全球定位系统
GNSS World of China
• 中国科学引文数据库（CSCD）
• 中文科技期刊数据库
• 中国核心期刊（遴选）数据库
• 日本科学技术振兴机构数据库（JST）
• 中国学术期刊（网络版）（CNKI）
• 中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）
• 中国超星期刊域出版平台

CORS站用于地表环境参数综合监测研究

冯智杰，张双成，周　昕，陈雄川

CORS stations for integrated monitoring of surface environmental parameters

FENG Zhijie, ZHANG Shuangcheng, ZHOU Xin, and CHEN Xiongchuan

引用本文:
冯智杰, 张双成, 周昕, 等. CORS站用于地表环境参数综合监测研究[J]. 全球定位系统, 2023, 48(5): 125-135. DOI: 10.12265/j.gnss.2023150
FENG Zhijie, ZHANG Shuangcheng, ZHOU Xin, et al. CORS stations for integrated monitoring of surface environmental parameters[J]. Gnss World of China, 2023, 48(5): 125-135. DOI: 10.12265/j.gnss.2023150

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.gnss.2023150

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于BDS及InSAR的龙羊峡水电站库区地表形变研究

Study on surface deformation of Longyangxia hydropower station reservoir area based on BDS and InSAR

全球定位系统. 2021, 46(6): 25-29

基于重庆CORS的水汽电离层实时监测方法研究及平台构建

Research on real-time monitoring method of water vapor ionosphere and platform construction based on Chongqing CORS

全球定位系统. 2019, 44(4): 89-95

青岛地区CORS反演水汽中大气加权平均温度模型的建立

Research of Local Model of Weighted Mean Temperature of CORS Water Vapor Retrieval in Qingdao

全球定位系统. 2018, 43(3): 88-94

基于CORS基准站的地质灾害监测技术研究

Research on geological disaster monitoring technology based on CORS station

全球定位系统. 2019, 44(3): 95-98

基于超快速星历进行实时反演大气水汽总量的可行性研究

Study on Feasibility of Real time Retrieval of Precipitable Water Vapor Based on Ultra-rapid Ephemeris

全球定位系统. 2018, 43(1): 54-59

基于BDS精密星历产品的水汽探测性能分析

Performance analysis of water vapor detection based on BeiDou precise ephemeris products

全球定位系统. 2019, 44(5): 91-99

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2023150

CORS 站用于地表环境参数综合监测研究

冯智杰[1,2], 张双成[1,2,3], 周昕[1,3], 陈雄川[1]

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 西安 710054; 3. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

摘 要: 卫星导航定位连续运行参考站 (continuously operating reference stations, CORS) 系统作为 GNSS 与网络通信技术结合发展出的新兴导航定位 CORS 系统, 具有快速高效、高精度、网络化等优点, 不仅可以测量地表位置及运动, 还可以借助 GNSS 信号的折射与反射特征监测地表环境参数变化情况. 本文提出一种将 CORS 站用于“积雪深度、土壤湿度、大气水汽、地表形变”的地表环境多参数综合监测体系, 用以拓展 CORS 站在生态环境中的广泛应用. 以齐齐哈尔市 CORS 站 BFQE 为实验案例, 首先获取实验时段中 CORS 站接收的 GNSS 观测数据 (含信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 数据)、星历数据及气象数据对其进行预处理; 其次对重采样的 SNR 数据采用非线性最小二乘及 Lomb-Scargle 谱分析方法解译特定时间段的浅层土壤湿度及地表积雪深度; 然后通过联测远距离国际地球动力学服务机构站 (International GPS Service for Geodynamics, IGS) 采用相对定位技术获取测站的地表形变序列与大气水汽序列; 最后, 结合上述多种地表环境参数结果进行相关性分析, 获得参数间的响应关系. 实验结果表明: CORS 站用于地表环境综合监测能够有效地监测多参数时间变化, 反演得到的环境参数之间具有一定的响应关系. 大气水汽含量会影响降雨的时空分布和强度, 大气水汽反演值与降雨在趋势上呈现高度相关; 在积雪时段, 大气水汽的增加伴随着积雪深度的增加; 大气水汽增加形成的降雨是土壤湿度的主要来源, 解译土壤湿度总是在强降雨后呈现上升趋势, 基于单星的土壤湿度与实测数据平均相关性为 0.75, 多星融合解译结果的相关性达到 0.89, 土壤含水率的均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 为 0.87%; 地表形变时间序列在北 (north, N)、东 (east, E) 方向形变较为稳定, 天顶 (up, U) 方向的形变与大气水汽、积雪深度和土壤湿度存在一定的响应性波动.

关键词: CORS 站; 全球导航卫星系统干涉反射测量 (GNSS-IR); 土壤湿度; 积雪深度; 大气水汽; 地表形变

中图分类号: P228.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2023)05-0125-11

0 引 言

GNSS 基准站网及其相关数据处理系统能够为研究人员提供迅速、可靠、有效的信息服务, 广泛地满足基础测绘、环境监测、灾害预警、气象预报等信息需求. 从 20 世纪 90 年代初期开始, 包括我国在内的世界上多个国家、地区及相关国际组织相继建立了高精度 GPS 连续观测网络[1-2]. 随着网络技术与通信技术的不断发展, GNSS 技术与其结合发展出具有网络实时差分定位 (real time kinematic, RTK) 功能的卫星导航定位连续运行参考站 (continuously operating reference stations, CORS) 系统, 其凭借快速高效、高精度、高可靠性、网络化、自动化和智能化等优点, 给包括测绘行业在内的多个领域带来巨大影响.

CORS 站作为一种地面 GPS 接收机, 可提供对地球表面位置和运动的精确和连续测量. Rwabudandi 等[3] 利用 2015—2018 年印尼地理空间信息局提供的 10 个 CORS 站数据对东爪哇北部地区的地壳形变

收稿日期: 2023-07-18

资助项目: 国家自然科学基金 (42074041); 国家重点研发计划项目 (2019YFC1509802); 信息工程国家重点实验室基金 (SKLGIE2022-ZZ2-07); 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站开放课题 (2022-04)

通信作者: 张双成 E-mail: shuangcheng369@chd.edu.cn

进行分析, 结果表明 CORS 站数据能够较好地解译出站点在地球表面位置的水平移动以及竖直方向上的沉降运动. Ciećko 等 [4] 利用 3 个相互间隔适当的 CORS 站作为流动站估计 GPS 位置, 并利用卡尔曼滤波处理数据, 验证了基于 CORS 站的测试区域可有效获得 GPS 位置. 徐创富等 [5] 结合台州 15 个 CORS 站 2017—2019 年的时间序列, 利用频谱分析及小波变换分析 CORS 站周期特征, 得到其在垂直方向相较于水平方向变化明显很多, 且更具有周期特征. 李婉秋等 [6] 提出一种多通道奇异谱分析 (multi-channel singular spectrum analysis, MASS) 方法, 该方法能有效提取 CORS 站网大地高时序形变信息, 其利用 38 个 CORS 站进行时序形变信息提取, 92% 的测站时序形变序列有不同程度的改善. 廖超明等 [7] 开展沿海区域 CORS 站稳定性实验, 借助于 GAMIT/GLOBK 进行稳定性分析, 得到 CORS 站对于解译站点形变时间序列具有较好的稳定性. 以上实验均在一定程度上验证了 CORS 站数据用于解译站点形变序列的稳定性和准确性.

