

文章编号: 1674-5566(2026)01-0324-12

DOI: 10. 12024/jsou. 20250404818

## 基于地基GNSS-R的夏季北极临岸地区土壤湿度反演:以阿拉斯加巴罗站为例

孔德刚, 常 亮

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

**摘 要:** 为了验证全球导航卫星系统反射(Global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)技术在北极临岸地区土壤湿度监测中的可靠性, 采用GNSS-R技术开展了夏季阿拉斯加巴罗(Barrow)站的土壤湿度反演研究, 并分别以美国能源部的ARM计划和SMAP中的土壤湿度为参考值, 分析了2015—2023年巴罗站土壤湿度的变化特征。结果显示, 2015—2023年GNSS-R数据与SMAP和ARM土壤湿度数据在长期趋势上具有较好的一致性, 年际结果间的相关性分别为0.54~0.76和0.54~0.81, 均方根误差分别为0.02~0.06和0.01~0.06。在2015—2023年的6—9月, GNSS-R反演的土壤湿度在中高湿度范围(SMAP的0.4~0.6 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, ARM的0.20~0.35 g/g)下, 与SMAP和ARM观测结果的一致性最佳。在低湿度和高湿度条件下, GNSS-R反演结果虽然能够捕捉土壤湿度的上升趋势, 但与SMAP和ARM存在一定的偏差, 这可能与夏季降雨增加有关。本研究证实了GNSS-R技术在北极沿岸反演土壤湿度的可靠性。

**关键词:** GNSS-R; 土壤湿度; 阿拉斯加; 多路径效应

**中图分类号:** X 87

**文献标志码:** A

近年来, 北极变暖速度是全球平均水平的2~3倍, 这种现象被称为“北极放大”<sup>[1]</sup>。“北极放大”现象带来的快速气候变化不仅对北极局地产生深远影响, 导致冰川和海冰的快速融化<sup>[2]</sup>、海洋温度升高<sup>[3]</sup>、植被扩张<sup>[4]</sup>以及生态系统的显著变化, 还通过大气和海洋环流作用影响全球气候系统<sup>[5]</sup>。开展北极气候变化研究, 对进一步深入研究全球气候变化具有重大意义。除上述影响外, “北极放大”效应导致的北极地区永久冻土退化也引发了科学家们的广泛关注<sup>[6-7]</sup>。永久冻土退化会导致气温升高和降雨模式变化, 从而改变该地区的土壤湿度时空动态特征<sup>[8]</sup>, 使得土壤湿度在短期内呈现上升趋势。北极土壤湿度不仅可表征冻土退化和水文动态变化<sup>[9]</sup>, 还为开展北极碳循环研究提供了重要视角, 同时沿海地区土壤湿度相较于其他地区的土壤湿度受海洋影响显著, 关系生态系统稳定。因此, 精确监测北极临岸地区土壤湿度并研究其变化特征, 对北极及全

球气候变化具有十分重要的意义<sup>[10]</sup>。

传统的电阻法和热重法<sup>[11]</sup>等土壤湿度测量方法虽然精度较高, 但测量过程费时费力, 且还存在着测量时间间隔较长、数据稀少、不连续等限制, 使得其难以构建大范围土壤湿度监测网络。微波遥感手段[如土壤水分主被动探测计划(Soil moisture active passive, SMAP)、土壤湿度及海洋盐度卫星(Soil moisture and ocean salinity, SMOS)]可以获取全球范围的土壤湿度<sup>[12-13]</sup>, 但其重返周期较长, 难以提供高时间分辨率的土壤湿度数据。随着全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)技术的发展, 研究人员在提高GNSS定位精度的过程中发现, 地表的多种物理信息能够在多路径效应的反射信号中体现, 并且反射信号会随环境的不同而发生改变<sup>[14]</sup>。MARTIN-NEIRA等<sup>[15]</sup>将全球导航卫星系统反射(Global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)技术观测应用于

收稿日期: 2025-04-02 修回日期: 2025-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(42174016)

作者简介: 孔德刚(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为GNSS-R技术。E-mail: 1321330315@qq.com

通信作者: 常 亮, E-mail: lchang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

海洋信息的获取,拉开了 GNSS-R 技术发展的序幕。随后许多学者开始利用 GNSS 卫星信号作为辐射源,通过接收地面、水面或积雪等介质的反射信号来获取反射表面的物理特性,并进一步用于土壤湿度<sup>[16]</sup>、积雪厚度<sup>[17]</sup>、海洋风场<sup>[18]</sup>、海面高度<sup>[19]</sup>等近地空间的环境监测。凭借地基 GNSS-R 技术的低成本、全天候监测、高时间分辨率的优势,地基 GNSS-R 技术也成为了土壤湿度监测的重要手段。

LARSON 等<sup>[20]</sup>于 2008 年首次提出基于 GNSS-R 技术的土壤湿度反演原理,该技术本质是利用直射信号与反射信号之间产生的干涉效应,利用卫星的信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)数据反演土壤湿度,并发现了 SNR 的振幅、频率和相位等参数与土壤湿度具有高度相关性<sup>[21]</sup>。CHEW 等<sup>[22]</sup>进一步发现,与其他参数相比,利用 SNR 的相位进行土壤湿度反演时效果最佳,其不仅能够更准确地匹配实测数据,还能够有效反映相位与土壤湿度之间的线性关系。张双成等<sup>[23]</sup>分析了 GNSS-R 反演土壤湿度现有误差源及校正方法,并探讨了未来研究方向。荆丽丽等<sup>[24]</sup>提出采用双频数据融合的方法进行土壤湿度反演,进一步提高了 GNSS-R 反演精度。CHEN 等<sup>[25]</sup>提出一种基于主成分分析和熵值法的多频数据融合反演改进算法。孙波等<sup>[26]</sup>提出的三频数据融合方法提高了 GNSS-R 反演土壤湿度的精度和稳定性。魏浩翰等<sup>[27]</sup>提出熵值法轨迹聚类多特征参数融合方法,实现了长期、准确的土壤湿度反演。张杰等<sup>[28]</sup>利用小波变换和 DNN 算法,改善了传统线性回归模型精度。何佳星等<sup>[29]</sup>利用 GPS(Global positioning system)的两个频段观测数据,构建了基于粒子群优化的卷积神经网络模型,实现了土壤湿度的高精度反演。在以往研究中,众多学者证实了利用 GNSS-R 技术在中低纬度反演土壤湿度的有效性,并提出了一些改进算法,推进了地基 GNSS-R 技术在土壤湿度监测中的发展。但是,受极地地区冰雪覆盖、GNSS 观测数据不稳定等特殊情况的影响,利用地基 GNSS-R 观测开展的北极临岸地区的土壤湿度反演及相关应用研究还比较少见。

