



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究
作者：李福，孙越强，夏俊明，王先毅，杜起飞，白伟华，梁宏，罗晋
DOI：10.13203/j.whugis20240330
收稿日期：2024-11-29
网络首发日期：2024-12-31
引用格式：李福，孙越强，夏俊明，王先毅，杜起飞，白伟华，梁宏，罗晋. 中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240330>



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。

DOI:10.13203/j.whugis20240330

引用格式:

李福, 孙越强, 夏俊明, 等. 中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240330 (LI Fu, SUN Yueqiang, XIA Junming, et al. Research on Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in the Coastal Waters of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240330)

中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究

李福^{1,2,3};孙越强^{1,2,3};夏俊明^{1,3};王先毅^{1,3};杜起飞^{1,3};白伟华^{1,3};梁宏⁴;罗晋⁵

1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

4 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

5 云南省大气探测技术保障中心, 云南 昆明 650034

摘要: 蒸发波导由于其折射效应对雷达、通信具有显著影响。GNSS-R (Global Navigation Satellite Systems Reflectometry) 全天候、被动接收的特点使其具有探测蒸发波导的应用潜力, 然而岸基 GNSS-R 探测的空间范围与蒸发波导高度密切相关, 在中国近海复杂的蒸发波导环境下是否具备实用价值仍有待研究。因此, 基于沿海气象观测站实测数据以及欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的海水表面温度数据, 采用蒸发波导预测模型与 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型, 系统分析了 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时空分布特征。结果表明, 基于中国沿海气象数据得到的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围在 UTC 时间 5 点至 7 点达到峰值, 至夜间逐渐降低并趋于稳定; 季节变化方面, 夏秋季平均探测范围最大, 冬季最小, 在蒸发波导的高发期和平静期, GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的平均值分别为 145km 和 103km; 此外地域地形差异对探测范围也有影响, 辽东半岛以及海南岛西侧探测范围平均值均大于东侧, 而台湾海峡作为蒸发波导的高发区域, 其 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围明显大于周边海域。这一研究结果将扩展气象数据的应用领域, 提高相关区域雷达探测效能, 并且为通信提供干扰预警信息。

关键词: 蒸发波导; GNSS 反射; 有效散射半径; 气象观测

Research on Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in the Coastal Waters of China

LI Fu^{1,2,3}, SUN Yueqiang^{1,2,3}, XIA Junming^{1,3}, WANG Xianyi^{1,3}, DU Qifei^{1,3}, BAI Weihua^{1,3}, LIANG Hong⁴, LUO

收稿日期: 2024-11-29

基金项目: 国家自然科学基金 (42104032, 42074042); 风云应用先导项目 (FY-APP-2022.0108); 中国科学院青年创新促进委员会项目 (2020152); 中国科学院青年交叉团队科研项目 (JCTD-2021-10); 中国科学院国家空间科学中心青年创新课题 (E3PD40017S)

第一作者: 李福, 博士生, 工程师, 研究方向为 GNSS 遥感探测与应用。lif@nssc.ac.cn

通信作者: 夏俊明, 博士, 副研究员。xiajunming@nssc.ac.cn

1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

4 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

5 Yunnan Atmospheric Observation Technology Support Centre, Kunming 650034, China

Abstract: Objectives: The evaporation duct has a significant impact on shore based radar, shipborne radar, and 5G communication due to its refractive effect. GNSS-R has the application potential of detecting evaporation duct due to the characteristics of all-weather, passive reception and high spatial and temporal resolution. However, spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct is closely related to the evaporation duct height, and whether it has practical value in the complex evaporation duct environment near the coast of China still needs to be studied. **Methods:** Thus, meteorological data measured from coastal meteorological observation stations and sea surface temperature released by ECMWF were used to obtain the spatiotemporal distribution pattern of the spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct, which the evaporation duct model and GNSS-R evaporation duct detection range model are adopted. **Results:** The results indicate that the spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct based on Chinese coastal meteorological data first increases and then decreases during the day, reaches maximum from 5:00 to 7:00 UTC, and gradually decreases and stabilizes at night. In terms of seasonal changes, the highest is reached in summer and autumn, and the lowest is in winter. The detection range of the Bohai Sea and Yellow Sea are greatly affected by seasons, while the detection range of the East China Sea and South China Sea is large and remains relatively stable throughout the year, especially in the South China Sea, it can maintain a detection range of about 130km throughout the year. Further analysis found that during the high incidence period and the quiet period of the evaporation duct, the average spatial range of GNSS-R detection of the evaporation duct is 145km and 103km, respectively. In addition, regional differences have an influence on the detection range, for example, the average spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct on the western side of Liaodong Peninsula and Hainan Island is greater than that on the eastern side, and the Taiwan Strait, as a high incidence area for evaporation ducts, has a larger spatial range for GNSS-R detection of evaporation ducts than the surrounding waters. **Conclusions:** The analysis results can expand the application areas of meteorological data, improve radar detection efficiency in relevant areas, and provide the warning information for communication.

Key words: Evaporation duct; GNSS-R; Effective scattering region; Meteorological observation

大气波导是对流层大气中形成的一种特殊折射率剖面结构，可使电磁波传播轨迹弯曲程度超过地球曲率，并将其陷获在一定厚度的大气层内形成波导传播。蒸发波导是在海面几十米的高度范围内的一类特殊表面大气波导类型，出现概率达 85% 以上^[1]。蒸发波导可以使主动雷达探测区范围增加，从而实现超视距探测、实施超视距作战；另一方面蒸发波导容易使雷达出现探测盲区^[2-5]，因此蒸发波导对于岸基雷达以及舰船雷达影响显著。此外，我国 5G 基站采用的时分双工（Time Division Duplex, TDD）制式使蒸发波导在近海岸，尤其是渤海湾沿岸、海南岛沿岸、台湾海峡附近，对 5G 通信的干扰尤为明显^[6-11]。然而如果能合理利用蒸发波导效应，亦可以显著提高海上通信系统如 AIS（Automatic Identification System）系统、NAVTEX（Navigational Telex）系统等的有效通信距离与覆盖范围，增强海上通信可靠性^[12]。

蒸发波导的探测方式主要有微波折射率仪、低空系留气球、气象梯度仪、机载大气折射率探测等就位探

测方式^[1, 13]以及利用雷达海杂波反演大气波导的 RFC (Refractivity From Clutter) 技术^[7, 14, 15], 就位探测成本高、在海洋等大面积区域内无法大量设置观测点, 然而 RFC 方法属于主动探测方式, 在应用中容易暴露己方目标。目前蒸发波导的诊断(预测)主要采用海面以及特定高度的气象水文观测要素, 通过计算得到蒸发波导高度和大气折射率剖面, 目前应用比较广泛的有 PJ (Paulus-Jeske) 模型^[16, 17]、MGB (Musson-Gauthier-Bruth)模型^[18]、BYC (Babin-Young-Carton)模型^[19]、NPS (Naval Postgraduate School)模型^[20, 21]和伪折射率模型^[22]。然而蒸发波导预测模型无法对蒸发波导的水平方向进行预测, 因此很多研究人员采用再分析数据进行全球或区域蒸发波导统计研究^[23-29], 但是基于全球再分析数据计算的蒸发波导在时间和空间分辨率以及实时性等方面仍需要提升。探索更高效的蒸发波导探测技术, 将是未来提升海上雷达、跨海通信等领域性能的关键所在。

