https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.050



基于星载GNSS-R获取川藏交通廊道沿线地表土壤湿度

胡羽丰^{1,2,3}, 汪 吉^{1,2}, 李振洪^{1,2,3*}, 彭建兵^{1,3}

1. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054

2. 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西西安 710054

3. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西西安 710054

摘 要:地表土壤湿度影响着陆一气能量交换和水循环,是泥石流、冻土冻融等灾害的重要因子,获取川藏交通廊道沿线地区 土壤湿度有助于研究铁路沿线气候变化和冰冻圈灾害风险.基于 CYGNSS(cyclone global navigation satellite system)星载 GNSS-R(global navigation satellite system reflectometry)信号,结合土地覆盖分类、归一化差分植被指数 NDVI(normalized differential vegetation index)和粗糙度等地表土壤湿度影响因子,利用人工神经网络方法建立了地表土壤湿度多参数反演模 型,生成了 2018—2019年连续两年的川藏交通廊道沿线地区 36 km 空间分辨率的地表土壤湿度日产品.经土壤水分主被动探 测卫星数据检验,生成的地表土壤湿度相关系数 R 为 0.8,均方根误差 RMSE(root mean square error)为 0.032 cm³/cm³,偏 差 Bias 为 0.014 cm³/cm³,可为川藏交通廊道沿线气候变化和地表灾害研究提供高连续性和可靠性的数据. 关键词:地表土壤湿度;川藏交通廊道;CYGNSS;GNSS-R;人工神经网络;遥感. 中图分类号: U212.2;P228 文章编号: 1000-2383(2022)06-2058-11 收稿日期:2021-12-11

Land Surface Soil Moisture along Sichuan-Tibet Traffic Corridor Retrieved by Spaceborne Global Navigation Satellite System Reflectometry

Hu Yufeng^{1,2,3}, Wang Ji^{1,2}, Li Zhenhong^{1,2,3*}, Peng Jianbing^{1,3}

1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: Land surface soil moisture affects the land-air energy exchange and the water cycle, which is an important factor for geohazards such as debris flow and freeze-thaw of permafrost. Obtaining soil moisture along the Sichuan-Tibet traffic corridor corridor contributes to study climate change and the risk of cryospheric hazards along the railway. In this study, CYGNSS(cyclone global navigation satellite system) GNSS-R(global navigation satellite system reflectometry) signals, combined with land cover, normalized differential vegetation index (NDVI), land surface roughness, and other surface soil moisture influencing factors, are taken as input parameters to the artificial neural network method to establish a multi-parameter inversion model of surface soil moisture. Then it generates a daily product of surface soil moisture with a spatial resolution of 36 km in the area along the Sichuan-

引用格式:胡羽丰,汪吉,李振洪,彭建兵,2022.基于星载GNSS-R获取川藏交通廊道沿线地表土壤湿度.地球科学,47(6):2058-2068.

Citation: Hu Yufeng, Wang Ji, Li Zhenhong, Peng Jianbing, 2022. Land Surface Soil Moisture along Sichuan-Tibet Traffic Corridor Retrieved by Spaceborne Global Navigation Satellite System Reflectometry. *Earth Science*, 47(6):2058–2068.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41941019,41904020);国家重点研发计划项目(No.2020YFC1512000);陕西省科技创新团队项目(No. 2021TD51);陕西省自然科学基础研究计划项目(No.2020JQ-350);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(Nos.300102261404, 300102260301,300102261108).

作者简介:胡羽丰(1989-),男,讲师,从事GNSS环境遥感研究.ORCID: 0000-0001-9097-9010. E-mail: yfhu@chd.edu.cn

^{*} 通讯作者:李振洪,教授,从事卫星大地测量与遥感技术及应用研究.ORCID: 0000-0002-8054-7449. E-mail: Zhenhong. Li@chd. edu. cn

Tibet railway for two consecutive years from 2018 to 2019. With soil moisture active and passive (SMAP) soil moisture as references, the correlation coefficient *R* of the soil moisture is 0.8, the root mean square error (RMSE) is $0.032 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, and the Bias is $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. The soil moisture products could provide continuous and reliable data for the study of climate change and land surface hazards along the Sichuan-Tibet traffic corridor.

Key words: surface soil moisture; Sichuan-Tibet traffic corridor; CYGNSS; GNSS-R; artificial neural network; remote sensing.