为了进一步弄清地基 GNSS-R 技术在北极土壤湿度反演中的特点,本研究以 2015—2023 年

夏季(6—9 月)阿拉斯加巴罗站的 GNSS 测站为例,利用该时间段的卫星相位数据与土壤湿度之间的线性关系,开展北极临岸地区地基 GNSS-R 土壤湿度反演的试验研究。同时,以 SMAP 和大气辐射测量计划(Atmospheric radiation measurement, ARM)得到的土壤湿度为参考值,对地基 GNSS-R 技术反演的土壤湿度进行精度评估。此外,还基于巴罗站地基 GNSS-R 反演的土壤湿度结果,分析该测站的土壤湿度在不同时间尺度上的变化特征。最后,通过建立 GNSS 观测相位与土壤湿度之间的线性关系模型,并开展土壤湿度预测研究,评估 GNSS-R 技术预测土壤湿度的可靠性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

本研究选取了北极阿拉斯加巴罗站的 GNSS 观测来开展北极临岸地区地基 GNSS-R 土壤湿度反演研究。阿拉斯加州是美国唯一部分位于北极圈的地区,它的地理位置、气候环境及生态系统都与北极有着紧密联系。该地区的土壤湿度在一年中受降水、积雪融化和冻土变化的影响显著,其时空分布具有较强的不均匀性和动态变化特征,土壤湿度作为陆气相互作用的关键变量,在调节区域水文循环、生态系统健康以及碳循环过程中发挥着重要作用,其对气候变化的高度敏感性,使其成为研究高纬度地区气候响应及环境变化的重要研究变量。

巴罗站的 GNSS 观测数据来源于美国“地球透镜计划”(EarthScope)的核心组成部分:美国板块边界观测计划(Plate boundary observatory, PBO)。为了研究北美大陆西部的地壳变形过程,该计划在板块边界区域部署包含 GNSS 观测点、钻孔应变仪和激光应变仪的观测网络。由于 GNSS-R 反演土壤湿度要求测站周围尽可能平坦且无遮挡,因此需结合 GNSS 测站的周边地形和环境等因素对站点进行筛选。本研究选择的巴罗站(图 1)的站点经度为 156.67°W,纬度为 71.33°N,海拔为 11.5 m,使用的数据为 2015—2023 年夏季(6—9 月),GNSS 数据可以从 UNAVCO (<https://www.unavco.org/data/data.html>)下载,数据的采样率为 15 s。

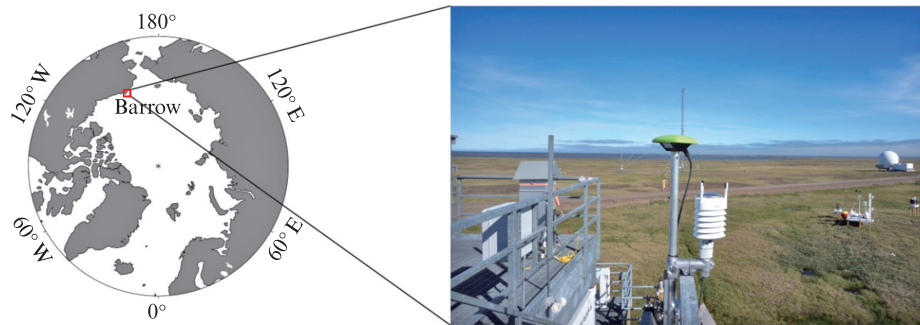


图1 巴罗站点位置及实景图(来源 IGS 站点图)

Fig. 1 Location and field view of the Barrow Station (Source IGS site map)

为了验证北极巴罗站上基于 GNSS-R 技术反演的土壤湿度的精度,进一步引入了美国国家航空航天局 (National aeronautics and space administration, NASA) 的 SMAP 卫星和美国能源部的 ARM 计划探测的土壤湿度结果,对地基 GNSS-R 的反演结果进行精度评估。SMAP 卫星是 NASA 地球观测系统的重要组成部分,通过搭载 L 波段微波辐射计和雷达,提供高分辨率的全球土壤湿度和冻结-融化状态数据来支持气候变化、水文循环和生态系统过程的研究。SMAP 土壤湿度数据的精度已被许多学者进行了验证<sup>[30-31]</sup>,有研究<sup>[32]</sup>表明,SMAP 数据是目前覆盖区域最广、精度最高的土壤湿度数据。ARM 计划是全球重要的气候观测和研究项目之一,该计划从 1992 年开始在世界上最重要的气候区(包括赤道和极地)建立设备齐全的地面研究站,利用先进的地基和远程传感器网络,收集云、气溶胶、辐射、土壤湿度等数据,为气候变化及大气过程的研究提供支持。2015—2023 年 SMAP 的三级土壤湿度和冻融数据,空间分辨率均为 36 km,时间分辨率为 1 d。SMAP 的土壤湿度和冻融数据可从美国国家冰雪数据中心 (National snow and ice

data center, NSIDC) 免费获取。ARM 计划在阿拉斯加巴罗市设置有固定站点阿拉斯加北坡 (North slope of Alaska, NSA), 提供了土壤湿度实测数据,可以从 ARM 数据集 ([https://adc.arm.gov/discovery/#/results/instrument\\_code::sebs](https://adc.arm.gov/discovery/#/results/instrument_code::sebs)) 免费获取,ARM 土壤湿度数据集的时间分辨率为 1 d。

另外,SMAP 提供的土壤湿度是体积含水量(即土壤总体积中的含水量),而 ARM 土壤湿度则是质量含水量(即每单位质量土壤中水的质量)。考虑到 SMAP 和 ARM 提供的土壤湿度的表征量不同,在后续的分析中,将分别以 SMAP 与 ARM 提供的土壤湿度结果作为参考值,对地基 GNSS-R 反演得到的阿拉斯加巴罗站的土壤体积含水量和土壤质量含水量进行精度评估。

## 1.2 GNSS-R 技术反演土壤湿度基本原理

GNSS-R 技术是利用反射信号 SNR 的振幅和相位与土壤湿度之间的强相关性,来实现土壤湿度的反演。图 2 为多路径效应示意图,卫星直射信号  $S$  与其在  $A$  点处产生的反射信号  $S'$  在  $B$  点发生干涉效应。