GNSS-R (Global Navigation Satellite Systems Reflectometry) 技术是一种新兴遥感探测技术^[30], 该技术通过 GNSS-R 接收机接收处理海洋、陆地等不同目标反射的 GNSS 信号, 实现地球物理参数的提取, 已经开始应用于海面风场^[31-32]、土壤湿度^[33-35]、海冰探测^[36-37]、积雪探测^[38]、水面高度^[39-40]等领域。由于 GNSS-R 技术具有全天候、被动接收等优势, 近年来国内外研究人员探索采用 GNSS-R 相关技术进行大气波导探测。Lowry 等提出了采用地基单站 GPS 精密单点定位反演大气折射率剖面的方法^[41]。王波等人从理论上证明了利用 GPS 海面散射信号反演大气波导的可行性, 并在我国东南沿海进行了相关实验验证^[42]。张金鹏等人论证了利用 GPS 散射信号的功率开展大气波导探测的可行性^[43, 44]。北航 GNSS-R 团队提出将 GNSS-R 反射信号近似为多条反射信号叠加的结果, 研究了在复杂环境下的 GNSS 反射信号模型, 增加了降雨、泡沫等因素的影响^[45, 46]。中国科学院国家空间科学中心刘黎军等人提出了 GNSS 卫星海面反射信号的有效散射区域的概念, 并仿真分析了大气波导高度对有效散射区域的影响以及将 GNSS 标准反射信号与 GNSS 波导反射信号分开的方法^[47]。Liu 等根据低仰角的 GNSS 海面散射信号可以被表面波导有效捕获的特点, 提出了一种基于 GNSS 反射信号接收功率反演表面波导的方法^[48]。

蒸发波导的折射效应会导致 GNSS-R 信号传播路径发生变化, 因此造成接收机接收到的 GNSS-R 信号范围不同, 从而可以根据 GNSS-R 信号范围反演蒸发波导参数信息。与传统就位探测和主动雷达探测相比, GNSS-R 具有全天候、被动探测的优势。现有研究表明, 岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的最远探测距离与蒸发波导高度密切相关^[47]。因此不同地理环境下蒸发波导参数不同, 导致利用 GNSS-R 技术探测蒸发波导的空间范围不同。中国东部和南部大陆海岸线有 1.8 万多千米, 内海和边海的水域面积约 470 多万平方千米, 岸基 GNSS-R 技术能否对相关海域内蒸发波导进行有效覆盖与有效探测, 将是岸基 GNSS-R 探测蒸发波导技术能否实用化的前提。

本文基于中国气象局提供的时长为一年的中国大陆沿海气象观测站逐小时气象观测数据, 在假定蒸发波导水平分布均匀的前提下, 结合 ECMWF (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)发布的全球海水表面温度数据, 采用蒸发波导预测模型-PJ 模型和 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型, 计算出相应的 GNSS-R 信号的最大有效散射半径, 作为该时刻对应地点周边海域的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围估计值。本文基于实测气象数据, 揭示了中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时空分布规律以及热点区域分布和地域地形相关影响。这一研究成果一方面为 GNSS-R 探测蒸发波导技术研究以及实用化提供了参考, 尤其是 GNSS-R 探测蒸发波导设备的研制以及安装选址提供了有效依据; 另一方面探索了

沿海以及岛屿上已有的气象观测数据的新应用。

1 原理

1.1 蒸发波导预测模型

Jeske 模型由 Jeske 在 1973 年提出，然后在 1985 年 Paulus 对 Jeske 模型进行了修正，简称 PJ 模型，该模型计算简便，是目前舰船上蒸发波导预测应用最为广泛的蒸发波导预测模型之一。PJ 模型用位折射率、位温、位水汽压分别代替折射率、空气温度、水汽压，海面大气压取常数 1000hPa。采用参考高度为 6m (h_1) 的空气温度 (T_{ak} ，单位：°C)、相对湿度 (RH)、风速 (u ，单位：kn) 和海水表面温度 (T_{sk} ，单位：°C) 作为输入，主要计算过程如下：

计算整体 Richardson 数 Ri_b 和 Monin-Obukhov 长度 L ，其中函数 Γ_e 用分段函数近似：

$$Ri_b = 369h_1 \frac{T_{ak} - T_{sk}}{u^2 T_{ak}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Gamma_e = 0.065 + 0.004Ri_b & Ri_b \leq -3.75 \\ \Gamma_e = 0.065 + 0.004Ri_b & -3.75 < Ri_b \leq -0.12 \\ \Gamma_e = 0.065 + 0.004Ri_b & -0.12 < Ri_b \leq 0.14 \\ \Gamma_e = 0.065 + 0.004Ri_b & Ri_b > 0.14 \end{cases} \quad (2)$$

$$L = \frac{10h_1\Gamma_e}{Ri_b} \quad (3)$$

PJ 模型根据输入的空气温度与海水表面温度差 (δ) 分为大气中性条件 ($\delta = 0$)、稳定的大气层结 ($\delta > 0$) 和不稳定的大气层结 ($\delta < 0$)，根据上述不同状态给出普适函数的取值公式为：

$$\begin{cases} \varphi = 1 + 5.2 \frac{z}{L} & (\delta > 0) \\ \varphi = 1 & (\delta = 0) \\ \varphi^4 - 18 \frac{z}{L} \varphi^3 = 1 & (\delta < 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中 z 为高度 (单位：m)。

采用位折射率公式分别计算空气的位折射率 N_a 和海面的位折射率 N_s ，

$$\begin{cases} N_a = \frac{77.6}{T_{ak}} \left[1000 + \frac{4810}{T_{ak}} e \right] \\ N_s = \frac{77.6}{T_{sk}} \left[1000 + \frac{4810}{T_{sk}} e_0 \right] \end{cases} \quad (5)$$

分别计算参考高度处的水汽压 e 和海水表面饱和水汽压 e_0 ：

$$\left\{ \begin{array}{l} e = \frac{RH}{100} \left\{ 6.105 \exp \left[25.22 \left(\frac{T_{ak} - 273.15}{T_{ak}} \right) - 5.31 \ln \left(\frac{T_{ak}}{273.15} \right) \right] \right\} \\ e_0 = 6.105 \exp \left[25.22 \left(\frac{T_{sk} - 273.15}{T_{sk}} \right) - 5.31 \ln \left(\frac{T_{sk}}{273.15} \right) \right] \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中 RH 为参考高度处的相对湿度。

稳定或者中性条件时，蒸发波导高度 z_{EDH} 为：

$$z_{EDH} \approx \frac{N_a - N_s}{-0.125 \left(\ln \frac{z}{z_0} + \frac{5.2}{L} z \right) - \frac{5.2(N_a - N_s)}{L}} \quad (7)$$

其中 z_0 为动力粗糙度，PJ 模型中取值为 $0.00015\text{m}^{[1]}$ 。根据上述结果判断波导高度 z_{EDH} 是否满足 $0 \leq z_{EDH} \leq L$ ，如果不满足，则重新计算波导高度如下：

$$z_{EDH} = - \frac{49.6(N_a - N_s) + 5.2z}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (8)$$

对于不稳定条件，蒸发波导高度为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{-0.125 \left(\ln \frac{h_1}{z_0} - \psi \right)}{N_a - N_s} \\ z_{EDH} = \left(\alpha^4 - \frac{18\alpha^3}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \end{array} \right. \quad (9)$$

其中 ψ 为 h_1/L 的普适函数。最后需要对计算结果进行修正，当 $T_a - T_s > -1$ 时，计算两个波导高度 $z_{EDH_0}(T_a = T_s)$ 和 $z_{EDH_1}(T_a = T_s - 1)$ ，取两个波导高度的较小值作为波导高度的最终值^[17]。

1.2 GNSS-R 探测蒸发波导原理

如图 1 所示，GNSS-R 技术采用两个天线分别接收 GNSS 定位信号和反射信号，将反射信号与本地码进行相干运算，得到基于码延时和多普勒延时的 DDM (Delay-Doppler Maps) 数据，从 DDM 中反演反射信号路径中的相关参数信息。

在标准大气环境且海面平静，即反射面光滑时，反射信号经过海面反射进入接收机反射天线，反射区域也就是通常称为镜面反射点（图 1 中 S_p 点）的位置可以按照几何光学方式进行计算。当标准大气环境下，海面粗糙时，此时海面反射信号既包括符合几何光学的镜面反射，也包括由于海面粗糙而产生的散射信号。在标准大气环境下，根据视线传播公式可以计算接收机反射天线接收到的所有信号的最远距离 D 如下^[49]：

$$D = \sqrt{2R_{eff}} \times \sqrt{H} \quad (10)$$

其中 R_{eff} 为考虑标准大气折射后的等效地球半径，约为 $4R_e/3$ ， R_e 为地球半径，本文取 6378137m ，假设接收机高度 H 为 10m ，则 D 约为 13km 。