然而, CORS 站分布在一个广泛开阔的区域, 拥有一个可用于跟踪环境参数变化的参考点网络, 其不仅能够测量地表位置和运动的变化, 还可通过将 CORS 数据与遥感数据相结合, 综合监测地球表面环境参数变化情况. CORS 站所接收的卫星反射信号中存在信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 数据, 而 SNR 数据可解译出土壤湿度及积雪深度等地表环境参数. 2008 年, Larson 等 [8] 首次提出了基于大地测量型 GNSS 接收机的 SNR 数据估计土壤湿度算法, 其将直射信号与反射信号分离后发现反射信号振幅波动与土壤湿度变化存在良好一致性, 验证了利用卫星 SNR 数据解译土壤湿度的可行性. Chew 等 [9] 分别研究了卫星 SNR 数据的相位偏移量及振幅对土壤湿度变化敏感性, 实验得到相位是裸露土壤条件下反映土壤湿度变化的最佳参数. Ran 等 [10] 提出一种圆弧编辑方法, 只保留为余弦波形的 DSNR 数据, 验证了其能够提高在起伏地面的土壤湿度解译精度. Li 等 [11] 利用 Lomb-Scargle 频谱分析等多种方法对 PBO 网站中的 CORS 站进行雪深反演实验, 其结果表明: 利用 SNR 数据解译得到的积雪深度与实际测量值的相关性达到 0.9 以上, 能够很好地反演积雪深度的趋势信息. Hu 等 [12] 利用相同的 CORS 站进行实验, 并提出一种具有自适应高通滤波器特性的变分模态分解算法, 实验结果与原位积雪深度高度吻合. An 等 [13] 提出了一种改进的利用 GNSS 观测数据估算积雪深度的方法, 其在 LS 谱分析前加入小波分解算法, 能够有效分离噪声功率, 提高了积雪深度变化剧烈时的反演精度. 卫星信号穿过对流层时, 会受到大气的影响出现路径弯曲和速度衰减, 从而使观测值中含有一定的大气延迟 [14], 这些延迟均会被 CORS 站接收并保存于数据中, 为大气水汽探测技术提供了重要的数据支撑. 施闯等 [15] 对中国 – 中南半岛地区地的测站数据进行水汽反演, 研究了该地区大气水汽平均含量、年周期振幅和半年周期振幅等气候特征. 刘梦杰等 [16] 提出一种台站处分布式北斗/GNSS 实时水汽解算模式, 并在中国三个典型区域的测站进行实验, 其结果与实时水汽产品对比相关性达到 0.95. 上述实验均已验证利用 CORS 站监测地表环境参数提供了一种高效的数据收集方式, 将 CORS 数据与全球导航卫星系统干涉反射测量 (GNSS interferometric reflectometry, GNSS-IR) 技术相结合, 研究人员可以更全面地监测地表环境参数变化.

为进一步推进 CORS 站用于地表环境参数监测, 本文提出一种集“积雪深度、土壤湿度、大气水汽及地表形变”的地表环境多参数综合监测体系, 加强 CORS 站在地表环境监测方面功能. 文章基于齐齐哈尔 CORS 站 BFQE 进行实验验证, 采用 GNSS-IR 技术及 GNSS-PWV(precipitable water vapor, PWV) 技术, 对 CORS 站的接收数据进行地表环境参数解译监测, 获得特定时间的土壤含水率、积雪深度以及全年的大气水汽解译结果, 最后在讨论章节利用 GAMIT 基线解算获得其地表形变解译结果, 并在各解译参数结果中结合降雨数据分析其与降雨量之间的响应关系, 充分发挥 CORS 站在地表环境综合监测方面的作用.

1 基本方法

1.1 综合监测思路

CORS 站所接收的 GNSS 卫星反射信号能够反应反射面的物理特征的变化, 而在实际环境中, 空气中的水汽含量 [17], 土壤中的水分含量 [18], 地表的积雪深度 [19] 以及细微形变 [20], 均会造成 GNSS 卫星信号的改变. 本文利用 GNSS 卫星信号可监测反射面物理参数变化的特点, 提出了一种多参数的地表环境综合监测体系, 包括土壤湿度、积雪深度和大气水汽多个地表环境参数, 如图 1 所示. 首先, 利用云服务器远程获取 CORS 站所接收的 GNSS 观测数据, 包括观测文件、广播星历、精密星历, 其次对 GNSS 观测数据进行综合处理分析, 对重采样的 SNR 数据采用非线性最小二乘及 Lomb-Scargle 谱分析等 GNSS-IR 技术

解译特定时间段的浅层土壤湿度及地表积雪深度, 然后通过联测远距离 IGS 站采用 GNSS-PWV 技术获取测站大气水汽时间序列. 最后, 利用降雨数据进一步对解译的地表环境参数结果进行相关性分析, 获得各参数之间的响应关系, 为 CORS 站用于地表环境参数监测方面提供案例支撑.

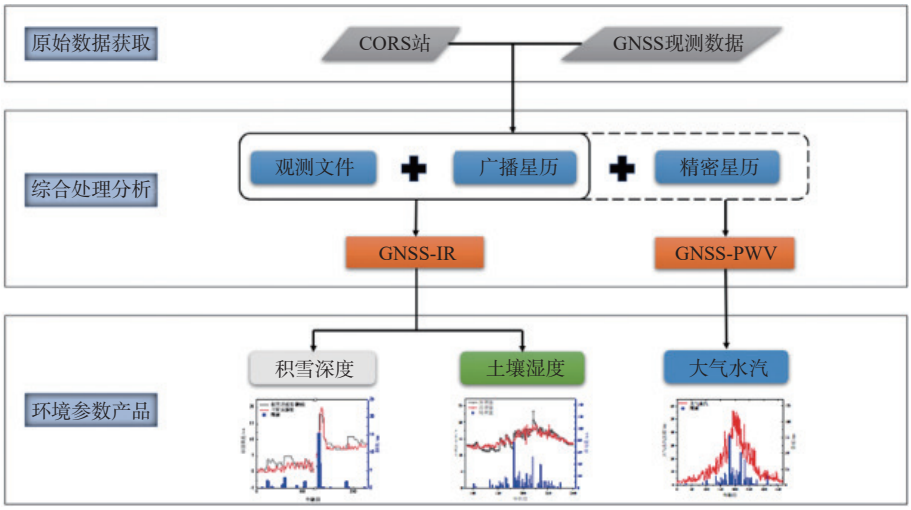


图 1　地表环境参数综合监测

1.2　GNSS-IR 解译积雪深度原理

GNSS-IR 技术利用卫星信号在 GNSS 接收机天线处叠加产生的干涉现象来提取地表反射面的物理特征. 与传统的卫星遥感手段比较, 其无需单独制造特定的发射机, 大大降低了成本, 且拥有及其丰富的免费导航卫星信号源, 利用 L 波段进行观测, 受大雾和雨雪等气候影响较小, 对地表参数的变化十分敏感. 对于在典型的 GPS 应用中, 反射信号的多路径效应被认为是误差的来源, 而在 2009 年, Larson 发现 SNR 数据与积雪深度具有相关性并利用实验证明其可用于解译积雪深度[21]. SNR 是衡量 GNSS 信号强度的量化指标, 其主要受接收机天线增益、接收机噪声和多路径效应等因素影响, 多路径效应影响尤为显著. 因此, 可通过分析 SNR 中的干涉信号来获取地表环境参数, 这极大的节约了监测成本, 实现了“一机多用”的成效[22]. 图 2 为利用 GNSS-IR 解译积雪深度及土壤湿度示意图.