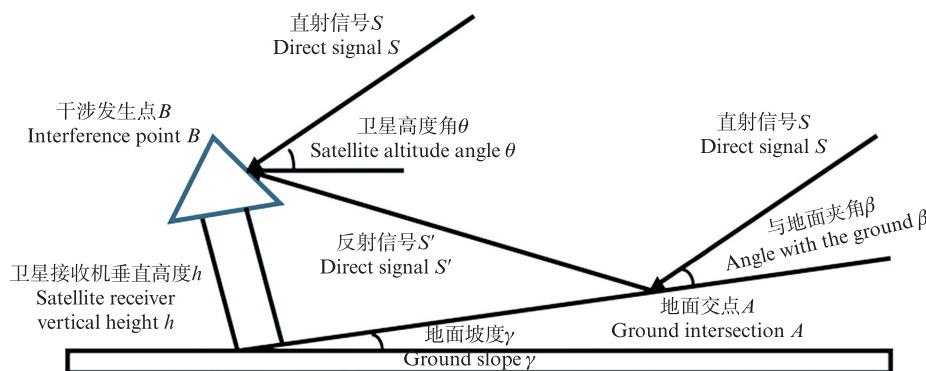


图2 多路径效应模型

Fig. 2 Multipath effect model



由图2的几何关系可知直射信号 $S$ 与反射信号 $S'$ 之间的路程差 $\Delta S$ 为

$$\Delta S = S' - S = \frac{h}{\sin \beta} (1 - \cos 2\beta) = 2h \sin \beta \quad (1)$$

又可知 $\beta = |\theta - \gamma|$ ,代入公式(1)中可得:

$$\Delta S = S' - S = 2h \sin |\theta - \gamma| \quad (2)$$

设波长为 $\lambda$ ,则直射信号 $S$ 与反射信号 $S'$ 之

间的相位差 $\psi$ 为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \sin |\theta - \gamma| \quad (3)$$

由公式(3)可知直射信号 $S$ 与反射信号 $S'$ 之间的相位差 $\psi$ 与 $h$ 成正比,与波长 $\lambda$ 成反比。在坡度 $\gamma$ 较小时,直射信号 $S$ 与反射信号 $S'$ 的相位差和卫星高度角的正余弦函数之间存在线性关系。图3为GNSS-R技术原理图。

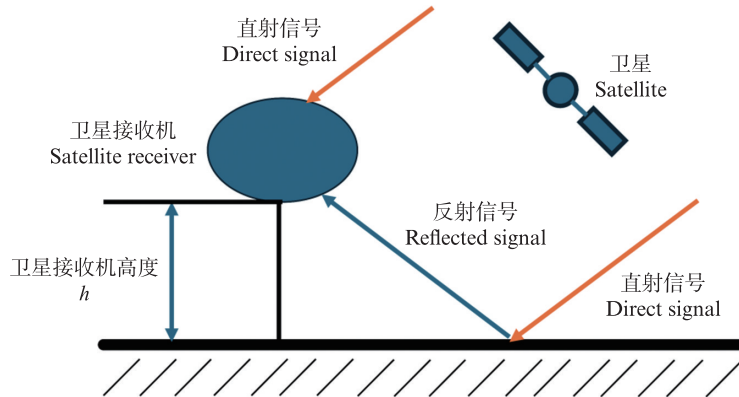


图3 GNSS-R技术原理

Fig. 3 GNSS-R technology principle

GNSS卫星信噪比信号中的多路径效应可表示为

$$S_m^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \varphi \quad (4)$$

式中: $S_m$ 为信噪比; $A_d$ 和 $A_r$ 分别为直射信号和反射信号的振幅; $\varphi$ 为这两个信号之间的相位差。

采用低阶多项式去除直射信号后,残余信噪比( $SNR_m$ )可表示为

$$SNR_m = A \cos \left( \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \theta + \varphi \right) \quad (5)$$

式中: $A$ 为振幅; $\lambda$ 为波长; $\theta$ 为高度角; $h$ 为反射高度; $\varphi$ 为拟合相位。

由于GNSS卫星高度角的正弦值是非等间距采样的,这使得信号在时间序列上的分布不均匀,进而影响数据的周期性分析和处理。因此,通常使用Lomb-Scargle谱分析(L-S谱分析)来弥补快速傅里叶变换(FFT)在非等间距采样条件下的不足,结合Lomb-Scargle谱分析与最小二乘法提取多路径反射信号的频率、幅度以及相位延迟

信息,据此得到能够表征土壤湿度变化趋势的相位,然后通过构建线性回归模型,实现土壤湿度的反演。利用GNSS-R技术开展土壤湿度反演的具体流程如图4所示。

## 2 结果

### 2.1 年际土壤湿度的变化特征与精度分析

图5为2015—2023年SMAP土壤湿度与GNSS-R反演的土壤湿度散点图。处理数据时先利用SMAP冻融数据去除冻结状态时间的数据,然后按照时间进行数据匹配。从图中可以看出数据点大多集中在 $0.40 \sim 0.55 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,表明巴罗站处的土壤体积含水量通常处于这一范围。整体来看,GNSS-R和SMAP之间有较高的一致性,相关系数为 $0.54 \sim 0.76$ ,说明GNSS-R技术能够较好地反演土壤湿度。大部分年份的均方根误差(RMSE)都在 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以内,表明其反演结果较为准确。