下文中定义接收机反射天线与所能接收到的距离反射天线最远的反射信号的距离为 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围，如图 1 所示，标准大气环境下 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围记为 R_n 。本文假设蒸发波导水平分布均匀且具有水平无限扩展特性，当海面存在蒸发波导时，由于蒸发波导对电磁波的超折射效应超过了地球曲率，一部分在标准大气环境下计算的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围 R_n 之外的散射信号也能够进入接收机反射天线，此时 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围记为 R_d 。反射天线接收到的信号包含镜面反射点信号、经过蒸发波导区域的反射信号以及一部分直射信号，由于经过蒸发波导区域的反射信号相比于镜面反射点信号较弱，如何对上述信号进行有效区分是 GNSS-R 探测蒸发波导的难点。

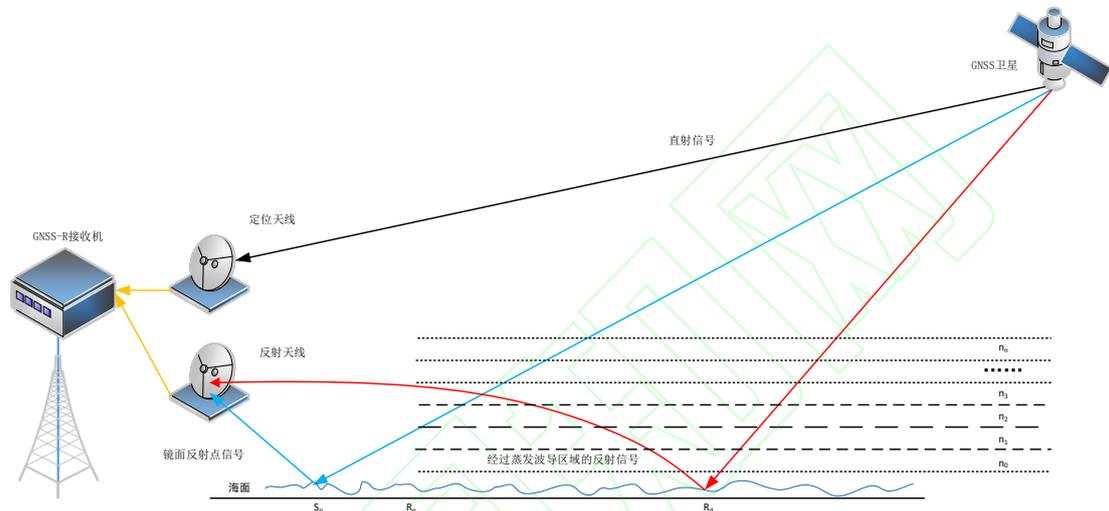


图 1 GNSS-R 探测蒸发波导原理

Fig. 1 Principle of GNSS-R Detection of Evaporation Duct

2 数据与方法

2.1 气象观测数据

本文采用气象局提供的中国沿海 99 个气象观测站时长为 1 年的逐小时观测数据，作为蒸发波导预测模型的实测参数，评估 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。筛选的气象观测站点的位置、名称等基本信息见表 1 所示。

表 1 气象观测站信息

Tab. 1 Meteorological Observation Station Information

观测站编号	纬度: °	经度: °	观测站名称	观测站编号	纬度: °	经度: °	观测站名称	观测站编号	纬度: °	经度: °	观测站名称
54449	39.85	119.51	秦皇岛	58264	32.34	121.22	如东	58946	25.44	119.00	莆田
54453	40.87	120.96	连山区	58265	32.10	121.54	吕四港	59127	24.43	117.83	龙海
54454	40.33	120.31	绥中	58269	31.79	121.64	启东	59133	24.89	118.92	崇武
54463	40.94	121.96	盘锦观象台	58369	31.06	121.79	浦东惠南	59137	24.81	118.54	晋江大监站
54471	40.67	122.17	营口	58458	30.54	120.90	海盐	59313	23.69	117.00	饶平
54476	40.18	122.15	熊岳	58460	30.82	121.27	金山	59316	23.39	116.68	汕头
54535	39.29	118.47	曹妃甸	58464	30.65	121.12	平湖	59317	22.98	116.30	惠来国家基 本气象站

观测站编号	纬度：°	经度：°	观测站名称	观测站编号	纬度：°	经度：°	观测站名称	观测站编号	纬度：°	经度：°	观测站名称
54540	39.73	119.19	昌黎	58467	30.20	121.29	慈溪	59318	23.32	116.57	潮阳
54565	39.60	121.47	长兴岛	58472	30.73	122.45	嵊泗	59319	23.51	116.73	澄海
54575	39.40	122.34	皮口	58474	30.64	122.05	小洋山	59320	23.75	117.14	诏安
54584	39.71	122.95	庄河	58484	30.24	122.20	岱山	59321	23.74	117.52	东山
54590	39.92	124.15	东港	58561	29.98	121.61	镇海	59324	23.43	117.03	南澳国家基 本气象站
54623	39.16	117.79	塘沽	58563	29.88	121.83	北仑	59485	22.51	113.41	中山
54624	38.40	117.31	黄骅	58566	29.38	121.92	象山	59486	22.65	113.89	深圳国家气 候观象台
54645	38.84	117.47	大港	58568	29.12	121.38	三门国家站	59487	22.23	113.30	斗门
54660	38.81	121.24	旅顺	58569	29.20	121.96	石浦	59488	22.28	113.57	珠海
54662	38.91	121.64	大连	58570	29.95	122.30	普陀	59492	23.03	114.67	惠东
54736	37.44	118.67	东营	58656	28.07	120.97	乐清站	59493	22.54	114.00	深圳
54749	37.19	119.94	莱州国家基 本气象站	58664	28.37	121.36	温岭	59501	22.79	115.36	汕尾
54752	37.79	120.76	蓬莱	58665	28.62	121.42	洪家	59502	22.97	115.65	陆丰
54753	37.64	120.34	龙口	58666	28.45	121.90	大陈	59632	21.98	108.60	钦州
54765	37.48	121.44	烟台	58667	28.08	121.27	玉环	59635	21.67	108.39	防城港
54774	37.47	122.13	威海	58751	27.67	120.57	平阳	59644	21.45	109.18	北部湾气候 观象台
54776	37.40	122.70	成山头	58752	27.78	120.65	瑞安	59656	21.41	110.81	吴川
54853	36.13	120.52	崂山	58760	27.83	121.15	洞头	59658	21.15	110.30	湛江
54857	36.07	120.33	青岛	58843	26.88	120.02	霞浦	59663	21.85	111.98	阳江国家基 本气象站
54863	36.78	121.18	海阳	58846	26.66	119.52	宁德	59673	21.74	112.77	上川岛
54871	36.93	122.48	石岛	58848	26.22	119.56	连江	59750	20.96	110.07	雷州
54943	35.83	120.03	黄岛	58850	26.92	120.23	三沙	59754	20.24	110.17	徐闻
54945	35.47	119.56	日照	58938	25.27	119.11	秀屿	59757	20.01	110.36	海口琼山
58040	34.86	119.13	赣榆	58941	25.97	119.50	长乐	59838	19.09	108.62	东方气象站
58150	33.75	120.30	射阳国家基 本气象站	58942	25.67	119.38	福清	59948	18.23	109.59	三亚国家气 候观象台
58158	33.17	120.46	大丰	58944	25.51	119.78	平潭	59951	18.80	110.33	万宁国家基 本气象站

每个站点均提供了站点纬度、站点经度、空气温度、空气相对湿度、大气压强、风速、风向等参数的逐小时数据，以及相关参数的测量时刻，数据时间为 UTC 时间 2023 年 5 月 1 日 0 时至 2024 年 4 月 30 日 23 时。其中有部分站点存在个别时刻数据缺失或者无效的情形，采用缺失数据或无效数据前后时刻计算的蒸发波导高度数据，通过线性插值的方法，将蒸发波导高度数据补充完整，以便于分析。需要注意的是，上述岸基气象观测站的安装位置一般位于陆海交界区，一些观测站点位于距离海岸线几十公里的位置，导致观