0 引言

川藏交通廊道作为国家重大工程,建设和运营 安全至关重要.川藏交通廊道穿越横断山区和青藏 高原地区,独特的地形使其成为气候变化的敏感区 域(Yang et al., 2013; Zeng et al., 2015; 范科科等, 2019;李佳瑞等, 2020),冰川、冰湖、冻土、积雪等构 成的冰冻圈层的气候反馈尤为明显,导致冰川跃 动、冰湖溃决、冻土冻融、融雪洪水等灾害隐患不 断,使得川藏交通廊道面临巨大的灾害风险(柴波 等, 2020; 彭建兵等, 2020).地表土壤湿度(soil moisture, SM)是陆一气交换的重要参量,在地表能量和 水分平衡等过程中具有重要作用,影响着气候系统 及冰冻圈的变化(陈瑞等, 2020).因此,获取川藏交 通廊道沿线地区大范围地表土壤湿度信息对于研 究川藏沿线气候变化和冰冻圈灾害风险具有重要 的意义.

在土壤湿度监测方法中,传统的烘干法、时域 反射仪法等基于点观测的方法耗时耗力,很难应用 到较大区域,尤其在川藏交通廊道沿线地区,受限 于艰险恶劣的环境,土壤湿度地面观测站点稀少, 数据极其匮乏(Chen et al., 2017; Dente et al., 2012). 随着空间探测技术的发展,卫星微波遥感已经成为 了大范围地表土壤湿度监测的主要技术手段 (Kerr et al., 2001; Jackson et al., 2010). 微波遥感具 有全天候监测能力,不受云、雨和大气的影响,对于 地表土壤水分的变化十分敏感,能够反演获取大范 围长时序的地表土壤湿度(刘强等,2013; Chan et al., 2016). 目前提供全球遥感土壤湿度数据的有高 级 微 波 散 射 计 (the advanced scatterometer, AS-CAT)、土壤水分与海洋盐分卫星(soil moisture and ocean salinity, SMOS)、土壤水分主被动探测卫星 (soil moisture active and passive, SMAP)、高级微波 扫描辐射计(the advanced microwave scanning radiometer for the Earth observing system, AMSR-E), 高级微波扫描辐射计2(the advanced microwave scanning radiometer 2, AMSR2)、风云三号气象卫星

(Fengyun-3B, FY-3B)等.众多学者针对青藏高原 地区卫星遥感土壤湿度数据产品的适用性开展了 研究.Su et al. (2011)利用 Tibet-Obs 观测网 3个不 同气候区的实测数据对AMSR-E、ASCAT和 SMOS的土壤湿度产品进行了评估,结果表明在半 干旱高寒地区 AMSR-E 和 ASCAT 土壤湿度偏大 0.2~0.3 cm³/cm³.Chen et al. (2013)发现AMSR-E 在土壤非冻结期效果较差,存在明显的低估和高 估现象.Zeng et al.(2015)检验结果表明青藏高原 地区 SMOS 的数据质量较差, ASCAT 和 AMSR-E/2的土壤湿度明显偏小.Chen et al.(2017)研究表 明SMAP相比于SMOS和AMSR2更能反映土壤 湿度随时间的真实变化.Zheng et al. (2018)发现在 青藏高原地区 SMAP 土壤湿度算法高估了植被覆 盖度同时低估了地表粗糙度的影响.Liu et al. (2019)发现相比于 SMOS、FY-3B 和 AMSR-E, SMAP的误差最小.陈泓羽等(2020)利用实测地表 土壤湿度数据评估了SMAP、AMSR2、FY-3B土壤 湿度的适用性,发现3种产品的精度均存在季节性 波动,同样证实了SMAP的相对精度最高.荆琛琳 (2020)比较验证了青藏高原那曲地区的SMAP、再 分析资料 CCI 和陆面模型 CLDAS 的土壤湿度产 品,发现SMAP土壤湿度产品更能反映土壤湿度变 化,误差稳定性更好.已有的检验研究表明了 SMAP是目前青藏高原土壤湿度遥感监测精度最 好的数据产品.

SMAP受限于卫星回访周期,地表土壤湿度产品的时间分辨率为2~3d.近年来,星载GNSS-R (global navigation satellite system reflectometry)作 为一种新兴的地表参数遥感方法展现了高时间分 辨率土壤湿度监测的潜力.星载GNSS-R主要利用 低轨卫星接收的地表GNSS反射信号来反演地表 物理特征,无需主动发射微波信号,GNSS反射信号 丰富,且具有L波段信号的全天候监测能力.2014 年发射的TDS-1是首颗搭载GNSS-R载荷的卫星 (Foti et al., 2015),利用其接收的反射信号;Camps et al.(2016)和Chew et al.(2016)研究了反射信号对