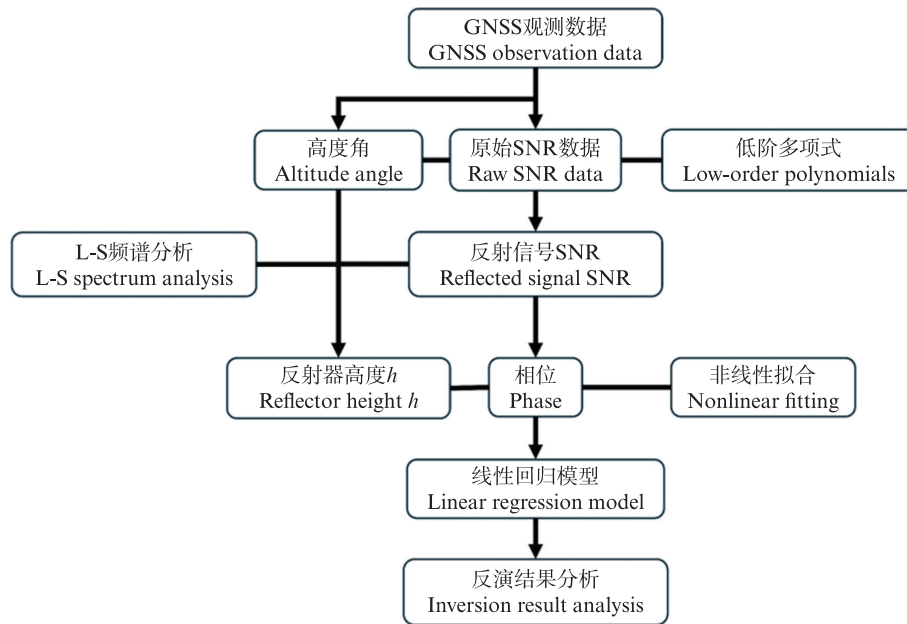


图4 GNSS-R技术反演土壤湿度的技术路线

Fig. 4 Technical route of GNSS-R technology for soil moisture retrieval

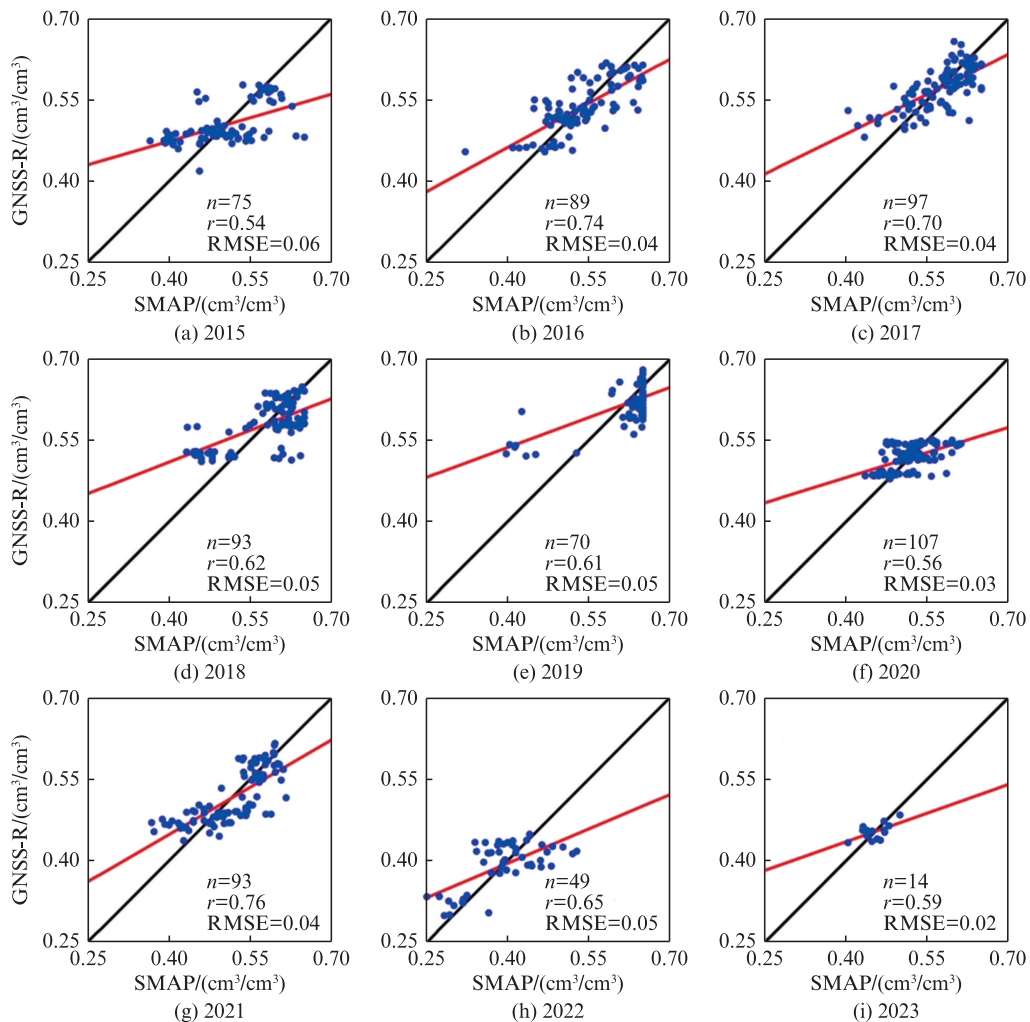


图5 2015—2023年SMAP与GNSS-R结果散点图

Fig. 5 Scatter plot of SMAP and GNSS-R results from 2015 to 2023

在 2015—2017 年, GNSS-R 反演结果与 SMAP 数据的一致性较高, 尤其是 2016 和 2017 年, 相关系数分别达到 0.74 和 0.70, 且均方根误差较低(均为 0.04), 表明该时间段内 GNSS-R 反演土壤湿度的精度较好。在 2018—2020 年, 数据相关性有所波动, 相关系数为 0.56~0.65, 均方根误差为 0.03~0.05, 2018 和 2019 年 GNSS-R 结果与 SMAP 数据大体一致, 而 2020 年拟合线偏低, 说明 GNSS-R 结果系统性低于 SMAP 数据(低估现象), 这几年的整体精度略低于 2016 和 2017 年。在 2021—2023 年, 2021 年的相关性最高( $r=0.76$ ), RMSE 为 0.04, 表明该年的反演结果与

SMAP 数据一致性最好, 2023 年 RMSE 最低(0.02), 但是由于反演的样本数量较少( $n=14$ ), 导致结果可靠性降低。

图 6 为 2015—2023 年 ARM 土壤湿度与 GNSS-R 反演的土壤湿度散点图。从图中可以看出数据点大多集中在 0.2~0.4 g/g, 表明巴罗站处的土壤质量含水量通常处于这一范围。整体来看, GNSS-R 与 ARM 数据具有较好的相关性, 相关系数普遍较高, 尤其是在 2015 和 2017 年, 相关系数分别为 0.81 和 0.76, 表明 GNSS-R 与 ARM 数据一致性较好, GNSS-R 能够较为准确地反演 ARM 数据所代表的土壤湿度。