测受到海陆大气影响，并不能完全反应对应海域的蒸发波导气象条件，从而对蒸发波导高度预测造成一定的误差。

2.2 海水表面温度数据

沿海气象观测站的气象数据主要是大气相关参数，采用 PJ 模型进行蒸发波导高度计算还缺少海水表面温度数据，因此采用 ECMWF 发布的全球再分析数据中的逐小时海水表面温度数据^[50]。根据相关研究结果表明，ECMWF 海水表面温度数据比实际测量的海水表面温度低，因此会造成蒸发波导预测高度偏低^[51]，尽管如此，通过筛选气象观测站点相关位置的海水表面温度作为 PJ 模型的输入参数，计算蒸发波导高度，得到的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围时空分布特征仍具有重要的研究意义。

由于 ECMWF 的海水表面温度数据空间分辨率为 0.25 度，而气象站采样点大部分位于距离海岸一定距离的位置。因此采用最邻近的选择方法，如果距离气象观测站最近的再分析数据格点为陆地，则继续选择临近格点的海水表面温度数据。

2.3 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围计算方法

为了得到不同蒸发波导条件下 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围，本文采用 GREEPS (GNSS-R End-to-End Performance Simulator) 软件进行蒸发波导条件下 GNSS 信号仿真，GREEPS 是中国科学院国家空间科学中心开发的 GNSS 反射信号仿真软件，该软件基于电磁射线追踪法以及 Snell 定律，可以得到不同大气条件下反射信号的传播路径信息^[52]。根据不同蒸发波导高度得到的大气折射率曲线，可以得到对应的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。采用 Z-V 模型^[32]仿真得到不同蒸发波导条件下的有效散射半径分布，将接收机高度范围为 2~25 米且蒸发波导高度变化范围为 0~35 米时，得到的不同接收机高度 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均值^[47]进行拟合，得到 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型，该模型中 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围与蒸发波导高度的拟合函数如下：

$$R_d = 152.6e^{(0.001836z_{EDH})} - 132.8e^{(-0.1923z_{EDH})} \quad (11)$$

其中 z_{EDH} 为蒸发波导高度，单位为 m， R_d 为对应蒸发波导高度下 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均值，单位为 km。

采用气象站观测的温度、湿度、风速等气象数据以及 ECMWF 提供的海水表面温度数据，采用 PJ 模型计算对应时刻蒸发波导高度，然后以该时刻蒸发波导高度作为 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型输入，计算 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。根据公式(11)可知，当蒸发波导高度大于 28 米时，GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围将稳定在 160km 左右，因此对于大于 28 米的蒸发波导均可以按照 160km 的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围进行计算。需要注意的是，本文的仿真结果基于蒸发波导具有水平无限延伸特性的假设，实际情况中蒸发波导水平分布可能是不一致的，这将造成实际的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围与根据气象数据估计的探测范围不一致。

3 结果分析

3.1 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围时间演化特征

为了研究 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围时间演化特征，以月为时间区间，计算同一观测站点每天相同时刻的蒸发波导高度月平均值，根据式(11)计算得到对应的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围随时间的变化趋势曲线如图 2 所示，

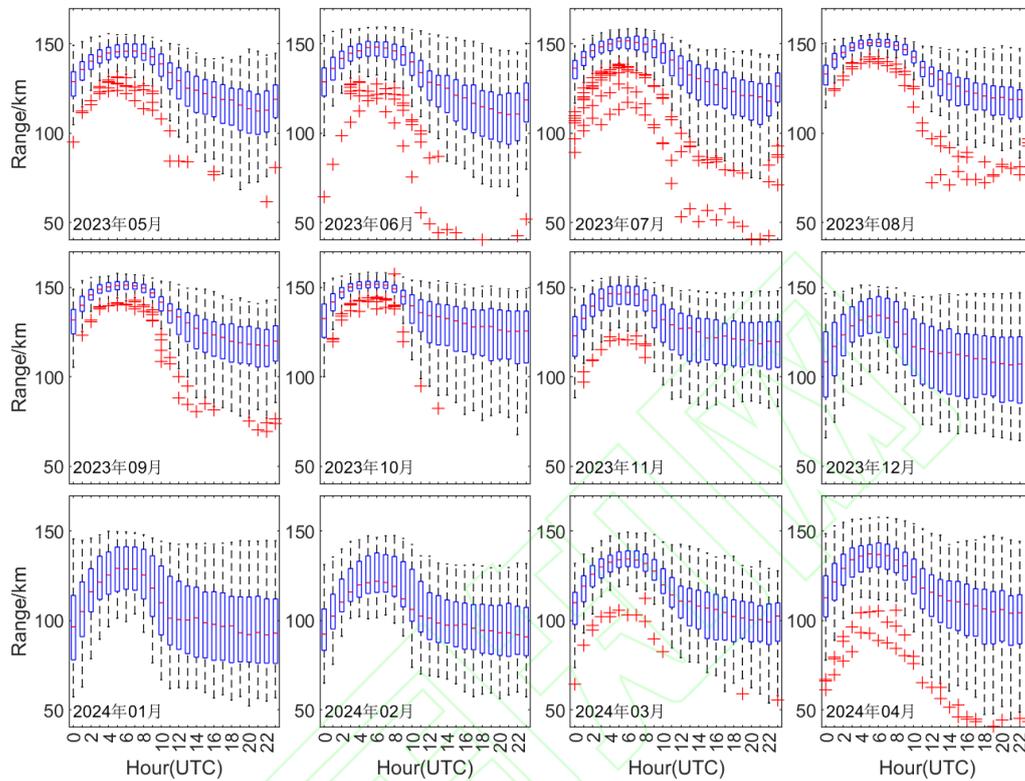


图 2 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围随时间的变化趋势

Fig. 2 Trend of spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct over time

由图 2 可知，GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围具有明显的日周期特性，在 UTC 时间 0:00~12:00（对应北京时间 8:00~20:00，也就是气象数据中对应的白天）的时间范围内，全年 12 月的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均显现出先增加后降低的特征，并且全天 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围最大值集中出现在 UTC 时间 5:00~7:00 之间。在 UTC 时间 12:00~24:00 的时间范围内（对应北京时间 20:00~第二天 8:00，也就是气象数据中对应的夜间），GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围在所有观测站点均趋于稳定，并且均低于全天的平均值。

计算每月所有站点各个时刻 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的均值如图 3 所示，可知 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围还有着明显的季节特征，具体表现为在 1 月、2 月为全年最低，在 3 月、4 月相比较 1 月、2 月有一个逐渐增加的过程，在 7 月、8 月、9 月和 10 月达到全年最高值，然后在 11 月、12 月相比较 7 月、8 月、9 月、10 月有一个逐渐降低的过程，上述变化规律与已有的采用再分析数据进行的蒸发波导高度统计研究^[24,28]结果一致。

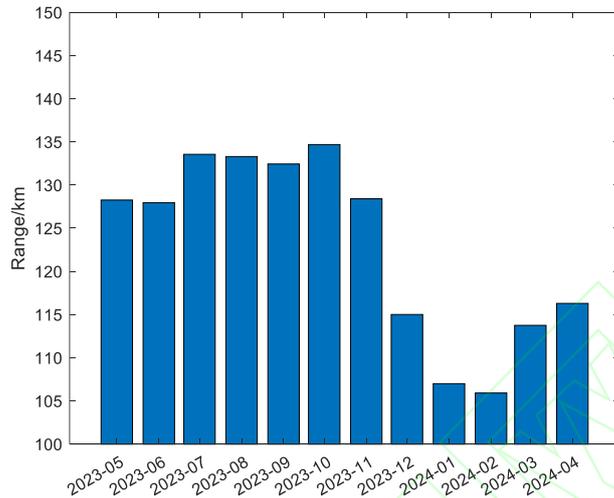


图 3 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围月变化

Fig. 3 Monthly spatial range variations of GNSS-R detection of evaporation duct

3.2 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围空间分布特征

基于 3.1 得出的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围时间演化特征结论，选取每一个观测站点每天 5、6、7 点（UTC）的数据计算月平均值作为该观测点该月白天的蒸发波导高度均值，由此得到各观测站点白天的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围分布如图 4 所示，选取夜间 20、21、22 点（UTC）的数据计算月平均值作为该观测点该月夜间的蒸发波导高度均值，由此得到全年各观测站点夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围分布如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知，选取的观测站点在白天和夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围变化趋势比较一致，具体表现为冬季（12 月、1 月、2 月）白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围显示出明显的南高北低趋势，即渤海、黄海以及部分东海海域白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围低于南海白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围；春季（3 月、4 月、5 月）渤海和黄海海域白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围逐渐增加，并逐渐与东海和南海海域的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围接近；夏季（6 月、7 月、8 月）秋季（9 月、10 月、11 月）渤海、黄海海域白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围与东海、南海海域的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围相近，均达到全年最大值；此外在 3 月和 11 月，渤海海域白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围出现了明显的季节转换趋势；4 月份黄海部分海域以及东海部分海域白天/夜间的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围相比其他海域低。