于土壤湿度变化的敏感性.2016年NASA (national aeronautics and space administration)的 CYGNSS 星 座成功发射运行,其回访周期中值仅为3h(Ruf et al., 2016),为GNSS-R土壤湿度研究提供了数量 庞大的数据.Chew and Small (2018, 2020a)认为可 以使用简单的线性模型来表示 CYGNSS 地表反射 率与地表土壤湿度之间的关系,并基于该线性模型 发布了CYGNSS官方L3土壤湿度产品,但该产品 与SMAP SM 的相关系数仅为0.4.Carreno-Luengo et al. (2019) 发现地表覆盖类型对于 CYGNSS 土壤 湿度反演存在较大影响.Clarizia et al. (2019)在 CYGNSS地表反射率与地表土壤湿度的线性模型 中引入植被和地表粗糙度因子以改善反演效果.Al-Khaldi et al.(2022)利用 CYGNSS 反射信号的非相 干散射成分建立时序反演模型估计土壤湿度变 化.相比于SMAP, CYGNSS可以提供更高时间分 辨(1d)的土壤湿度监测结果.需要指出的是,目前 已有的CYGNSS土壤湿度反演方法均只适用于海 拔600m以下的地区,对于海拔600m以上的地区, 复杂的地表环境耦合关系导致算法失效(Chew and Small, 2018), 因此无法应用于平均海拔超过3000 m的川藏交通廊道沿线地区.

针对川藏交通廊道沿线地区土壤湿度遥感监测,本文首先利用CYGNSS星载GNSS-R信号生成地表反射率,然后结合地表覆盖类型、地表粗糙度、植被因子、高程等辅助参数,利用人工神经网络方法构建非线性多参数土壤湿度反演模型,克服了已有CYGNSS算法的高程限制,生成川藏交通廊道2018年至2019年36 km空间分辨率的土壤湿度日产品,最后采用SMAP土壤湿度和实测土壤湿度对结果进行了检验.

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

川藏交通廊道东起四川省成都市,西至西藏自 治区拉萨市,全长1543 km,穿越青藏高原东南主 体,横跨青藏高原东缘板块碰撞和构造活跃的地形 急变带(图1b),沿线气候变化极为敏感,滑坡、泥石 流、冰崩、冻土等水土灾害极为发育(彭建兵等, 2020).川藏交通廊道沿线从成康段(成都一康定)的 中亚热带湿润气候到康林段(康定一林芝)的高原 温带季风半湿润气候,最后到拉林段(拉萨一林芝) 半干旱季风气候,气候垂直分带明显,植被也从落 叶阔叶林、针叶林过渡到高原草甸和灌丛(杨彩云等,2021).从四川盆地跨越横断山区到青藏高原,受 气候、地形和地貌的控制,川藏交通廊道沿线地区 地表土壤湿度空间差异性较大,东部靠近四川盆地 较为湿润,中西部较为干旱(图1c).此外,在冻土广 泛分布的青藏高原,土壤湿度受冻土冻融变化影响 明显.本文选取东经90°~105°,北纬28°~33°范围作 为研究区域,反演川藏交通廊道的地表土壤湿度 变化.

1.2 数据

1.2.1 CYGNSS数据 CYGNSS 星座由 8颗卫星 组成,分布在约510 km高度的近地轨道上,卫星轨 道倾角约为35°,其探测范围为南纬38°至北纬38°之 间,覆盖了本文的整个研究区域.CYGNSS利用搭 载的GNSS-R接收机接收来自地面的GNSS反射 信号,并与接收到的GNSS直接信号进行码相关生 成时延一多普勒图(delay-doppler map, DDM). DDM是GNSS-R的基本观测量,包含了反射表面 的物理信息,作为CYGNSS的L1级产品在其官网 公开发布,时间延迟为3~6 d.本文使用了 CYGNSS L1级2.1版本产品,时间范围为2018年1 月1日至2019年12月31日,L1级2.1版本产品的主 要参数见表1.

1.2.2 SMAP 数据 SMAP 卫星由 NASA 于 2015 年发射,主要用以观测全球地表(~5 cm 深度)土壤 湿度和冻融状态.SMAP采用L波段的辐射计进行 探测,重访周期为2~3d,分为升轨(6:00 am)和降 轨(6:00 pm)两种观测类型,数据及处理后的产品 通过NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 官网进行发布.本文采用SMAPL3级别土壤湿度 产品,它以36 km EASE (equal-area scalable Earth) 网格的形式提供土壤湿度结果.同时,本文还使用 了 SMAP 提供的 36 km×36 km 空间分辨率的土地 覆盖分类(land cover, LC)、归一化差分植被指数 NDVI和粗糙度(roughness, ROU)3种数据,将其作 为神经网络训练和预测的辅助数据,需要注意的 是,NDVI数据的时间分辨率为10d,粗糙度ROU 和土地覆盖类型LC为常量.本文所使用的SMAP 数据的时间范围为2018年1月1日至2019年12月 31日.