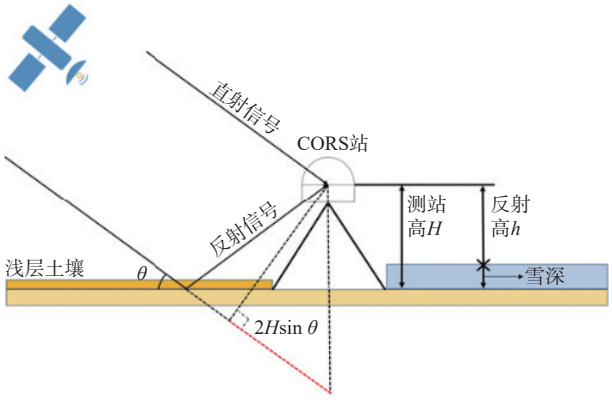


图 2　GNSS-IR 解译积雪深度及土壤湿度示意图

图 2 中 H 为接收机天线相位中心到反射面的高度, θ 为卫星高度角, 红色虚线直反射信号间的路径差为 $2H\sin\theta$, 接收机天线所接收到的信号是由直射信号的反射叠加产生的干涉信号, 假设平面仅发生一次镜面反射的简化模型, SNR 可表示为[23]

$$\mathrm{SNR}^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2A_dA_m\cos\psi \tag{1}$$

式中: A_d 和 A_m 分别为直射信号和反射信号的振幅; ψ 为直反射信号之间的相位差.

利用低阶多项式拟合 SNR 得到卫星信号的直接分量, 减去直接分量后的 SNR 即为反射分量, 可表示为

$$\mathrm{SNR}_m = A_m\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin\theta + \varphi\right) \tag{2}$$

式中: SNR_m 为反射分量; λ 为卫星信号载波波长; φ 为反射分量相位. 反射分量是以卫星高度角的正弦值为自变量的拟余弦函数. 对其利用 Lomb-Scargle 谱分析方法可获得峰值频率, 结合频率和波长关系式可得反射高

$$h = \frac{\lambda\cdot f}{2} \tag{3}$$

式中: h 为反射高; f 为利用 Lomb-Scargle 谱分析方法获得的峰值频率.

将接收机高度天线高度 H 和反射高 h 带入 GNSS-IR 积雪深度测量的几何模型中即可得到积雪深度结果 Δh

$$\Delta h = H - h \tag{4}$$

1.3 GNSS-IR 解译土壤湿度原理

利用 GNSS-IR 解译土壤湿度原理为：浅层土壤湿度的变化会引起土壤中介电常数发生改变，从而导致 GNSS 卫星反射信号的 SNR 数据产生波动，该波动可被接收机记录储存并加以利用；对低高度角的 SNR 数据进行分解、分析处理即可解译得到土壤湿度结果.

式 (2) 中 SNR_m 为反射信号 SNR 数据，θ 为卫星高度角，两者均为观测数据，对其利用非线性最小二乘即可求解得到相位观测量 φ，而相位是土壤湿度的最佳指示器，可用一个简单的线性函数来解译土壤湿度

$$\mathrm{SMC}_t = S \cdot \varphi + \mathrm{SMC}_{\mathrm{resid}} \tag{5}$$

式中：SMC_t 为卫星解译的土壤湿度值；S 为相位 φ 与实测土壤湿度之间斜率；$\mathrm{SMC}_{\mathrm{resid}}$ 为相位 φ 与实测土壤湿度之间截距.

在进行 GNSS-IR 解译土壤湿度时，需要确定 GNSS 卫星的反射区域面积，即 GNSS 反射遥感的空间分辨率. 根据慧根斯—菲涅尔原理，镜面反射产生的反射区域被称为菲涅尔反射区，其大小可以看作 GNSS 反射遥感的有效探测区域[24]，菲涅尔反射区域是一系列椭圆，椭圆的长半轴 a 和短半轴 b 分别为[25]：

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \sin E}}{(\sin E)^2}, \quad b = \frac{\sqrt{\lambda h \sin E}}{\sin E} \tag{6}$$

1.4 GNSS-PWV 解译大气水汽原理

图 3 为 GNSS-PWV 技术解译大气水汽示意图，其原理是通过联测远距离 IGS 测站利用精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 解算 GNSS 观测数据，可得到由对流层静力学延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD) 和对流层湿延迟 (zenith wet delay, ZWD) 组成的高精度对流层天顶总延迟 (zenith total delay, ZTD)[26].

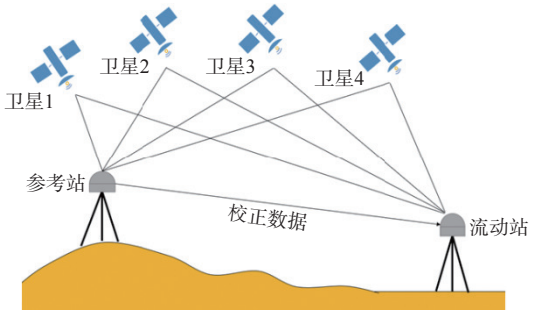


图 3 GNSS-PWV 解译大气水汽示意图

其中，ZHD 可根据 Saastamonien 模型计算，公式为

$$\begin{cases} \mathrm{ZHD} = 0.00227868 \times \dfrac{P_c}{f(\varphi_c, H_c)} \\ f(\varphi_c, H_c) = 1 - 0.00266\cos(2\varphi_c) - 0.0028 H_c \end{cases} \tag{7}$$

式中，P_c、φ_c、H_c 分别为测站气压、纬度、海拔.

利用 ZTD 与 ZHD 相减可得到 ZWD

$$\mathrm{ZWD} = \mathrm{ZTD} - \mathrm{ZHD} \tag{8}$$

而 PWV 与 ZWD 存在线性关系，公式为

$$\begin{cases} \mathrm{PWV} = K \times \mathrm{ZWD} \\ K = \dfrac{10^5}{R_v\left(\dfrac{k_3}{T_m + k_2'}\right)} \end{cases} \tag{9}$$

式中：K 为大气水汽转换系数；R_v 为水汽的比气体常数；T_m 为加权平均温度；k_3 与 k_2' 均为大气折射率实验常数.