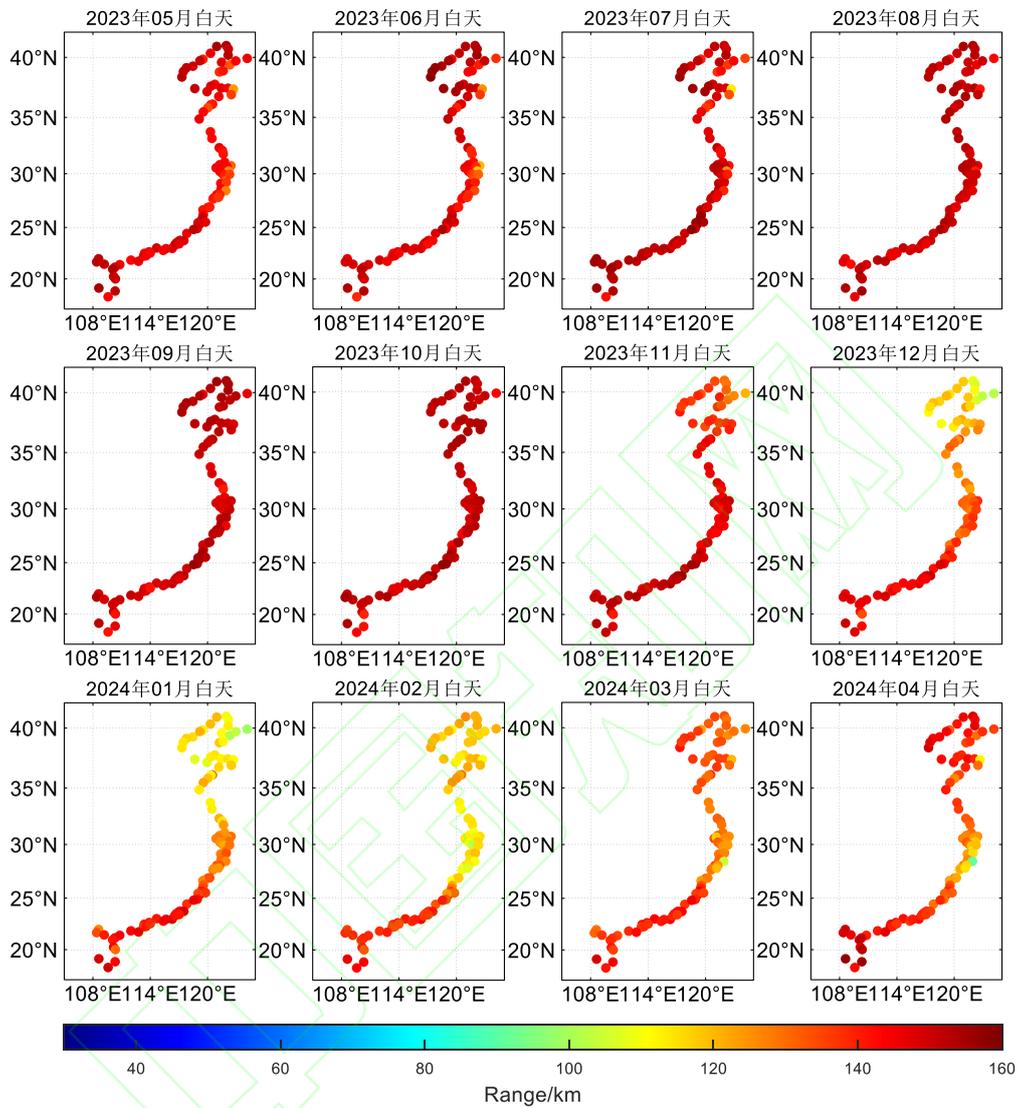


图 4 各观测站点白天 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围

Fig. 4 The spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct during daytime at each observation station

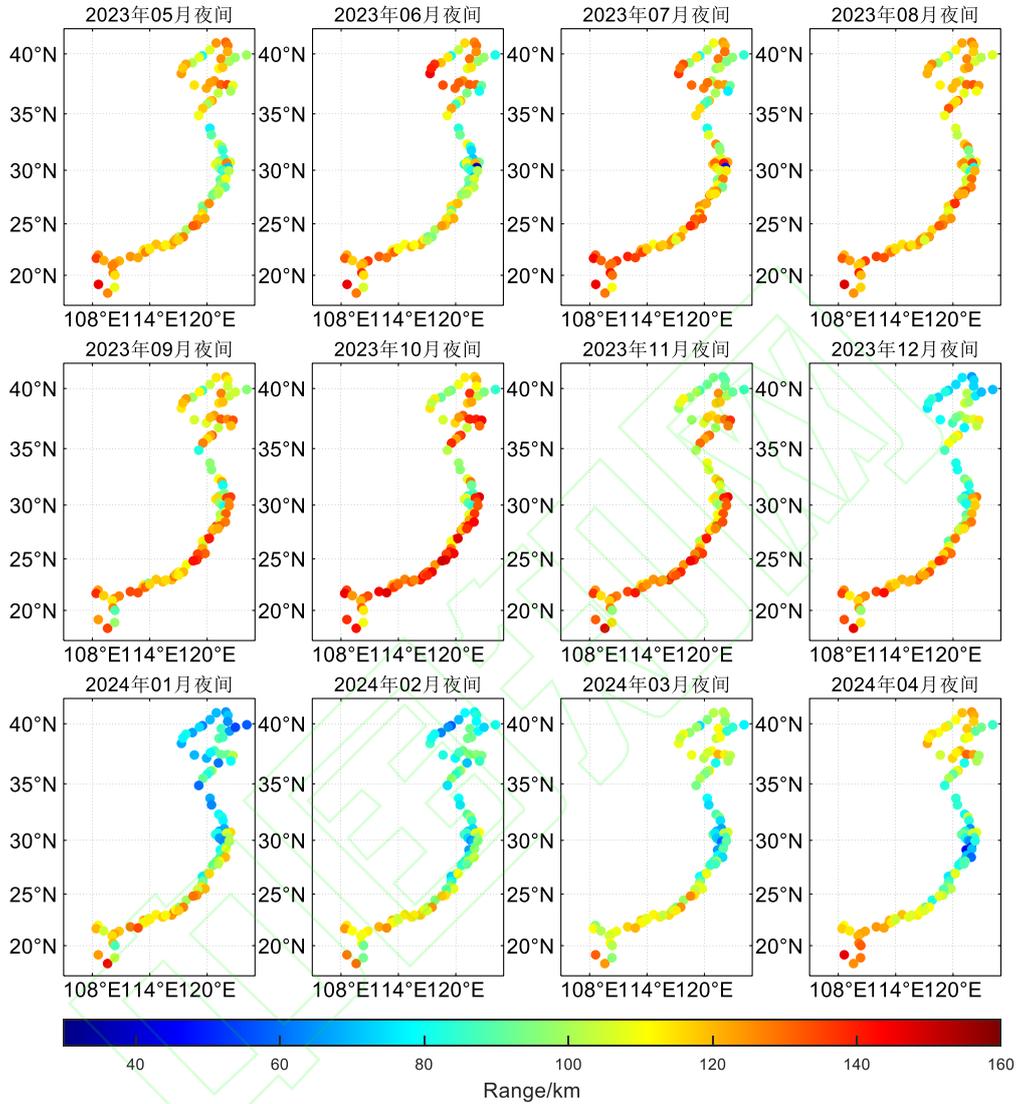


图 5 各观测站点夜间 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围

Fig. 5 The spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct during nighttime at each observation station