1.2.3 那曲(Naqu)实测土壤温湿度数据那曲土 壤温湿度观测网位于那曲市西南方向25km,该区 域地形平坦,平均海拔超过4500m,植被覆盖以高



图1 研究区域(a)、川藏交通廊道沿线地形剖面(b)及2018年SMAP土壤湿度分布(c)

Fig.1 The study area (a) and topography along Sichuan-Tibet traffic corridor (b) and the surface soil moisture distribution derived from SMAP in 2018 (c)

图中黑色线条表示川藏交通廊道;a图红色三角表示Naqu观测站网;b图横轴表示到成都的距离;c图空白处表示无SMAP土壤湿度数据

. _ . _

表1 CYGNSS L1级2.1版本产品主要参	量	
-------------------------	---	--

Table 1Key variables of CYGNSS level 1 products (version2.1)

变量 符号	变量名	单位	说明
Р	power_analog	watt	DDM 功率
$P^{\rm t}$	gps_tx_power_db_w	dB	GPS信号发射功率
$R_{\rm sr}$	rx_to_sp_range	m	CYGNSS卫星到镜面反射点距离
$R_{\rm ts}$	tx_to_sp_range	m	GPS卫星到镜面反射点距离
G^{t}	gps_ant_gain_db_i	dBi	GPS信号发射天线增益
G^r	sp_rx_gain	dBi	CYGNSS反射信号接收天线增益
В	sp_lat	度	镜面反射点纬度
L	sp_lon	度	镜面反射点经度
θ	sp_inc_angle	度	镜面反射点入射角

寒草甸为主,气候类型为半干旱高寒气候.那曲土 壤温湿度观测网是青藏高原土壤温湿度观测网数

表2 使用的 Naqu 观测站网信息

Table 2Information of the Naqu observation network usedin this study

站点编号	纬度(°)	经度(°)	高程(m)	测量深度 (cm)
NQ01	31.326	91.829	$4\ 517.00$	5.000
NQ02	31.309	91.820	4552.00	5.000
NQ03	31.278	91.789	$4\ 638.00$	5.000
NQ04	31.257	91.804	$4\ 632.00$	5.000

据集 Tibet-Obs的一部分(Su et al., 2011),其包含数 十个观测站点,但只有4个站点提供了2019年的观 测数据可用于本文土壤湿度产品的检验(Zhang et al., 2021),具体时间跨度为2019年01月01日— 2019年09月12日.4个站点分布在8 km×6 km范围 内,具体信息见表2.站点土壤观测设备为Decagon EC-TM电容探头,可以探测距离地面5 cm、10 cm、 30 cm 和80 cm 处的土壤湿度和温度,本文采用5 cm 土壤温度和湿度观测值,其中土壤湿度数据用以检 验模型精度,土壤温度用于判断地表冻融状态.需 要注意的是,EC-TM探头获取的为液态水的含量, 因此在土壤冻结期其观测值为未冻水含量(Zheng *et al.*,2018).我们对5个站点数据取平均值作为结 果检验参考值,1倍标准差作为该参考值的不确 定度.

2 方法

2.1 CYGNSS数据处理

CYGNSS L1级产品需要进一步经过计算生成 地表反射率才可用于土壤湿度反演.在计算之前, 需要对 DDM 进行质量控制,剔除反射信号入射角 大于 65°或接收机天线增益小于0的数据.然后,提 取 DDM 中能量最大值 P_r,假设 P_r主要来自于地表 相干散射,则其表达式为:

$$P_{\rm r} = \frac{P^{\rm t} G^{\rm t}}{4\pi \left(R_{\rm ts} + R_{\rm sr}\right)^2} \frac{G^{\rm r} \lambda^2}{4\pi} \Gamma_{\rm s}(\theta) , \qquad (1)$$

(1)式中右边参数 λ 为 GPS L1信号波长(19 cm), Γ_s 即为地表反射率,其他参数均由 CYGNSS L1产品 提供(表1).将式(1)中地表反射率为转换为db单位 得到:

$$\Gamma_{s}(\theta) = 10 \log_{10}(P_{r}) - 10 \log_{10}(P^{t}G^{t}) - 10 \log_{10}(G^{r}) - 20 \log_{10}(\lambda) + 20 \log_{10}(R_{ts} + R_{sr}) + 20 \log_{10}(4\pi).$$
(2)