2 算例分析

2.1 研究区概况

齐齐哈尔市的 BFQE 测站地处 47.376 269°N, 123.923 742°E, 海拔约为 148 m. 如图 4 所示，实验区域位于一处农田，所处位置地势平坦，四周无高大建筑阻挡，GNSS 反射信号接收较为良好；四周仅有少数低矮农作物，GNSS 信号受植被影响较少.

图 4 BFQE 测站环境图

黑龙江省齐齐哈尔市春季干旱多风，夏季炎热多雨，秋季短暂，冬季干冷漫长. 本文收集了 2019—2021 年 BFQE 测站附近的气象数据，结果如图 5 所示. 齐齐哈尔市冬季温度低且时间较长，低于 0°的天数约占全年天数的 1/3. 低温为积雪提供了优质的储存环境，积雪深度在短时间内较为稳定，给 GNSS 雪深测量创造了良好条件. 同时夏季的齐齐哈尔市降雨充足，相对湿度较高，受降雨影响，土壤水分含量变化较为明显，适合于 GNSS 土壤湿度变化的探测.

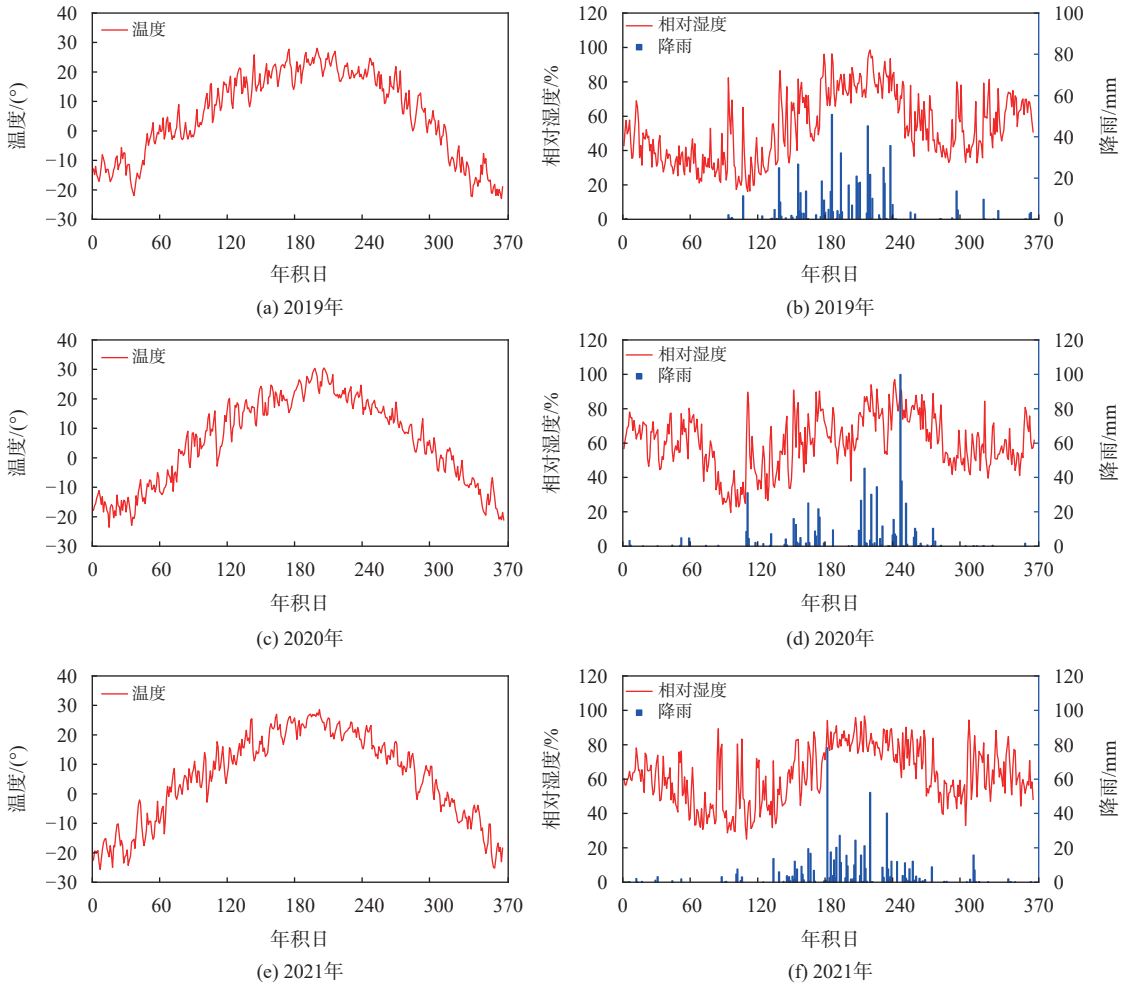


图 5　2019-2021 年气象序列图

2.2　GNSS-IR 解译积雪深度

根据历史数据显示, 2021 年年积日第 1—61 天和第 310—365 天均存在积雪情况, 这段时期可作为监测积雪深度的时间段; 而第 89—300 天, 测站地面则没有观测到积雪现象, 这一时间段可用于监测土壤湿度的变化.

图 6 展示了卫星反演雪深与实际雪深的对比图及相关性分析图. 在验证 2021 年存在积雪的日期时, 使用 10°~25°及 10°~30°的低高度角数据进行反演. 结果表明, 这两组数据的相关性均为显著, 分别达到 0.91 和 0.88, RMSE 分别为 2.06 cm 和 2.11 cm. 无论是 10°~25°还是 10°~30°的结果, 在雪深的变化趋势上均与实际雪深相似, 特别是在第 312—313 天雪深急剧上升的阶段, 反演数据都能很好地反映出其上身

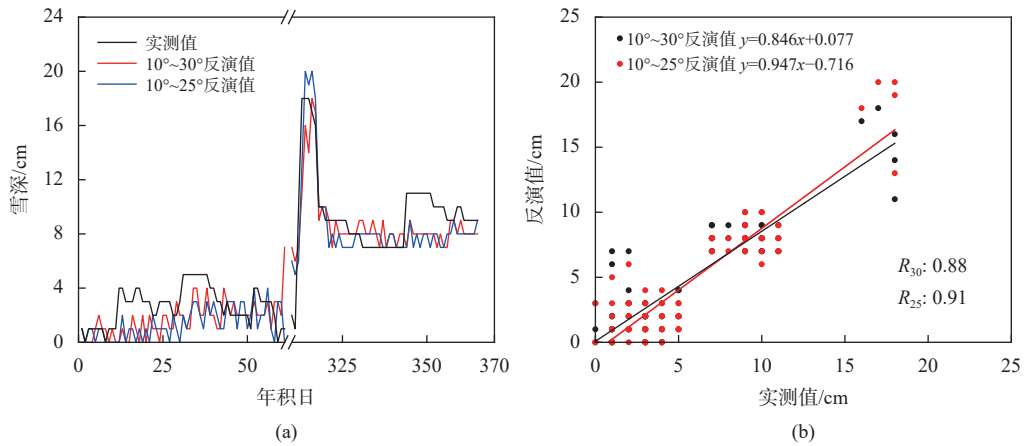


图 6　2021 年雪深反演

趋势. 然而, 也需要指出, 在一些天数上, 反演数据与实际雪深存在一定差异. 例如在第 344—355 天, 实际雪深约为 10 cm, 而两组数据的反演雪深都偏低, 约为 8 cm.