根据上述 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围时空分布规律，定义夏秋季白天为蒸发波导高发期，定义冬季夜间为蒸发波导平静期。计算蒸发波导高发期所有观测站点的蒸发波导高度平均值约为 13 米，然后根据 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型得到 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围约为 145km，以此作为蒸发波导高发期的平均探测范围。计算蒸发波导平静期所有观测站点的蒸发波导高度平均值约为 5 米，然后根据 GNSS-R 蒸发波导探测范围模型得到 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围约为 103km，以此作为蒸发波导平静期的平均探测范围。因此只要发生蒸发波导，即使在蒸发波导的平静期，仍能采用岸基 GNSS-R 技术对距离观测点约 103km 的海域的蒸发波导进行有效探测。

3.3 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的热点区域分析

根据 3.1 和 3.2 的分析结果，可知 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时间和空间分布均具有较明显的

特征。由于蒸发波导高度具有明显的日周期性，所以 3.1 和 3.2 采用的月平均统计方式，对于某些时刻出现的强波导可能会造成误差。此外不同海域气候变化规律不一样，需要考虑地域因素对蒸发波导的影响。因此按照观测站点位置临近的海域对观测站点进行划分，分别绘制了渤海、黄海、东海、南海海域每天的平均 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围如图 6 所示。

根据图 6 的结果可知，渤海和黄海海域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值受季节影响较大，在冬季达到全年最小值。东海和南海海域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值相比于渤海和黄海比较稳定，尤其是南海海域，能全年保持约 130km 的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。此外，黄海和东海同一时间各个站点的差异相比于渤海和南海要大。

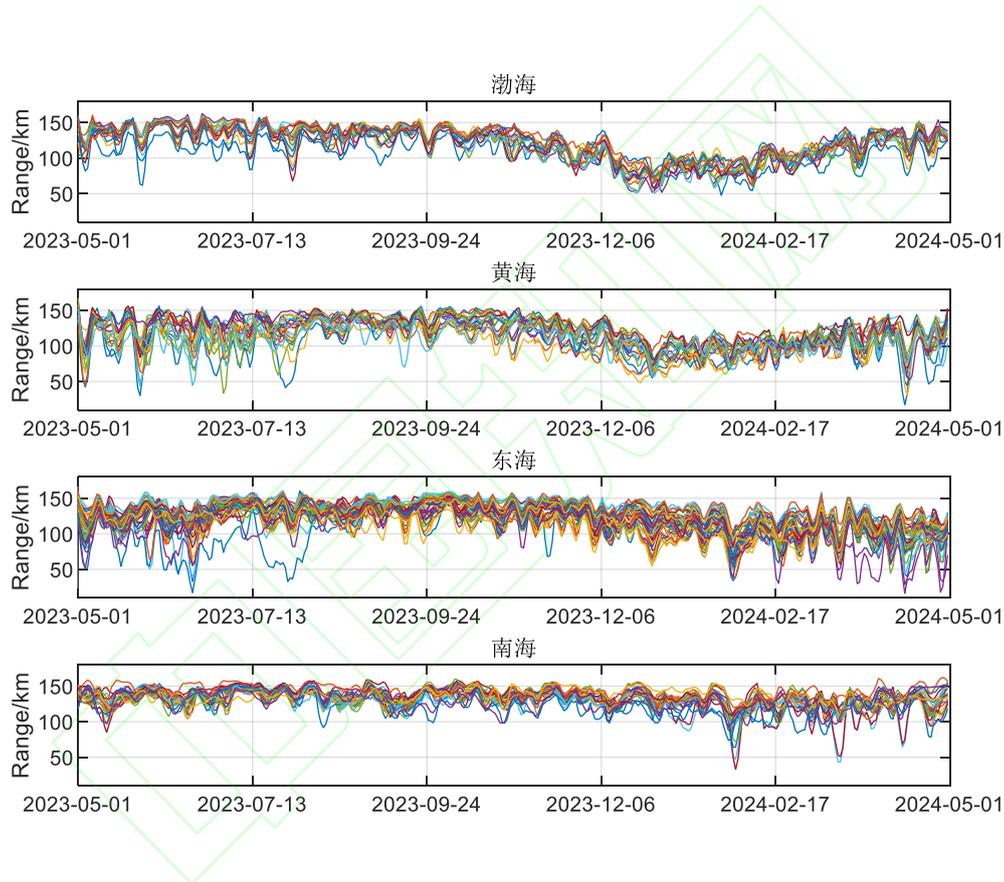


图 6 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围日均值

Fig. 6 Daily average spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct

另外需要注意的是，沿海陆地对蒸发波导也可能造成影响，为了进一步分析陆地影响，选取位于（1）辽东半岛西侧的长兴岛观测站和东侧的皮口观测站；（2）山东半岛北侧的烟台观测站和南侧的海阳观测站；（3）舟山群岛的嵊泗观测站、台湾海峡的秀屿观测站和雷州半岛周边的雷州观测站；（4）海南岛西侧的东方观测站和东侧的万宁观测站作为热点地区分析，将全年每天同一时刻的数据取均值得到 24 小时全年平均 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围如图 7 所示。

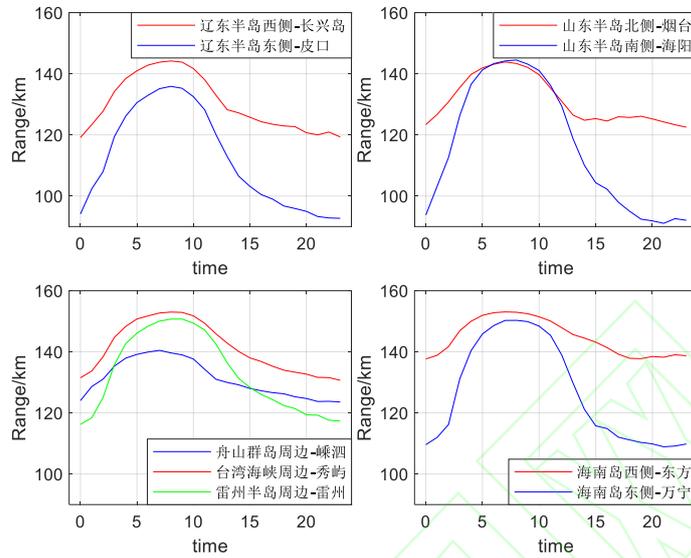


图 7 热点地区 24 小时全年平均 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围对比

Fig. 7 Comparison of the 24-hour annual average spatial range of GNSS-R detection of evaporation duct in hotspot areas

根据图 7 所示结果可知，辽东半岛东侧和西侧以及海南岛东侧和西侧 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围具有明显差异，西侧 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均大于东侧，考虑其原因可能是由于陆地的阻隔作用，辽东半岛西侧和海南岛西侧被陆地与太平洋阻隔，形成了更稳定的气象环境，更容易形成蒸发波导。山东半岛南侧和北侧只在夜间时间表现出北侧 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围大于南侧，白天时间两者 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围相近，考虑其原因是山东半岛北侧和南侧的地理位置对应的白天海洋环境参数对蒸发波导的影响相近。此外台湾海峡周边的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围大于同时间的舟山群岛附近的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围以及雷州半岛周边的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围。由于台湾海峡周边蒸发波导高发，所以采用 GNSS-R 进行蒸发波导探测，将会具有比其他区域更大的平均探测范围。

4 结语

本文采用气象局提供的沿海气象观测数据结合 ECMWF 海水表面温度数据计算蒸发波导高度，根据蒸发波导条件下的 GNSS-R 散射理论，对 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围的时空分布进行了分析，并且对热点地区进行了进一步研究。