对经过质量控制的 DDM 按照式(1)和(2)进行 处理,可以得到对应的反射点的地表反射率,或者 更为准确说,地表反射点所在菲涅尔反射区的地表 反射率,其覆盖范围由散射特性决定:在相干散射 的情况下,覆盖范围为0.5 km×7 km;非相干散射的 情况下覆盖范围迅速增大到25 km×25 km.地表反 射率受入射角影响,可以利用式(3)进行改正:

$$\Gamma_s = \Gamma_s(\theta) - 10 \log_{10} \cos^n(\theta) , \qquad (3)$$

式(3)中,n为[02]之间的常量(Mldenova *et al.*, 2013),我们采用 Chew and Small (2020b)的方法 取n = 1.

地表反射率与地表介电常数有很强的关系,而 后者主要由土壤湿度决定,由此建立地表反射率与 土壤湿度的联系,这就是GNSS-R反演土壤湿度的 理论基础.地表反射率和土壤湿度之间关系复杂, 一般采用经验拟合的方式建立GNSS-R反演地表 土壤湿度模型.为了后续的土壤湿度神经网络反 演,需要将CYGNSS地表反射率网格化与SMAP 所采用的36 km×36 km EASE 网格匹配.我们对每 天落在网格内的所有反射率值取平均作为该网格 的地表反射率.经过处理,我们获取了2018年1月1 日至2019年12月31日的川藏交通廊道36 km 网格 地表反射率日产品.图2展示了2018年地表反射 率,同图1b的2018年SMAP地表土壤湿度相比可 以看出,两者的分布有一定的相似性,即土壤湿度 较大的地区其地表反射率也较高.

2.2 人工神经网络模型

Chew and Small (2018)认为地表反射率和地 表土壤湿度存在简单的线性关系,在此基础生成了 CYGNSS 36 km 土壤湿度产品.但在最新的研究中 Chew and Small (2020a)发现两者的关系是非线性 的,并且受环境变化因子(植被覆盖和地表粗糙度 等)影响较大.因此,为了反演获取更为精确的地表 土壤湿度,必须要对土壤湿度和地表反射率及环境 因子的关系进行模型化.然而,地表反射率和土壤 湿度以及各参量之间复杂的联系使得建立物理模 型变得极为困难,因此,我们采用人工神经网络方 法进行 GNSS-R土壤湿度反演.人工神经网络由数 据驱动,能很好地模型化参量之间复杂非线性的 关系.



Fig.2 CYGNSS-derived surface reflectivity along Sichuan-Tibet traffic corridor in 2018





典型的人工神经网络由输入层、隐藏层和输出 层组成.在进行神经网络模型训练之前,首先需要 确定输入层参数.除了CYGNSS地表反射率,以及 SMAP提供的NDVI、地表粗糙度、地物类型3种参 数,考虑到地表土壤湿度的时空变化,我们同时引 入了三维坐标(经度Lon、纬度Lat、高程H)和年积 日DOY作为输入参数.顾及一致性和可靠性,我们 选择SMAP土壤湿度作为人工神经网络反演目标 参数进行训练.对于人工神经网络模型隐藏层数和 节点数的选取,我们经过多次实验,综合考虑拟合 精度和模型复杂度,确定本文采用的人工神经网络 模型隐藏层数为2,每层包含30个节点.以2018年 的上述数据作为训练集训练人工神经网络模型,以 2019年数据作为测试集验证模型精度.主要流程如 图3所示.

3 结果与检验

经过人工神经网络反演,我们生成了川藏交通 廊道2018—2019年的36km空间分辨率的SM日产 品(简称为CYGNSS SM).图4展示了2019年6月 14日至6月15日川藏交通廊道沿线CYGNSS SM 和SMAP SM的分布情况.从图中可以看出,我们 生成的CYGNSS SM分布和SMAP SM比较接近, 但前者在时空连续性上显著优于后者.由于SMAP 卫星的重访周期为2~3d,所以单天观测值无法覆 盖所有地区,导致SMAP SM在6月14日(图4b)出 现了比较严重的数据空缺,而CYGNSS SM只有少 量的数据空缺,并且在川藏交通廊道沿线40km范 围内保持了数据的高连续性.

为了全面评估人工神经网络模型反演地表土壤 湿度的精度和可靠性,我们进行了3种检验:(1)使用 训练集结果(2018年CYGNSS SM)和目标参数 SMAP SM比较,检验模型的内符合精度;(2)使用测 试集结果(2019年CYGNSS SM)和SMAP SM比 较,检验模型的迁移性;(3)预测结果、SMAP SM和 实测地表土壤湿度比较,检验模型的外符合精度.