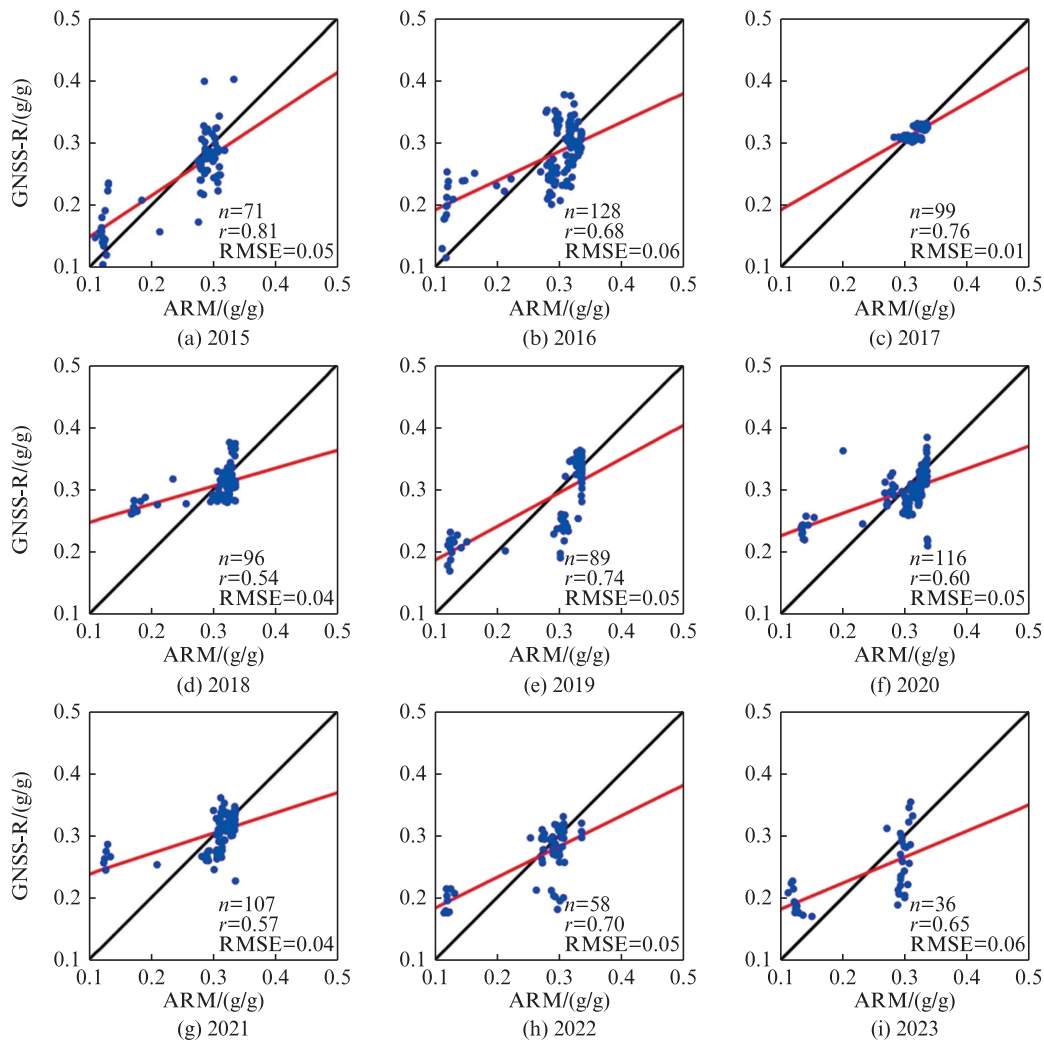


图 6 2015—2023 年 ARM 与 GNSS-R 结果散点图

Fig. 6 Scatter plot of ARM and GNSS-R results from 2015 to 2023

在 2015—2016 年, 数据点分布较为离散, 表明 GNSS-R 反演结果波动较大, 而 2017 年数据分布更接近 1:1 线, 表明该年 GNSS-R 反演结果精

度最佳。2018—2020 年, 数据点集中在 0.20~0.35 g/g, 分布相对均匀, 但部分数据偏离理想 1:1 线, 可能受降水、温度、植被覆盖等环境条件影

响,导致存在系统偏差<sup>[33]</sup>。2021—2023年,数据点较为集中,GNSS-R反演结果较好,但2023年样本数较少,导致统计代表性不足。最小RMSE在2017年(0.01),表明该年的GNSS-R反演结果与ARM数据最为接近,其他年份的RMSE为0.04~0.06,误差相对稳定,但2016、2020和2023年误差相对较大,可能受环境条件变化影响<sup>[34]</sup>。

另外,GNSS-R对SMAP与ARM土壤湿度的反演结果都比较好,但存在差异。这可能因为SMAP反演的是土壤的体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),而ARM反演的是土壤的质量含水量( $\text{g/g}$ )。并且SMAP通过遥感技术(微波辐射计)测量土壤表层的湿度,受地表植被和土壤类型的影响较大,而ARM通过地面传感器直接测量土壤湿度,能够提供较为精确的局部土壤湿度数据,但其覆盖范围有限。

## 2.2 月际土壤湿度的变化特征与精度分析

图7为2015—2023年6—9月SMAP土壤湿度与GNSS-R反演的土壤湿度散点图。6月数据点分布较分散,GNSS-R数据在低湿度( $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下)与SMAP数据存在一定偏差。7月数据

点数量最多( $n=239$ ),但相关性略有降低( $r=0.50$ ),在湿度较高时,GNSS-R倾向于低估湿度。8月数据点在中等湿度范围( $0.40\sim 0.55 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )较集中,高湿度部分拟合较好,相关性略高于7月( $r=0.58$ )。9月数据点分布较为集中,尤其在 $0.50\sim 0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内拟合线接近理想1:1线,相关性与6月、8月相似( $r=0.57$ ),但RMSE(0.04)明显降低,表明反演精度有所提高。

在6—9月期间,GNSS-R数据与SMAP数据的相关性为中等水平( $r$ 在 $0.50\sim 0.58$ ),但9月的RMSE最小(0.04),表明该月份的反演精度较高。数据分布显示GNSS-R对湿度的高值部分反演精度较好,但在低湿度或快速变化条件下存在一定偏差。GNSS-R技术可能在湿度较低部分(如6月和7月)对湿度的反演能力有限,导致数据偏离相对较大。并且因为夏季的高温和降雨可能导致土壤湿度的快速变化,致使反演结果偏差相对较大。此外,SMAP数据空间分辨率为 $36 \text{ km}$ ,而GNSS-R数据反映局部结果,二者在空间尺度上的差异可能引起系统偏差。