研究表明，（1）基于沿海气象数据得到的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围具有明显的日变化规律和季节变化规律，即白天逐渐增加再降低，在 UTC 时间 5 点至 7 点达到最大，至夜间逐渐降低并趋于稳定；在夏季和秋季达到最大，冬季降低至全年最小值，3 月、4 月和 11 月、12 月显示出季节转换的趋势。（2）渤海海域和黄海海域受季节影响较大，东海和南海海域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围全年均保持在一个比较稳定的范围，其中南海海域全年 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围均值在 130km 左右。（3）蒸发波导高发期的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围平均值约为 145km，蒸发波导平静期的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围平均值约为 103km。（4）中国近海蒸发波导具有明显地理分布特征，例如台湾海峡周边比其

他区域 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围大, 辽东半岛西侧比辽东半岛东侧以及海南岛西侧比海南岛东侧的 GNSS-R 探测蒸发波导的平均空间范围大。

本文的研究结果显示出岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的巨大潜力以及应用前景, 如果能充分利用沿海站点、岛屿(如东沙群岛、南沙群岛)、近岸舰船以及海上浮标等安装 GNSS-R 探测设备, 则可以实现对相关海域进行全范围蒸发波导全天候被动探测, 探测结果可以实时应用于雷达修正、通信干扰预警等领域。此外, 本文研究结果表明可以基于现有气象观测数据估计蒸发波导高度以及 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围, 从而可以充分利用已经建成的沿海及岛屿气象观测站的数据, 扩展数据应用至蒸发波导监测领域, 其监测结果可以提升雷达探测、海上通信能力。

值得注意的是, 因为沿海气象观测数据的测量误差以及蒸发波导预测模型误差等因素, 所以根据沿海气象观测数据只能对 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围进行粗略估计, 真实的 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围需要考虑蒸发波导的水平分布以及电磁环境等因素的影响, 未来将关注于采用 GNSS-R 实测数据进行蒸发波导的统计分析, 构建蒸发波导实时探测、预警及修正系统。

致谢

感谢欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的海水表面温度数据。

参考文献

- [1] KANG S, ZHANG Y, WANG H. Atmospheric duct in troposphere environment [M]. Beijing: Science Press, 2014:2-82. (康士峰, 张玉生, 王红光. 对流层大气波导 [M]. 北京: 科学出版社, 2014:2-82.)
- [2] JIAO L, ZHANG Y. Study of the shadow zone of the radar in the atmospheric duct [J]. *Journal of Xidian University*, 2004, (05):815-820. (焦林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2004, (05):815-820.)
- [3] REN S. Design and Implementation of The Shipborne Radar Performance Evaluation System in The Evaporation Duct [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2022. (任朔. 蒸发波导环境下的舰船雷达性能评估系统设计与实现 [D]. 新乡: 河南师范大学, 2022.)
- [4] ZHANG H, WANG H G, LI J R. Analysis on trans-horizon sea echoes of weather radar within an atmospheric duct process[J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37 (3) : 505-511. (in Chinese) . DOI: 10.12265/j.cjors.2021090 (章晗, 王红光, 李建儒. 一次大气波导过程天气雷达超视距海面回波分析[J]. *电波科学学报*, 2022, 37 (3) : 505-511. DOI: 10.12265/j.cjors.2021090)
- [5] YU H, LIAO C, FENG J, et al. Analysis of Radar Target Scattering Echo With Surface Ducting in Large-Scale Environments Based on the PE-MoM Hybrid Method [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2023, 22(9): 2295-9.
- [6] ZHOU T, SUN T, HU H, et al. Analysis and Prediction of 100 km-Scale Atmospheric Duct Interference in TD-LTE Networks [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2017, 2(1): 66-80.
- [7] YANG C, GUO L. Inferring the atmospheric duct from radar sea clutter using the improved artificial bee colony algorithm [J]. *Int J Microw Wirel Technol*, 2018, 10(4): 437-45.
- [8] WANG Y, CHEN Y, ZHOU T, et al. A Traceable Approach to Remote Interference Management for New Radio; proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), F 20-24 May 2019, 2019 [C].

- [9] LIU F, PAN J, ZHOU X, et al. Atmospheric ducting effect in wireless communications: Challenges and opportunities [J]. *Journal of Communications and Information Networks*, 2021, 6(2): 101-9.
- [10] WEI M, XIE W, ZHANG G. Research Based on Remote Interference Management; proceedings of the 17th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2021, June 28, 2021 - July 2, 2021, Virtual, Online, China, F, 2021 [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [11] ZHAO F L. Forming interference of atmospheric duct in 5G and avoid method[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(1):109-115+126. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2019110901 (赵飞龙. 5G 大气波导干扰形成条件及其规避方法研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(1):109-115+126. DOI: 10.13443/j.cjors.2019110901)
- [12] DONG H, SONG L, HUA C, et al. Survey of the research and development on the maritimemunication technology [J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(05): 1-17. (董浩, 宋亮, 化存卿等. 海上通信技术发展与研究综述 [J]. *电信科学*, 2022, 38(05): 1-17.)
- [13] ZHANG Y S, GUO X M, ZHAO Q, et al. Research status and thinking of atmospheric duct [J]. *Journal of radio science*, 2020, 35(6):813-831. (in Chinese) . DOI:10.13443/j.cjors.2020072401 (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. DOI:10.13443/j.cjors.2020072401)
- [14] FOUNTOULAKIS V, EARLS C. Duct heights inferred from radar sea clutter using proper orthogonal bases [J]. *Radio Sci*, 2016, 51(10): 1614-26.
- [15] JI H, YIN B, ZHANG J, et al. Joint Inversion of Evaporation Duct Based on Radar Sea Clutter and Target Echo Using Deep Learning [J]. *Electronics*, 2022, 11(14): 2157.
- [16] JESKE H. State and Limits of Prediction Methods of Radar Wave Propagation Conditions Over Sea, Dordrecht, F, 1973 [C]. Springer Netherlands.
- [17] PAULUS R A. Practical application of an evaporation duct model [J]. *Radio Sci*, 1985, 20(4): 887-96.
- [18] MUSSON-GENON L, GAUTHIER S, BRUTH E. A simple method to determine evaporation duct height in the sea surface boundary layer [J]. *Radio Sci*, 1992, 27(05): 635-44.
- [19] BABIN S M, YOUNG G S, CARTON J A. A new model of the oceanic evaporation duct [J]. *J Appl Meteorol Climatol*, 1997, 36(3): 193-204.
- [20] Frederickson P., Davidson K., Goroch A. Operational Bulk Evaporation Duct Model for MORIAH Version 1.2, Naval Postgraduate School (2000), pp. 93943-95114.
- [21] FAIRALL C W, BRADLEY E F, HARE J E, et al. Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm [J]. *Journal of Climate*, 2003, 4):
- [22] LIU C, HUANG J, JIANG C, et al. Modeling Evaporation Duct over Sea with Pseudo-Refractivity and Similarity Theory [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(7): 970-2. (刘成国, 黄际英, 江长荫等. 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面 [J]. *电子学报*, 2001, 29(7): 970-2.)
- [23] YANG K, MA Y, SHI Y. Spatio-temporal distributions of evaporation duct for the West Pacific Ocean [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7339-50. (杨坤德, 马远良, 史阳. 西太平洋蒸发波导的时空统计规律研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7339-50.)
- [24] CHEN Li. Statistical Characteristics Analysis of Atmospheric Ducts over China Seas and Numerical Modeling Study on Their Evolution Mechanism [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (陈莉. 中国近海大气波导的统计特征分析及演变机理的数值研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.)
- [25] YANG K, ZHANG Q, SHI Y, et al. On analyzing space-time distribution of evaporation duct height over the global ocean [J]. *Acta Oceanol Sin*, 2016, 35(7): 20-9.
- [26] YANG S, LI X, WU C, et al. Application of the PJ and NPS evaporation duct models over the South China Sea (SCS) in winter [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): e0172284.
- [27] GUO X, ZHAO D, ZHANG L, et al. A Comparison Study of Sensitivity on PJ and NPS Models in China Seas [J]. *J Ocean Univ*, 2019, 18(5): 1022-30.