3.1 内符合精度检验

图 5 显示了与 SMAP SM 相比, 2018 年训练期



Fig.4 Distributions of CYGNSS SM and SMAP SM in the area along the Sichuan-Tibet traffic corridor on 14-15 June, 2019



图 5 2018年 CYGNSS SM 与 SMAP 相比相关系数 R (a)、RMSE (b)和 Bias (c)分布

Fig.5 Distributions of the correlation coefficient, RMSE, and Bias of CYGNSS SM against SMAP SM in 2018

表 3 与SMAP SM相比本文获取的CYGNSS SM 精度统计 Table 3 Precision statistics of CYGNSS SM compared with SMAP SM

	相关系数R	RMSE(cm ³ /cm ³)	Bias(cm ³ /cm ³)
2018年(训练期)	0.857	0.030	0.016
2019年(预测期)	0.743	0.034	0.010
2018—2019年	0.800	0.032	0.014

CYGNSS SM的相关系数 R、RMSE和 Bias的分布 情况.从图 5a 中可以看出,CYGNSS SM和 SMAP SM具有较强的相关性,除了宜宾、林芝东北部部分 地区相关系数低于 0.6,大部分地区 R 均超过 0.7. RMSE的分布情况显示川藏交通廊道沿线 40 km范 围内 CYGNSS SM 精度较好,RMSE 普遍低于 0.03 cm³/cm³, RMSE 较大值分布在那曲安多县和果洛 藏族自治州地区.Bias 的分布显示川藏交通廊道 沿线 CYGNSS SM 与 SMAP 相差不大,出现低估 情况的地区与 RMSE 较差的地区类似,在这些地 区 CYGNSS SM 相比于 SMAP SM 偏小 0.05 cm³/ cm³~0.12 cm³/cm³.统计结果显示(表 3),2018 年 CYGNSS SM 与 SMAP SM 的年均相关系数为 0.857,年均 RMSE 为 0.030 cm³/cm³,年均 Bias 为
0.016 cm³/cm³,说明了训练结果良好,模型结果与
目标参数 SMAP AM之间有较高的内符合度.

3.2 迁移性检验

2019年CYGNSS SM 是测试集输入训练后的 ANN 模型预测得到的,以2019年 SMAP SM 为参 考,其相关系数 R_{RMSE} 和 Bias 的情况如图 6 所 示.从图 6a 可以看出,大部分地区的相关系数 R 在 0.6以上,但相比于2018年的结果(图 5a)整体相关 系数R有所降低,相关系数R低于0.4的地区有所 扩大.RMSE和Bias的分布相比于2018年变化不 大,整体分布较为类似.统计结果显示(表3),2019 年 CYGNSS SM 与 SMAP SM 的年均相关系数为 0.743, 年均 RMSE 为 0.034 cm³/cm³, 年均 Bias 为 0.010 cm³/cm³,相比于 2018年,虽然相关系数有所 降低,但模型RMSE和Bias无明显变化,说明本文 采用ANN模型具有较好的迁移性,其预测结果精 度较好.综合2018年和2019年的检验结果,以 SMAP SM 作为参考,我们生成的土壤湿度产品相 关系数 R 为 0.800, RMSE 为 0.032 cm³/cm³, Bias 为 $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.



Fig.6 Distributions of the correlation coefficient, RMSE, and Bias of CYGNSS SM against SMAP SM in 2018



图 7 2019年3种地表土壤湿度数据的时间序列(a)及对应的地表温度(b)

Fig.7 Time series of three kinds of surface soil moisture data (a) and corresponding surface temperatures (b) in 2019 灰色阴影为1倍标准差,蓝色虚线标示出冻结/融化分界(即地表温度大于0°),红色虚线矩形框表示SMAP SM数据缺失时间段(2019-06-20至2019-07-22)