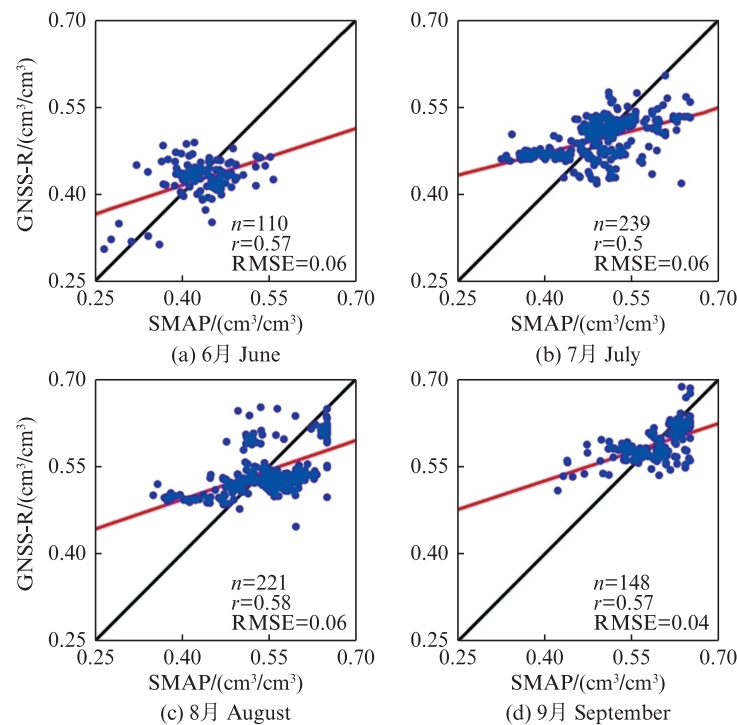


图7 2015—2023年6—9月SMAP与GNSS-R结果散点图

Fig. 7 Scatter plot of SMAP and GNSS-R results from June to September, 2015–2023

图8为2015—2023年6—9月ARM土壤湿度与GNSS-R反演的土壤湿度散点图。6月数据点

数量相对较少( $n=135$ ),分布在较低湿度范围( $0.1\sim 0.3 \text{ g/g}$ ),数据点偏离1:1理想线较多,回归



线的斜率较小,说明 GNSS-R 数据在低湿度条件下与 ARM 数据的一致性较差。7 月数据点最多 ( $n=242$ ),相关性略有提升 ( $r=0.38$ ),但仍较低,数据分布集中在中等湿度范围(约  $0.3 \text{ g/g}$ ),GNSS-R 数据与 ARM 数据的 RMSE ( $0.01$ ) 明显减少。8 月数据点数量较多 ( $n=221$ ),与 7 月类似,相关性保持较低水平 ( $r=0.38$ ),但 RMSE 维持在低值 ( $0.01 \text{ g/g}$ ),数据分布在湿度范围相对狭窄(约  $0.3\sim 0.4 \text{ g/g}$ ),拟合线接近水平,表明 GNSS-R 数据在高湿度条件下的一致性不明显。9 月数据点分布相对集中 ( $n=186$ ),但相关性略低于 7 月和 8 月 ( $r=0.37$ ),GNSS-R 数据的湿度范围较窄(约  $0.3 \text{ g/g}$ ),与 ARM 数据 RMSE ( $0.01$ ) 较小,表明

GNSS-R 反演结果较为稳定,但未能捕捉更大的湿度范围。

GNSS-R 与 ARM 土壤湿度数据在 6—9 月的相关性较低 ( $0.32\sim 0.38$ ),但从 7 月到 9 月的 RMSE ( $0.01$ ) 较小,表明反演结果在特定湿度范围内的稳定性。6 月的测量误差最大,数据一致性误差可能受到低湿度条件和噪声的影响。同时 ARM 湿度传感器在 2018 年 8 月至 2020 年 8 月期间经常超出电压范围,对于反演结果会有较大影响。而对于年际分析,在 2019 年受此影响相对大一些,在 2018 和 2020 年中由于还有许多其他数据点,影响相对较小。

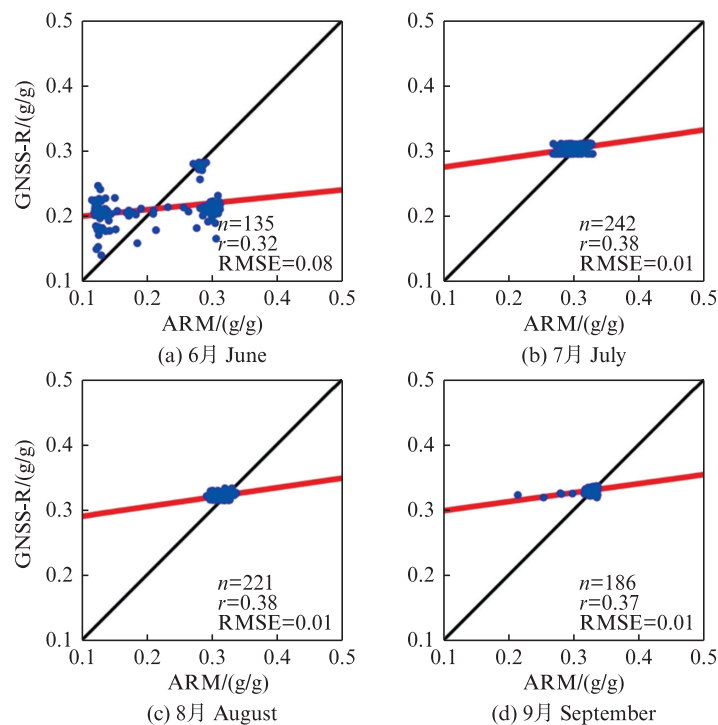


图8 2015—2023年6—9月ARM与GNSS-R结果散点图

Fig. 8 Scatter plot of ARM and GNSS-R results from June to September, 2015–2023

### 2.3 2015—2023年土壤湿度的演变趋势特征与分析

图9为GNSS-R反演结果和SMAP土壤湿度在2015—2023年巴罗站夏季的时间序列趋势对比,反映了两者在长期监测中的一致性和差异。GNSS-R和SMAP数据在整个时间段表现出显著的一致性,尤其在土壤湿度中高值区间 ( $0.4\sim 0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) 内,两者重叠度较高。数据有明显的波动,在夏季中通常9月达到峰值,可能与阿拉斯加夏季降雨量增加有关。2017、2018

和2021年的GNSS-R与SMAP数据几乎完全重合,表明GNSS-R对该时间段内土壤湿度的反映较准确,数据点分布紧密,波动范围与SMAP数据保持一致。而2019和2020年,GNSS-R数据在高湿度区间略低于SMAP数据,可能是GNSS-R信号在湿度高值时的反演能力受到限制。

数据集中在  $0.4\sim 0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,表明该站点在夏季的土壤通常较湿润。极端湿度条件(小于  $0.3$  或大于  $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) 出现频率较低,但GNSS-



R 在这些情况下的分布略有离散。土壤湿度低值 (小于  $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), GNSS-R 与 SMAP 数据之间的差异略大, 可能是由于该范围内土壤较干燥, GNSS-R 对信号反射的敏感性降低。土壤湿度中高值 ( $0.4 \sim 0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), GNSS-R 与 SMAP 数据重

叠性最高, 反映了 GNSS-R 反演结果在常见湿润范围内的可靠性。土壤湿度高值 (大于  $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ), 高湿度情况下 GNSS-R 略低于 SMAP 数据, 可能是由于表层水分过多影响信号多路径效应, 从而降低反演精度。

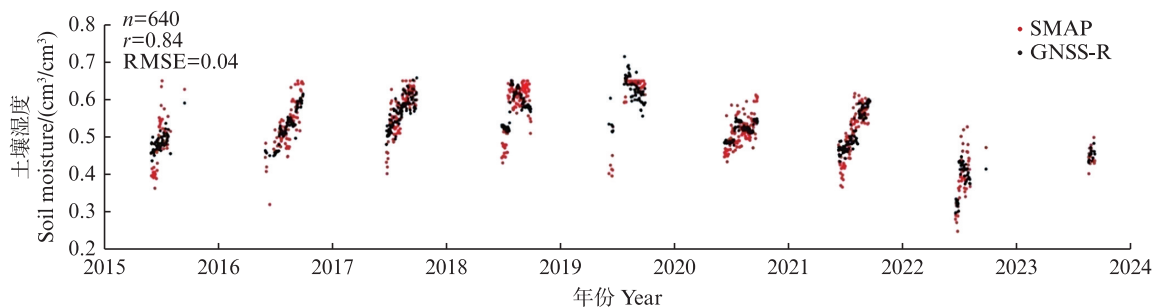


图9 2015—2023年SMAP与GNSS-R趋势变化图

Fig. 9 Trend variation of SMAP and GNSS-R from 2015 to 2023

图10为GNSS-R反演结果和ARM土壤湿度在2015—2023年巴罗站夏季的时间序列趋势对比。GNSS-R和ARM数据在时间序列上的波动具有一定的同步性, 表现为湿度值在6—9月呈现上升趋势。2016、2020、2021年GNSS-R与ARM数据的波动趋势几乎一致, 数据点重叠率高, 说明GNSS-R在这些年份的湿度反演精度较高, 而2018和2019年GNSS-R数据在湿度较高时 (接近  $0.35 \text{ g/g}$ ) 偏低, 可能受土壤特性或局地环境条件影响。