- [28] YAN K. Theoretical model and characteristics of evaporation waveguide near the sea surface [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2022:31-96.(杨坤德. 近海面蒸发波导理论模型与特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2022:31-96.)
- [29] QIU Z, ZHANG C, WANG B, et al. Analysis of the accuracy of using ERA5 reanalysis data for diagnosis of evaporation ducts in the East China Sea [J]. *Front Mar Sci*, 2023, 9(1108600).
- [30] MARTINEIRA M. A PASSIVE REFLECTOMETRY AND INTERFEROMETRY SYSTEM (PARIS) - APPLICATION TO OCEAN ALTIMETRY [J]. *Esa Journal-European Space Agency*, 1993, 17(4): 331-55.
- [31] GARRISON J L, KATZBERG S J. The Application of Reflected GPS Signals to Ocean Remote Sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(2): 175-87.
- [32] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-64.
- [33] TORRES O, KATZBERG S J. Analysis of reflected global positioning system (GPS) signals from land for soil moisture determination and topography mapping; proceedings of the Earth Observing Systems VII, July 7, 2002 - July 10, 2002, Seattle, WA, United states, F, 2002 [C]. SPIE.
- [34] JIA Yan, JIN Shuanggen, XIAO Zhiyu, et al. Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1784-1799. DOI: 10.13203/j.whugis20230253 (贾燕, 金双根, 肖智宇, 等. 全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(11): 1784-1799. DOI: 10.13203/j.whugis20230253)
- [35] ZHANG Shuangcheng, GUO Qinyu, MA Zhongmin, et al. Research Advances and Some Thoughts on Soil Moisture Retrieval by Space-Borne GNSS-R [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 15-26. DOI: 10.13203/j.whugis20230100 (张双成, 郭沁雨, 马中民, 等. 星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2024, 49(1): 15-26. DOI: 10.13203/j.whugis20230100)
- [36] ZHU Yongchao, ZOU Jingui, YU Kegen. A New Sea Ice Distribution Detection Method Using GNSS Reflected Signals [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1472-1477. DOI: 10.13203/j.whugis20160539 (朱勇超, 邹进贵, 余科根. 一种使用卫星反射信号探测海冰分布新方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43(10): 1472-1477. DOI: 10.13203/j.whugis20160539)
- [37] ZHANG Guodong, GUO Jian, YANG Dongkai, WANG Feng, GAO Hongxing. Sea Ice Edge Detection Using Spaceborne GNSS-R Signal [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 668-674. DOI: 10.13203/j.whugis20170050 (张国栋, 郭健, 杨东凯, 王峰, 高洪兴. 星载 GNSS-R 海冰边界探测方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2019, 44(5): 668-674. DOI: 10.13203/j.whugis20170050)
- [38] DENG Pan, WANG Zemin, AN Jiachun, ZHANG Xin, YU Qiuzhe, SUN Wei. An Improved Algorithm Based on Wavelet Decomposition to Retrieve Snow Depth Using GNSS-R Signals [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 863-870. DOI: 10.13203/j.whugis20190181 (邓攀, 王泽民, 安家春, 张辛, 于秋则, 孙伟. 利用小波分解的 GNSS-R 雪厚反演改进算法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(6): 863-870. DOI: 10.13203/j.whugis20190181)
- [39] WANG Dongwei, SUN Yueqiang, WANG Xianyi, BAI Weihua, XIA Junming, DU Qifei, CAI Yuerong, MENG Xiangguang, WU Chunjun, LIU Cheng, QIAO Hao, LI Fu. Water Surface Altimetry Using BD-3 B2a Reflected Signal [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1878-1886. DOI: 10.13203/j.whugis20200278 (王冬伟, 孙越强, 王先毅, 白伟华, 夏俊明, 杜起飞, 蔡跃荣, 孟祥广, 吴春俊, 刘成, 乔颖, 李福. 使用 BD-3 B2a 反射信号测量水面高度 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2022, 47(11): 1878-1886. DOI: 10.13203/j.whugis20200278)
- [40] DENG Ken, ZHOU Peiyuan, DU Lan, CAI Wei. GNSS-R Altimetry Method with Multi-system Single-Frequency Tight Integration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 146-155. DOI: 10.13203/j.whugis20220785 (邓垦, 周佩元, 杜兰, 蔡巍. 多系统单频紧组合 GNSS-R 测高方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2024, 49(1): 146-155. DOI: 10.13203/j.whugis20220785)

- [41] LOWRY A R, ROCKEN C, SOKOLOVSKIY S V, et al. Vertical profiling of atmospheric refractivity from ground-based GPS [J]. *Radio Sci*, 2002, 37(3): 1-21.
- [42] WANG Bo. Method and Experiment of Atmospheric Ducts Estimation using Radar Clutter and GNSS [D]. Xian: Xidian University, 2011. (王波.基于雷达杂波和GNSS的大气波导反演方法与实验[D].西安:西安电子科技大学,2011.)
- [43] ZHANG J, WU Z, WANG B, et al. Modeling low elevation GPS signal propagation in maritime atmospheric ducts [J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2012, 80(12-20).
- [44] ZHANG Jinpeng. Methods of Retrieving Tropospheric Ducts above Ocean Surface Using Radar Sea Clutter and GPS Signals [D]. Xian: Xidian University, 2013. (张金鹏.海上对流层波导的雷达海杂波/GPS信号反演方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.)
- [45] QI Y Q, ZHANG B, YANG D K, et al. Modeling and simulation of airborne GNSS ocean reflection signal [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(3): 567-572 (in Chinese). (祁永强,张波,杨东凯,等.机载GNSS海洋反射信号的建模与仿真[J].北京航空航天大学学报,2017,43(03):567-572.)
- [46] LI B, ZHANG B, YU Y, et al. A Random Model and Simulation for Generating GNSS Ocean Reflected Signals [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2019, 16(7): 1036-40.
- [47] Liu L J, Xia J M, Bai W H, et al. Influence of evaporation duct on the effective scattering region of GNSS reflected signals on the sea surface [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2019, 62(02): 499-507, doi:10.6038/cjg2019L0689. (刘黎军, 夏俊明, 白伟华等. 蒸发波导对GNSS海面反射信号有效散射区域的影响[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(02): 499-507, doi:10.6038/cjg2019L0689.)
- [48] LIU X, CAO Y, WU Z, et al. Inversion for Inhomogeneous Surface Duct without a Base Layer Based on Ocean-Scattered Low-Elevation BDS Signals [J]. *Remote Sens*, 2021, 13(19): 3914.
- [49] ZHANG Y. Electromagnetic Wave Propagation in Space [M]. Xian: Xidian University Press, 2007:104-106. (张瑜.电磁波空间传播[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007:104-106.)
- [50] The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present [DS/OL]. [2024-08-30] <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>.
- [51] YANG N, SONG D, SU D, et al. The Influence of Sea Surface Temperature From ECMWF Reanalysis Data on the Nonuniformity of Evaporation Duct [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2024, 21(1-5).
- [52] Bai W, Xia J, Zhao D, et al. GREEPS: An GNSS-R End-to-End Performance Simulator [J]. *IEEE*, 2016. DOI:10.1109/IGARSS.2016.7730260.

网络首发:

标题: 中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究

作者: 李福, 孙越强, 夏俊明, 王先毅, 杜起飞, 白伟华, 梁宏, 罗晋

收稿日期: 2024-11-29

DOI:10.13203/j.whugis20240330

引用格式:

李福, 孙越强, 夏俊明, 等. 中国近海岸基 GNSS-R 探测蒸发波导的空间范围研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240330 (LI Fu, SUN Yueqiang, XIA Junming, et al. Research on

Spatial Range of GNSS-R Detection of Evaporation Duct in the Coastal Waters of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240330)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

典型水循环参数星载 GNSS-R/SoOP-R 遥感探测的研究现状

吴学睿, 宋少辉, 马文骁, 郭鹏, 胡小工, 严哲

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 1-14.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220685>

一种改进的星载 GNSS-R 卷积神经网络海冰检测方法

叶世榕, 罗歆琪, 南阳, 夏朋飞

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 90-99.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220585>

星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考

张双成, 郭沁雨, 马中民, 刘奇, 胡胜伟, 周昕, 赵贺斌

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 15-26.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230100>