洪滨. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析 [J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3):381-391.
ZHU Y L, LING C, CHEN H B. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data[J]. Climatic and environmental research, 2012, 17(3): 381-391.
- [14] 马永锋, 卞林根. ERA-Interim 再分析和 NCEP FNL 分析资料在东南极中山站至 Dome A 断面的适用性研究 [J]. 极地研究, 2014, 26(4): 469-480.
MA Y F, BIAN L G. A surface climatological validation of ECMWF ERA-Interim reanalysis and NCEP FNL analysis over east Antarctica[J]. Chinese journal of polar research, 2014, 26(4): 469-480. (in Chinese)
- [15] 余君, 李庆祥, 廖捷, 等. 中国区域高空三种气温、湿度资料交叉对比[J]. 气象, 2016, 42(6): 743-755.
YU J, LI Q X, LIAO J, et al. Cross comparison of three kinds of upper temperature and humidity data over China[J]. Meteorological monthly, 2016, 42(6): 743-755. (in Chinese)
- [16] LU L F, SASA K, SASAKI W, et al. Rough wave simulation and validation using onboard ship motion data in the Southern Hemisphere to enhance ship weather routing[J]. Ocean engineering, 2017, 144: 61-77. (in Chinese)
- [17] MENG X, CHENG J. Evaluating eight global reanalysis products for atmospheric correction of thermal infrared sensor: application to Landsat 8 TIRS10 data [J]. Remote sensing, 2018, 10(3): 474.
- [18] LI L, ZHANG R H, WU P L. Evaluation of NCEP-FNL and ERA-interim data sets in detecting Tibetan Plateau vortices in May–August of 2000–2015 [J]. Earth and space science, 2020, 7(3): e2019EA000907.
- [19] 吕润清, 李响. ERA-Interim 和 ERA5 再分析数据在江苏区域的适用性对比研究[J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 27-37.
LYU R Q, LI X. Comparison between the applicability of ERA-Interim and ERA5 reanalysis in Jiangsu Province[J]. Marine forecasts, 2021, 38(4):27-37. (in Chinese)
- [20] THOMPSON W T, HAACK T. An investigation of sea surface temperature influence on microwave refractivity: the Wallops-2000 experiment[J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2011, 50(11): 2319-2337.
- [21] WANG C, WILSON D, HAACK T, et al. Effects of initial and boundary conditions of mesoscale models on simulated atmospheric refractivity [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2012, 51(1): 115-132.
- [22] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海局部海域低空大气波导的天气学特征分析[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 1997-2002.
CHEN L, GAO S H, KANG S F, et al. Synoptic features analysis of atmospheric duct over the Chinese regional sea[J]. Acta electronica sinica, 2010, 38(9):1997-2002. (in Chinese)
- [23] 成印河, 徐剑辉, 张玉生, 等. 南海海域海表面温度对低空大气波导数值模拟的影响研究[J]. 电波科学学报, 2022, 37(1): 40-47.
CHENG Y H, XU J H, ZHANG Y S, et al. Influence of sea surface temperature on numerical simulation of lower atmospheric duct over the South China Sea [J]. Chinese

journal of radio science, 2010, 38(9): 1997-2002. (in Chinese)

- [24] 张懿, 陈军辉, 唐斌雁, 等. 基于两种再分析资料的一次四川盆地大气污染过程气象要素数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3093-3102.

ZHANG Y, CHEN J H, TANG B Y, et al. Numerical simulation of meteorological elements of a pollution episode in Sichuan Basin based on two reanalysis datasets [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2020, 40(9): 3093 -3102. (in Chinese)

作者简介



成印河(1980—), 男, 山东滨州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2009年毕业于中国科学院海洋研究所, 主要从事海洋数值模拟和大气波导相关研究, 主持国家自然科学基金面上和青年基金、广东省自然科学基金和江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目等课

题. Email: yinhe_9951@163.com.

彭上博(1996—), 男, 江苏徐州人, 研究生, 主要开展海洋空间信息技术研究. Email: 563958573@qq.com.

赵彬彬(1996—), 男, 吉林扶余人, 在读研究生, 主要开展边界层波导研究. Email: 2020220444@jou.edu.cn.

张玉生(1969—), 男, 研究员, 1992年毕业于南京气象学院, 长期从事电波环境特性和大气数值模拟研究, 发表研究论文 30 多篇, 出版专著 1 部. Email: zhangys@crirp.ac.cn.

郭相明(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事大气波导机理与模型, 海洋边界层等相关研究. Email: xmguo08@163.com.