图 8 2019年 Naqu 观测站网 CYGNSS SM 和 SMAP SM 散 点图

Fig.8 Scatter plots of CYGNSS SM and SMAP SM vs. Naqu in situ data in 2019

黄色和蓝色虚线分别表示 CYGNSS SM、SMAP SM 与 Naqu 实测数据的线性拟合结果

3.3 实测数据检验

图7展示了2019年CYGNSS SM、SMAP SM 和 Naqu 观测站网实测 SM 的时间序列以及对应的 地表土壤温度时间序列.从图7中可以看出,3种 SM的变化特征大致分为冻结期和非冻结期两个阶 段:(1)在冻结期(2019-01-01至2019-03-24), 土壤水分含量保持在较低水平(<0.010 cm³/cm³) 但并不为零,这是因为土壤表层中未冻水的存 在, CYGNSS SM 和实测结果十分吻合, 而 SMAP SM在冻结期无数据;(2)在非冻结期,4-6月份土 壤较干燥的情况下(SM<0.2), CYGNSS SM、 SMAP SM 和实测 SM 的时间变化比较吻合,但 SMAP SM 更能反映地表土壤湿度的短期波动.进 入夏季后,土壤湿度开始增加,SMAP和CYGNSS 均出现明显的高估现象.需要说明的是,SMAP由 于卫星工作模式调整在2019年6月20日至2019年 7月22日期间没有采集数据(Yao et al., 2021),因此 出现了一个月的土壤湿度产品空缺,而CYGNSS SM仍然能够提供土壤湿度结果从而保持高连续 性.图8展示了3种土壤湿度数据的散点图,从图8 中可以看出,CYGNSS SM和SMAP SM均比实测 数据偏大,后者与实测数据线性拟合的斜率(2.16) 明显大于前者(1.62),在地表土壤湿度较大的情况

下,SMAP SM 存在严重的高估.统计结果显示 CYGNSS SM 与 Naug 实测土壤湿度的相关系数 R_x RMSE、Bias 分别为 0.850、0.082 cm³/cm³ 和 0.039 cm³/cm³, 而 SMAP SM 为 0.931、0.088 cm³/ cm³和 0.063 cm³/cm³, SMAP SM 在相关性上要优 于CYGNSS SM,但其RMSE和Bias要明显差于后 者,统计移除 Bias 影响的无偏 RMSE (unbiased Root Mean Square Error, ubRMSE)指标, CYGNSS SM 和 SMAP SM 分 别 为 0.072 cm3/cm3 和 0.061 cm³/cm³. CYGNSS 的土壤湿度在 Naqu 的 RMSE和 bias 偏大,并且未能很好地捕捉到土壤湿 度的动态变化,一方面可能是由于CYGNSS网格和 观测站网范围大小不一致,另一方面可能是该区域 半干旱的气候对土壤湿度的影响在模型训练中未 能顾及,在后续的研究中可以考虑增加气候和水文 因素以改善模型的动态变化预测效果.

4 结论与讨论

本文利用CYGNSS星载GNSS-R信号,采用人 工神经网络方法建立了CYGNSS地表土壤湿度反 演模型,生成了川藏交通廊道沿线地区2018-2019 年连续两年的地表土壤湿度产品 CYGNSS SM,其 空间分辨率为36 km×36 km,时间分辨率为1 d.在 神经网络模型训练中,顾及地表土壤湿度的多重影 响因子,我们引入了地表粗糙度、NDVI、地表覆盖 类型、地理位置和年积日等辅助数据.以SMAP SM 为参考的检验结果显示,CYGNSS SM的相关系数 R、RMSE 和 Bias 分别为 0.800、0.032 cm³/cm³ 和 0.014 cm³/cm³,说明我们的土壤湿度产品与SMAP SM具有较高的符合度.Naqu实测土壤湿度的检验 结果显示,CYGNSS SM 与实测土壤湿度的相关系 数 R、RMSE、Bias 和 ubRMSE 分 别 为 0.850、 0.082 cm³/cm³、0.039 cm³/m³和 0.072 cm³/cm³, 略差 于 SMAP SM 的 结 果 (R=0.931, RMSE= 0.088 cm³/cm³, Bias=0.063 cm³/cm³, ubRMSE= 0.061 cm³/cm³). 整体而言, 我们的土壤湿度产品具 有较好的精度和可靠性.

川藏交通廊道沿线地区因为环境恶劣,实测土 壤湿度数据稀缺,土壤水分及气候变化研究主要依 赖于微波遥感数据.SMAP可以提供目前精度最高 的微波遥感土壤湿度产品,其时间分辨率为2~3 d, 但在川藏交通廊道沿线存在数据永久空白区.我们 虽然以SMAP作为目标参数进行ANN训练,但训 练之后的模型结合高时间分辨率的CYGNSS地表 反射率可以实现地表土壤湿度的日估计,其高连续 性和可靠性可以补充SMAP在时空分布上的缺失, 如2019年6月20日至2019年7月22日SMAP状态 调整导致的数据中断.另一方面,由于算法限制, SMAP在冻结状态下无土壤湿度估计值,而我们的 模型经过实测数据检验,在冻结情况下仍能提供较 为可靠的土壤湿度产品(图7a),这对于研究川藏交 通廊道沿线尤其是冻土地区地表水热变化很有意 义,为川藏交通廊道沿线地表冻融灾害的研究和防 治提供宝贵的数据.