土壤湿度主要集中在  $0.20 \sim 0.35 \text{ g/g}$ , 表明夏季土壤通常处于中等湿润水平。而两种数据在该范围内重叠性较高, 说明GNSS-R能较好反映该站点土壤湿度的主要变化趋势。土壤湿度低

值 (小于  $0.2 \text{ g/g}$ ), GNSS-R 数据较 ARM 数据更离散, 可能受湿度较低时反射信号强度减弱的影响。土壤湿度中值 ( $0.25 \sim 0.35 \text{ g/g}$ ), GNSS-R 和 ARM 数据的重叠性最高, 显示了两种数据在主湿度范围内的一致性, 并且波动响应同步性较好。土壤湿度高值 (大于  $0.35 \text{ g/g}$ ), GNSS-R 数据略低于 ARM 数据, 可能是由于降雨或表层积水影响了 GNSS-R 对土壤湿度的准确反演。

从以上分析可以得到, 在土壤湿度极端情况 (SMAP 小于  $0.3$  或大于  $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , ARM 小于  $0.20$  或大于  $0.35 \text{ g/g}$ ) 下, GNSS-R 技术反演土壤湿度误差偏大, 可以考虑在以后研究中引入雪水当量、降雨等因素对土壤湿度的影响, 形成更全面的土壤湿度反演方法。

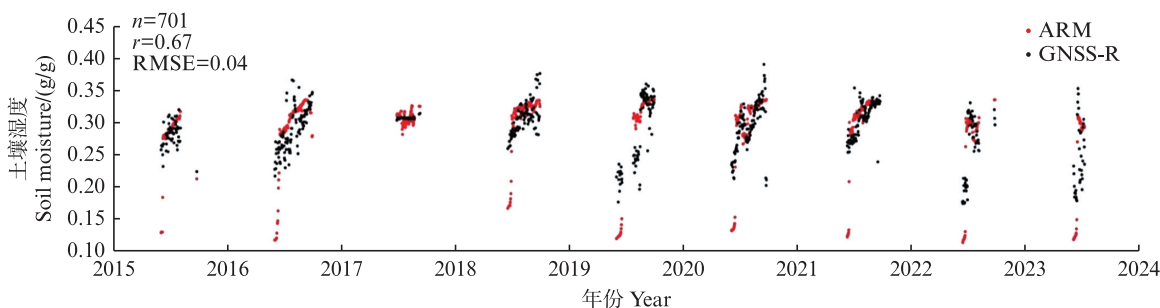


图10 2015—2023年ARM与GNSS-R趋势变化图

Fig. 10 Trend variation of ARM and GNSS-R from 2015 to 2023

### 3 结论

在北极临岸地区开展长时间、高精度的土壤湿度监测对北极气候变化、水文循环解析等方面

具有重要意义, 不仅能为相关数值模拟与预测提供基础数据, 还能为模型优化与决策支持提供科学依据。本研究基于GNSS-R技术反演了阿拉斯加地区巴罗站2015—2023年夏季的土壤湿度,

以 SMAP 与 ARM 探测的土壤湿度作为参考值,对 GNSS-R 技术在该地区的反演结果进行了精度分析,分析了此站点在不同时间尺度上的土壤湿度变化特征,评估了 GNSS-R 技术在阿拉斯加地区反演土壤湿度的可靠性。主要结论:

(1) 基于 2015—2023 年夏季的年际分析,GNSS-R 数据与 SMAP 和 ARM 土壤湿度数据在长期趋势上具有较高的一致性,相关系数为 0.54~0.81,且均方根误差较小(SMAP 为 0.02~0.60,ARM 为 0.01~0.06),证实了地基 GNSS-R 技术在北极临岸地区土壤湿度监测的可靠性。

(2) 分析阿拉斯加巴罗站 2015—2023 年 6—9 月的月际变化与变化趋势可以发现,GNSS-R 数据能够捕捉土壤湿度随月份显著上升这一趋势,这可能与夏季降雨增加导致土壤湿度增加有关。GNSS-R 数据在中高土壤湿度范围内与 SMAP 和 ARM 数据具有良好的一致性,且在捕捉长期趋势上表现出色,进一步证实了其在北极土壤湿度监测中的可靠性。

然而值得说明的是,地基 GNSS-R 技术在北极土壤湿度极端条件下的反演精度尚需进一步优化,下一步的工作可以考虑引入雪水当量、降雨等因素对土壤湿度的影响,形成更全面的土壤湿度反演方法。

作者声明本文无利益冲突。

#### 参考文献:

- [1] SCREEN J A, SIMMONDS I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 2010, 464 (7293): 1334-1337.
- [2] 韩笑笑, 孟宪红, 赵林, 等. “北极放大”现象驱动因素及其影响的研究进展综述[J]. *高原气象*, 2023, 42 (1): 1-12.  
HAN X X, MENG X H, ZHAO L, et al. A review of the research progress on the drivers of the “Arctic amplification” phenomenon and its influence[J]. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(1): 1-12.
- [3] CHEN J L, KANG S C, MENG X H, et al. Assessments of the Arctic amplification and the changes in the Arctic sea surface [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(4): 193-202.
- [4] 蔡子怡, 游庆龙, 陈德亮, 等. 北极快速增暖背景下冰冻圈变化及其影响研究综述[J]. *冰川冻土*, 2021, 43 (3): 902-916.
- CAI Z Y, YOU Q L, CHEN D L, et al. Review of changes and impacts of the cryosphere under the background of rapid Arctic warming [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 902-916.
- [5] COMISO J C, HALL D K. Climate trends in the Arctic as observed from space [J]. *WIREs: Climate Change*, 2014, 5(3): 389-409.
- [6] RODENHIZER H, NATALI S M, MAURITZ M, et al. Abrupt permafrost thaw drives spatially heterogeneous soil moisture and carbon dioxide fluxes in upland tundra [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(22): 6286-6302.
- [7] CAI Z Y, YOU Q L, SCREEN J A, et al. Lessened projections of Arctic warming and wetting after correcting for model errors in global warming and sea ice cover [J]. *Science Advances*, 2025, 11(10): eadr6413.
- [8] SCHARN R, LITTLE C J, BACON C D, et al. Decreased soil moisture due to warming drives phylogenetic diversity and community transitions in the tundra [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16 (6): 064031.
- [9] AALTO J, LE ROUX P C, LUOTO M. Vegetation mediates soil temperature and moisture in arctic-alpine environments [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, 45(4): 429-439.
- [10] DENG Y H, WANG S J, BAI X Y, et al. Variation trend of global soil moisture and its cause analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105939.
- [11] ROBINSON D A, CAMPBELL C S, HOPMANS J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 358-389.
- [12] ENTEKHABI D, NJOKU E G, O'NEILL P E, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [13] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, et al. Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean Salinity (SMOS) mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [14] 周昕, 张双成, 张勤, 等. GNSS-IR 解译地表环境参数研究进展及展望[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(3): 12-23.  
ZHOU X, ZHANG S C, ZHANG Q, et al. Research progress and prospects of GNSS-IR interpretation of surface environmental parameters [J]. *GNSS World of China*, 2023, 48(3): 12-23.
- [15] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry [J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [16] 郭秀梅, 逢海港, 孙波. 辐射计辅助的地基 GNSS-R 土壤湿度反演方法研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学*