冬季的降雨量会部分转换为积雪, 从而增加积雪深度. 图 7 显示了利用 10°~25°卫星数据反演得到的积雪深度与实测值的对比图, 蓝色柱状图代表降雨量. 在第 1—61 天以及第 310—365 天中, 共出现 5 次明显的降雨事件, 对应时间的积雪深度均呈现上涨趋势. 卫星反演结果与实际积雪深度在降雨后几乎同步上涨. 在第 312 天及 313 天, 分别出现了 15.7 mm 和 7.1 mm 的降雨, 卫星反演的积雪深度与实际积雪深度同时达到峰值, 分别为 20 cm 和 18 cm.

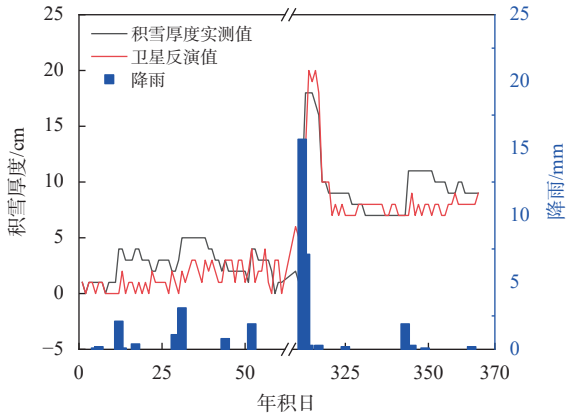


图 7 2021 年积雪与降雨关系图

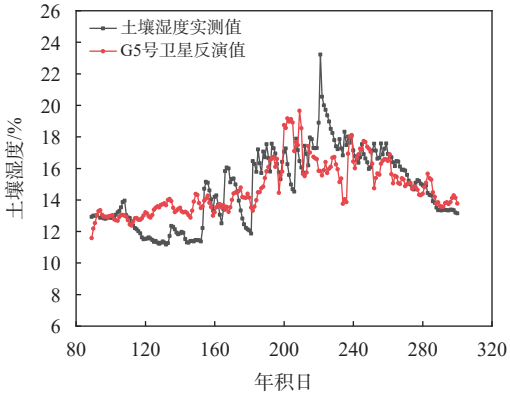
综上所述, 利用 GNSS-IR 技术解译得到的积雪深度结果虽然在数值上与实测积雪深度存在细微差别, 但整体趋势上与实际情况相符. 同时, 该技术能够很好地反应降雨后的积雪深度变化, 并与降雨存在较好的响应关系.

2.3 GNSS-IR 解译土壤湿度

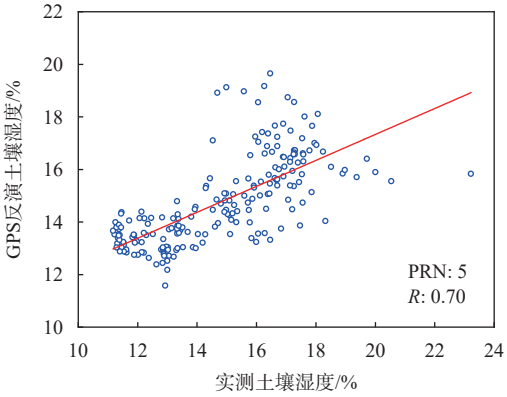
利用 GNSS-IR 解译土壤湿度前, 必须首先确定实验区域的第一菲涅尔反射区, 即此次实验中 GNSS-IR 解译土壤湿度的有效区域. 图 8 展示了利用 CORS 站 BFQE 数据绘制的不同低高度角 (5°~30°) 下各卫星的第一菲涅耳反射区. 该图结合谷歌地图绘制而成, 图中标签位置为 CORS 站 BFQE 所在位置, 不同颜色的椭圆代表了不同的卫星.

图 8 BFQE 测站菲涅耳反射区

图 9 展示了利用 4 颗 GPS 卫星进行土壤湿度反演的结果及相关性分析. 卫星反演得到的土壤湿度结果与实际测量的土壤含水率在整体趋势上呈现较好的一致性, 随着实测土壤含水率的增加和减少, 相关系数均达到显著水平, 分别为 0.70、0.74、0.71、0.81. 然而, 在特定时期, 卫星反演的土壤湿度结果与实测值存在一定差异, 甚至出现相反的趋势. 例如, 在第 119—130 天期间, 展示的卫星反演结果与实际测量值对比均存在一定的误差; 在第 206 天, 实际测量值下降至极小值点, 而 5、6 号卫星反演结果的趋势与其相反, 呈现极大值点, 但 10、31 号卫星反演结果与实际测量值相似. 因此, 基于单颗卫星的反演结果时常会受到环境因素或其他因素的影响而出现一定的误差, 不能完全详细反演土壤湿度的细微变化.



(a)



(b)

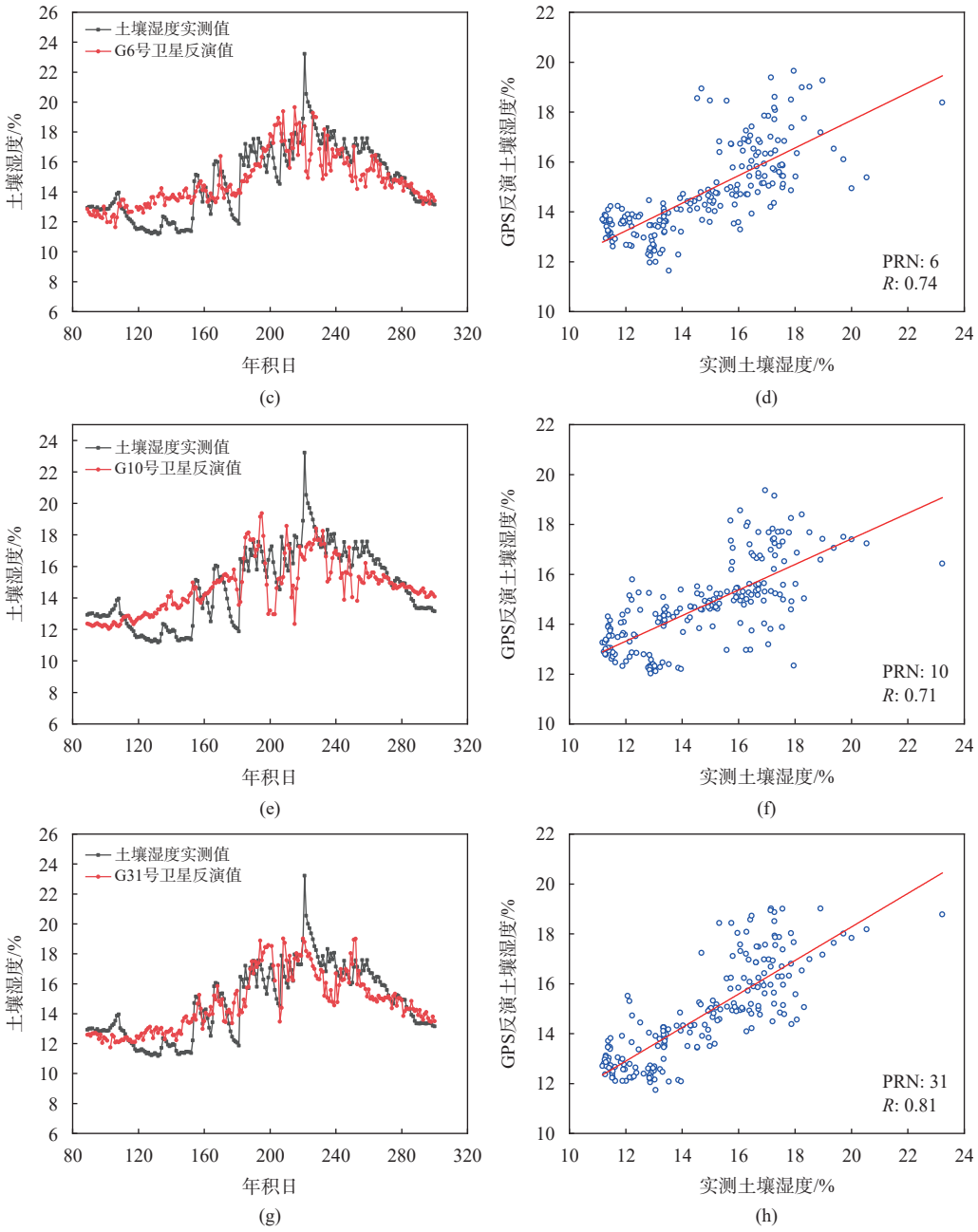


图 9　2021 年土壤湿度反演

利用 GNSS-IR 技术解译得到的土壤湿度反映了 CORS 站周围浅层土壤的湿度情况, 这些数据距离地表仅有 5~15 cm 的深度, 因此受降雨过程中雨水入渗的影响较大, 土壤湿度含量与降雨之间存在着密切的关联. 为探讨之间的存在的响应关系, 依据相关系数将多颗卫星反演土壤湿度数据进行加权融合处理得到的结果与降雨数据结合得到图 10. 可以发现土壤湿度数据随着降雨的出现而产生增长的趋势, 其中, 第 182 天出现了 78.2 mm 的大幅度降雨, 土壤湿度从前一天的 11.87% 增长至 16.46%, 而卫星反演数据虽存在一定的延迟现象, 但同样出现增长情况, 从 13.51% 增长至顶峰的 17.82%. 到第 220 天, 降雨量达到 52.2 mm, 实测土壤湿度数据到达峰值 23.22%, 而卫星反演数据的峰值 19.26% 延迟到第 226 天出现. 多星融合反演结果相比于单星反演结果在土壤湿度的趋势上更加拟合实测值, 相关性也更高, 达到 0.89. 与单星反演的平均相关性相比, 多星融合反演的相关性提高了 18.7%.

综合来看, GNSS-IR 技术具备解译 CORS 站周围浅层土壤湿度的能力. 该技术解译得到的土壤湿度结果与实测土壤湿度的趋势相一致, 并且在反应降雨对土壤湿度的影响关系方面表现较为出色.

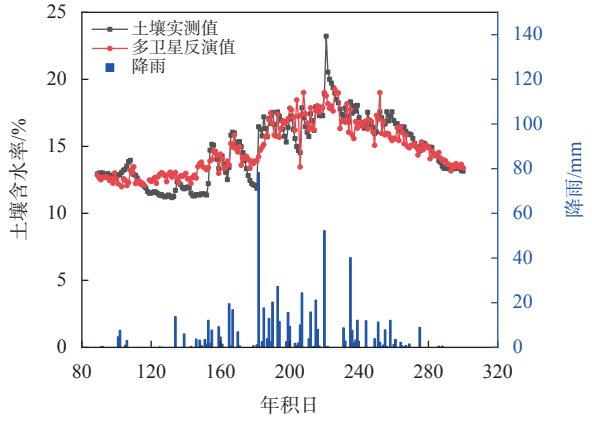


图 10 2021 年土壤湿度与降雨关系图

2.4 GNSS-PWV 解译大气水汽

图 11 展示了结合降雨数据绘制的大气水汽含量图, 其中 2021 年 BFQE 测站的大气水汽呈现倒 V 字趋势. 在夏季时段, 大气水汽含量丰富, 数值保持较高水平, 在第 196 天达到峰值 55.63 mm. 而在春冬季节, 大气水汽含量开始降低, 保持在小于 20 mm 的低水平, 第 289 天降至最低值 3.53 mm.

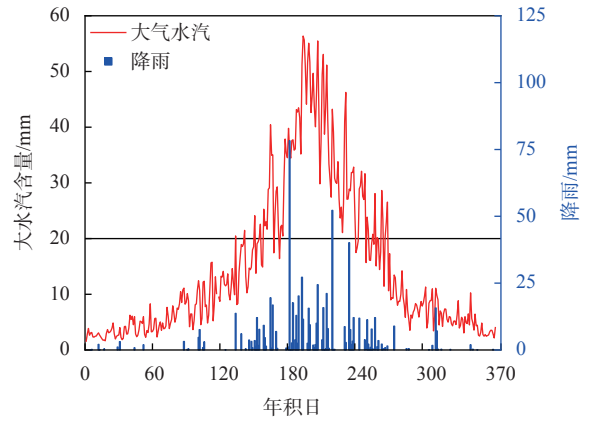


图 11 2021 年大气水汽反演

降雨是指大气中冷凝的水汽下降到地球表面的天气现象, 大气中水汽的含量直接影响降雨量. 由图 11 可知, 降雨出现前, 大气水汽含量呈上升趋势, 而降雨后则出现骤减现象. 例如, 在第 165、181、220 及 235 天, 大气水汽持续积累, 导致降雨现象的出现. 其中, 第 220 天大气水汽从前一天的 27.44 mm 增长至 43.21 mm, 增长率达到 57%, 同日出现 52.2 mm 的降雨, 降雨后又迅速减至 29.89 mm.

据此可见, 利用 CORS 站接收的 GNSS 数据解译的大气水汽结果与实际情况相符, 并且能较好地反应大气水汽与降雨之间存在的响应关系.