- 版), 2024, 55(3): 396-405.
- GUO X M, PANG H G, SUN B. A novel research for radiometer assisted ground-based GNSS-R soil moisture inversion [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 55(3): 396-405.
- [17] 阿苦建英. 基于GNSS-R技术的雪深探测方法应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- A K J Y. Research application of snow depth detection method based on GNSS-R technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [18] 刘原华, 冯琳芳, 牛新亮. GNSS-R海面风场数据处理技术探讨[J]. *导航定位学报*, 2020, 8(3): 76-80.
- LIU Y H, FENG L F, NIU X L. Discussion on GNSS-R sea surface wind field data processing technology [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(3): 76-80.
- [19] 贺匀峤. 高精度GNSS-R海面测高基带信号处理研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- HE Y Q. Research on baseband signal processing of high-precision GNSS-R sea surface height measurement [D]. Ji'nan: Shandong University, 2022.
- [20] LARSON K M, SMALL E E, GUTMANN E D, et al. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24405.
- [21] LARSON K M, LÖFGREN J S, HAAS R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1301-1310.
- [22] CHEW C C, SMALL E E, LARSON K M, et al. Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: development of a retrieval algorithm for soil moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 537-543.
- [23] 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.
- ZHANG S C, GUO Q Y, MA Z M, 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.
- [24] 荆丽丽, 杨磊, 汉牟田, 等. GNSS-IR双频数据融合的土壤湿度反演方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(6): 1248-1255.
- JING L L, YANG L, HAN M T, et al. Soil moisture inversion method based on GNSS-IR dual frequency data fusion [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(6): 1248-1255.
- [25] CHEN K, CAO X Y, SHEN F, et al. An improved method of soil moisture retrieval using multi-frequency SNR data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3725.
- [26] 孙波, 梁勇, 汉牟田, 等. 基于GPS多星三频数据融合的GNSS-IR土壤湿度反演方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(6): 1089-1096.
- SUN B, LIANG Y, HAN M T, et al. A method for GNSS-IR soil moisture inversion based on GPS multi-satellite and triple-frequency data fusion [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(6): 1089-1096.
- [27] 魏浩翰, 张强, 沈飞. 基于熵值法轨迹聚类多特征参数融合的GNSS-IR土壤湿度反演方法[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, (2024-02-28). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230419>.
- WEI H H, ZHANG Q, SHEN F. GNSS-IR soil moisture estimation based on track clustering and multi characteristic parameter fusion using entropy method [J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, (2024-02-28). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230419>.
- [28] 张杰, 刘小芳, 姚蕊. 基于小波变换和DNN算法的GNSS-IR土壤湿度反演[J]. *无线电工程*, 2024, 54(4): 954-961.
- ZHANG J, LIU X F, YAO R. GNSS-IR soil moisture retrieval based on wavelet transform and Deep Neural Network [J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(4): 954-961.
- [29] 何佳星, 郑南山, 丁锐, 等. 粒子群优化卷积神经网络GNSS-IR土壤湿度反演方法[J]. *测绘学报*, 2023, 52(8): 1286-1297.
- HE J X, ZHENG N S, DING R, et al. A GNSS-IR soil moisture inversion method based on the convolutional neural network optimized by particle swarm optimization [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(8): 1286-1297.
- [30] COLLIANDER A, JACKSON T J, BINDLISH R, et al. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 215-231.
- [31] CHAN S K, BINDLISH R, O'NEILL P E, et al. Assessment of the SMAP passive soil moisture product [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4994-5007.
- [32] 杨冯莲. 顾及植被水含量的星载GNSS-R土壤水分反演模型方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- YANG F L. Spaceborne GNSS-R soil moisture retrieval model considering vegetation water content [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [33] 施亚杰. 基于神经网络的星载GNSS-R土壤湿度反演方法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- SHI Y J. Research on soil moisture inversion method on spaceborne GNSS-R based on neural network [D].

- Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
- [34] 王恒宇. 基于L波段GNSS-R测量土壤水分变化的关键技术研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.

WANG H Y. Research on key technologies for measuring soil moisture changes based on L-band GNSS-R [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

## Research on soil moisture inversion in Arctic coastal areas in summer based on ground-based GNSS-R: A case study of Barrow Station in Alaska

KONG Degang, CHANG Liang

(College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to verify the reliability of GNSS-R technology in soil moisture monitoring in the Arctic coastal areas, the experiment used GNSS-R technology to carry out soil moisture inversion research at Barrow Station in Alaska in summer, and took the soil moisture in the ARM program and SMAP of the US Department of Energy as reference values, respectively, to analyze the variation characteristics of soil moisture at Barrow Station from 2015 to 2023. The results show that the GNSS-R data from 2015 to 2023 have good consistency with the SMAP and ARM soil moisture data in the long-term trend, and the correlation between the interannual results is 0.54–0.76 and 0.54–0.81, respectively, and the root mean square errors are 0.02–0.06 and 0.01–0.06, respectively. From June to September in 2015 to 2023, the soil moisture inverted by GNSS-R is most consistent with the SMAP and ARM observations in the medium-to-high humidity range ( $0.4\text{--}0.6\text{ cm}^3/\text{cm}^3$  for SMAP and  $0.20\text{--}0.35\text{ g/g}$  for ARM). Under low and high humidity conditions, although the GNSS-R inversion results can still capture the rising trend of soil moisture, there is a certain deviation from SMAP and ARM, which may be related to the increase in summer rainfall. This study confirms the reliability of GNSS-R technology in inverting soil moisture along the Arctic coast.

**Key words:** GNSS-R; soil moisture; Alaska; multipath effect