3 讨 论

为进一步完善 CORS 站综合监测能力, 文章将 CORS 站测量地表位置变化的基本用途进行实验并与降雨数据结合分析获得结果. 图 12 为利用 GAMIT 基线解算获得的 BFQE 测站 2021 年在北 (north, N)、东 (east, E)、天顶 (up, U) 方向上的形变数据以及形变速率图. 由图 12(a) 可知, CORS 站 BFQE 形变量在 2021 年全年时间内较为稳定, N、E、U 方向全年累计形变量分别为−12 mm、9 mm、7 mm. 其中, N 方向和 E 方向在全年形变波动较小, 基本均在±0.01 m 内, 而 U 方向形变波动相比于 N, E 方向较大, 在±0.02 m 内波动, 且在夏季波动尤为明显. 为进一步分析其波动时段, 文章计算了测站 U 方向的形变速率, 得到形变速率图, 图中红色曲线为拟合得到的形变速率趋势项, 可以看出在年积日第 131—275 天, 形变速率呈显为上凸的趋势, 明显大于其余时段.

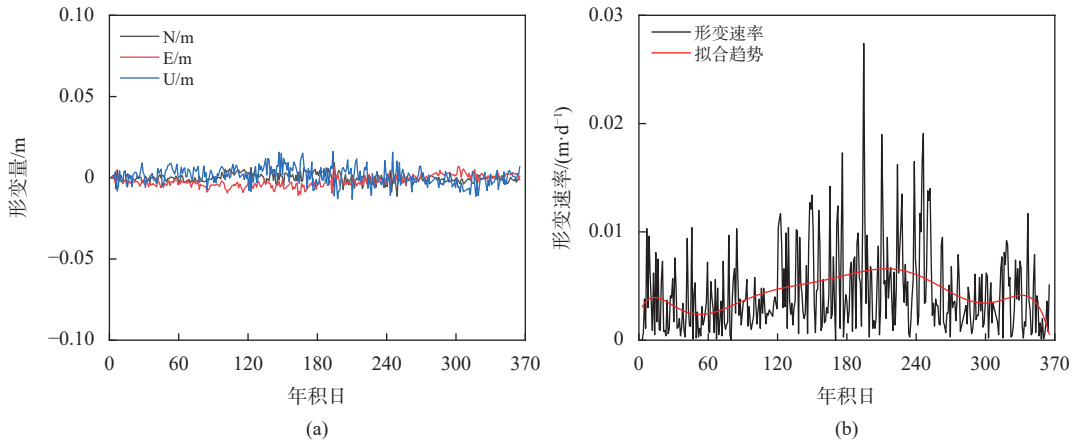


图 12 2021 年测站形变反演

雨水入渗过程会直接导致土壤含水率的变化, 从而影响土地土质的强度变化, 直接导致了地表稳定性的变化. 因此, 地表形变与降雨过程中的降雨量关系密切. 图 13 为结合降雨数据绘制的 CORS 站 BFQE 在 U 方向上的形变速率图. 在第 172 天及 220 天, 降雨量分别达到峰值 78.2 mm 及次峰值 52.2 mm, 形变速率趋势在次峰值降雨的后一天达到顶点.

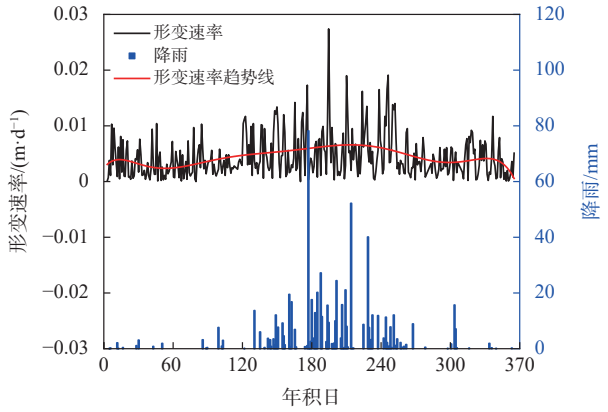


图 13　形变速率与降雨关系图

文章统计了形变速率位于前 15% 的天数分布, 均在降雨丰富的第 131—275 天, 同时值得注意的是在第 107—133 天时间段, 无降雨情况, 地表形变速率表现为 0.03 m/d, 远低于降雨时段. 由此可得出降雨是影响测站周围形变量改变的一个重要因素.

4　结束语

CORS 站作为一种地面 GPS 接收机, 能够快速接收卫星数据, 本文将 CORS 站接收数据与 GNSS 技术的有效解译能力相结合, 用于地表环境参数的解译. 通过利用 GNSS-IR 技术解译得到的土壤湿度和积雪深度, 与实测值的相关系数均表现出强相关性, 分别达到 0.89 和 0.90, 并且在降雨天气出现时呈现上升趋势. 利用 GNSS-PWV 技术解译得到的大气水汽含量的趋势与实际情况相符, 始终在降雨之前开始积累, 在降雨后开始下降, 并且与降雨之间存在良好的响应关系. 此外, 地表形变在 U 方向上跟随降雨量及土壤湿度的变化而出现波动.

综上所述, 将 CORS 站用于地表环境参数综合监测, 既能有效解译各参数值, 获得其变化趋势, 同时能较好地反应各参数之间的响应关系. 这种综合分析的方法为研究人员提供了一种便捷而有效的途径, 有助于更全面地理解地表环境参数之间的关联, 进一步推进相关领域的研究工作.

参考文献

[1] STRANGE W E, NEIL W. The establishment of a GPS continuously operating reference station system as a framework for the National Spatial Reference System [C]// Proceedings of the 1995 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION) , 1995: 19-24.

[2] 赵毅, 吴晓莉, 姜英明, 等. 大规模 GNSS 基准站网坐标解算方法研究 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2022, 14(6): 694-700.

[3] RWABUDANDI I, ANJASMARA I M, SUSILO. Crustal deformation studies in the northern part of east java derived from GPS CORS data between 2015 and 2018[J]. IOP conference series:earth and environmental science, 2019, 389(1): 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/389/1/012055

[4] CIEĆKO A, BAKUŁA M, GRUNWALD G, et al. Examination of multi-receiver GPS/EGNOS positioning with Kalman filtering and validation based on CORS Stations[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2732. DOI: 10.3390/s20092732

[5] 徐创富, 王恒, 吉渊明, 等. 基于台州及周边地区 CORS 站网地表形变时空特征分析 [J]. 全球定位系统, 2020, 45(5): 27-33.

[6] 李婉秋, 王伟, 郭秋英, 等. 多通道奇异谱分析提取的 CORS 站大地高形变信息 [J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 1-5,17.

[7] 廖超明, 凌聪聪, 吕新强, 等. 广西北部湾沿海区域 CORS 站稳定性监测分析 [J]. 南宁师范大学学报 (自然科学版), 2022, 39(3): 53-58.

[8] 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): 24405. DOI: 10.1029/2008GL036013

[9] 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. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2242332

[10] RAN Q H, ZHANG B, YAO Y B, et al. Editing arcs to improve the capacity of GNSS-IR for soil moisture retrieval in undulating terrains[J]. GPS solutions, 2022, 26(1): 19. DOI: 10.1007/s10291-021-01206-y

[11] LI Z, CHEN P, ZHENG N Q, et al. Accuracy analysis of GNSS-IR snow depth inversion algorithms[J]. Advances in space research, 2021, 67(4): 1317-1332. DOI: 10.1016/j.asr.2020.11.021

[12] HU Y, YUAN X T, LIU W, et al. GNSS-R Snow depth inversion based on variational mode decomposition with

multi-GNSS constellations[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2022(60): 1-12. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3182987

[13] AN J C, DENG P, ZHANG B J, et al. Snow depth variations in svalbard derived from GNSS interferometric reflectometry[J]. Remote sensing, 2020, 12(20): 3352. DOI: 10.3390/rs12203352

[14] 张克非, 李浩博, 王晓明, 等. 地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1172-1191.

[15] 施闯, 张卫星, 曹云昌, 等. 基于北斗/GNSS 的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析 [J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1112-1119.

[16] 刘梦杰, 涂满红, 王洪, 等. 台站处北斗/GNSS 实时大气水汽反演及试验分析 [J]. 测绘科学, 2022, 47(11): 25-31.

[17] 张唐旭, 吴昊, 张迪. 动态环境下 PPP 的 GNSS 大气水汽反演 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2021, 13(2): 181-186.

[18] LV J, ZHANG R, TU J, et al. A GNSS-IR method for retrieving soil moisture content from integrated multi-satellite data that accounts for the impact of vegetation moisture content[J]. Remote sensing, 2021, 13(13): 2442. DOI: 10.3390/rs13132442

[19] 肖星星, 许盼盼, 韩雨辰, 等. 地基 GNSS-R 雪深测量方法研究进展 [J]. 测绘标准化, 2022, 38(2): 13-22.

[20] 钟储汉, 李新瑞, 张双成, 等. GAMIT/TrackRT 用于滑坡实时 GNSS 监测研究 [J]. 测绘科学, 2022, 47(12): 57-65.

[21] LARSON K M, GUTMANN E D, ZAVOROTNY V U, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers?[J]. Geophysical research letters, 2009, 36(17): L17502. DOI: 10.1029/2009GL039430

[22] ZHOU X, ZHANG S C, ZHANG Q, et al. Research of deformation and soil moisture in loess landslide simultaneous retrieved with ground-based GNSS[J]. Remote sensing, 2022, 14(22): 5687. DOI: 10.3390/rs14225687

[23] BILICH A, LARSON K M. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR)[J]. Radio science, 2007, 42(6): 1-16. DOI: 10.1029/2007RS003652

[24] KATZBERG S J, TORRES O, GRANT M S et al. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: results from SMEX02[J]. Remote sensing of environment, 2006, 100(1): 17-28. DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.015

[25] KATZBERG S J, GARRISON J L. Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean[J]. NASA technical memorandum 4750, 1996: 1-16.

[26] 高颖, 许思怡, 李黎等. 利用 GPT3 模型的 GNSS-PWV 计算方法 [J]. 测绘通报, 2023, 552(3): 44-48, 103.

作者简介

冯智杰 (1999—), 男, 硕士, 研究方向为 GNSS-IR 解译地表环境参数.

张双成 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为 GNSS 与 InSAR 灾害监测.

周昕 (1998—), 男, 博士, 研究方向为 GNSS-IR 解译土壤湿度研究.

CORS stations for integrated monitoring of surface environmental parameters

FENG Zhijie[1,2], ZHANG Shuangcheng[1,2,3], ZHOU Xin[1,3], CHEN Xiongchuan[1]

(1. *College of Geological Engineering and Mapping*, *Chang'an University*, *Xi'an*, 710054; 2. *Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence*, *Ministry of Natural Resources*, *Xi'an*, 710054; 3. *State Key Laboratory of Geographic Information Engineering*, *Xi'an*, 710054)

Abstract: Continuously operating reference stations (CORS), as an emerging navigation and positioning continuously operating reference station system developed by combining Global Navigation Satellite System (GNSS) and network communication technology, has the advantages of fast, efficient, high-precision, networked and so on. It can not only measure the position and movement of the ground surface, but also monitor the changes of environmental parameters on the ground surface with the help of refractive and reflective features of GNSS signals. In this paper, we propose a multi-parameter integrated monitoring system of surface environment by using CORS station for "snow depth, soil moisture, atmospheric water vapor, and surface deformation", which is used to expand the wide application of CORS station in ecological environment. Taking Qiqihar CORS station BFQE as an experimental case, firstly, the GNSS observation

data (including SNR data), ephemeris data and meteorological data received by the CORS station during the experimental period are obtained and pre-processed; secondly, the non-linear least squares and Lomb-Scargle spectral analysis methods are applied to the re-sampled SNR data to decipher the shallow soil humidity and surface snow depth in the specific period. Then, the surface deformation sequence and atmospheric water vapor sequence of the station were obtained by the International GPS service for Geodynamics (IGS) using the relative positioning technique; finally, the correlation analysis was carried out by combining the results of the above surface environmental parameters to obtain the response relationship between the parameters. The experimental results show that the CORS station used for integrated monitoring of the surface environment can effectively monitor the temporal changes of multiple parameters, and the environmental parameters obtained from the inversion have a certain response relationship with each other. The atmospheric water vapor content affects the spatial and temporal distribution and intensity of rainfall, and the atmospheric water vapor inversion values are highly correlated with rainfall in trend. During the snowy period, the increase in atmospheric water vapor is accompanied by an increase in snow depth during snow accumulation periods. Rainfall formed by the increase of atmospheric water vapor is the main source of soil moisture, and the interpreted soil moisture always shows an increasing trend after heavy rainfall. The average correlation between soil moisture and measured data based on single stars is 0.75, and the correlation of the results of multi-satellite fusion interpretation reaches 0.89, and the root-mean-square error of soil moisture content is 0.87%. The surface deformation time series is stable in the north (N) and east (E) directions, and the deformation in the up (U) direction has some responsive fluctuations with atmospheric water vapor, snow depth and soil moisture.

Keywords: CORS station; GNSS interferometric reflectometry; soil moisture; snow depth; precipitable water vapor; land surface deformation

(上接第 116 页)

Progress and Enlightenment of US PNT Information Source Construction

CHEN Hanlong, GONG Liang, LI Rui, ZHENG Xiaoxue
(*Beijing Satellite Navigation Center*, *Beijing* 100094, *China*)

Abstract: The relevant policies and overall goals in the field of USA positioning, navigation and timing (PNT) are combed through. The construction progress, service capabilities and fusion applications of important PNT information sources, such as GPS modernization, GPS and LEO communication satellite fusion, e-Loran system construction and autonomous navigation projects, are analyzed and summarized in detail. It indicates that the United States has clarified the development context of PNT system, and the related construction has entered the substantive stage. At the same time, this paper puts forward specific suggestions for the future development, integration and construction of PNT information sources in China.

Keywords: positioning, navigation and timing (PNT) system; PNT information source; BeiDou Navigation Satellite System (BDS); data integration