致谢:感谢成都理工大学戴可人教授提供川藏 交通廊道相关数据.

References

- Al-Khaldi, M.M., Johnson, J.T., 2022. Soil Moisture Retrievals Using CYGNSS Data in a Time-Series Ratio Method: Progress Update and Error Analysis. *IEEE Geosci*ence and Remote Sensing Letters, 19: 1-5. https://doi. org/10.1109/lgrs.2021.3086092
- Camps, A., Park, H., Pablos, M., et al., 2016. Sensitivity of GNSS-R Spaceborne Observations to Soil Moisture and Vegetation. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(10): 4730– 4742.https://doi.org/10.1109/jstars.2016.2588467
- Carreno-Luengo, H., Luzi, G., Crosetto, M., 2019. Sensitivity of CyGNSS Bistatic Reflectivity and SMAP Microwave Radiometry Brightness Temperature to Geophysical Parameters over Land Surfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1): 107–122. https://doi. org/10.1109/ jstars.2018.2856588
- Chai, B., Tao, Y.Y., Du, J., et al., 2020. Hazard Assessment of Debris Flow Triggered by Outburst of Jialong Glacial Lake in Nyalam County, Tibet. *Earth Science*, 45(12): 4630-4639(in Chinese with English abstract).
- Chan, S.K., Bindlish, R., O'Neill, P.E., et al., 2016. Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product.*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8): 4994-5007. https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2561938.
- Chen, H.Y., Wu, J., Li, C.B., et al., 2020. Application Evaluation of Satellite Soil Moisture Products in Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologic Sinica, 40(24): 9195-9207(in Chinese with English abstract).
- Chen, R., Yang, X.M., Wan, G.N., et al., 2020. Soil Freezing-Thawing Processes on the Tibetan Plateau: A Review Based on Hydrothermal Dynamics. *Progress in Geogra*-

phy, 39(11): 1944-1958(in Chinese with English abstract).

- Chen, Y., Yang, K., Qin, J., et al., 2013. Evaluation of AMSR-E Retrievals and GLDAS Simulations against Observations of a Soil Moisture Network on the Central Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(10): 4466-4475. https://doi. org/10.1002/ jgrd.50301
- Chen, Y., Yang, K., Qin, J., et al., 2017. Evaluation of SMAP, SMOS, and AMSR2 Soil Moisture Retrievals against Observations from Two Networks on the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122: 5780-5792.doi:10.1002/2016jd026388
- Chew, C.C., Shah, R., Zuffada, C., et al., 2016. Demonstrating Soil Moisture Remote Sensing with Observations from the UK TechDemoSat-1 Satellite Mission. *Geophysical Research Letters*, 43(7): 3317-3324. https://doi. org/ 10.1002/2016gl068189
- Chew, C.C., Small, E.E., 2018. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture. *Geophysical Research Letters*, 45(9):4049-4057. https://doi.org/ 10.1029/2018gl077905
- Chew, C., Small, E., 2020a. Description of the UCAR/CU Soil Moisture Product. *Remote Sensing*, 12(10): 1558. https://doi.org/10.3390/rs12101558
- Chew, C., Small, E., 2020b. Estimating Inundation Extent Using CYGNSS Data: A Conceptual Modeling Study. *Remote Sensing of Environment*, 246: 111869. https://doi. org/10.1016/j.rse.2020.111869
- Clarizia, M.P., Pierdicca, N., Costantini, F., et al., 2019. Analysis of CYGNSS Data for Soil Moisture Retrieval. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(7): 2227-2235. https:// doi.org/10.1109/jstars.2019.2895510.
- Dente, L., Su, Z.B., Wen, J., 2012. Validation of SMOS Soil Moisture Products over the Maqu and Twente Regions. Sensors (Basel, Switzerland), 12(8):9965-9986.https:// doi.org/10.3390/s120809965
- Fan, K.K., Zhang, Q., Sun, P., et al., 2019. Variation, Causes and Future Estimation of Surface Soil Moisture on the Tibetan Plateau. Acta Geographica Sinica, 74(3): 520-533(in Chinese with English abstract).
- Foti, G., Gommenginger, C., Jales, P., et al., 2015. Spaceborne GNSS Reflectometry for Ocean Winds: First Results from the UK TechDemoSat-1 Mission. *Geophysical Research Letters*, 42(13): 5435-5441. https://doi.org/ 10.1002/2015gl064204.
- Jackson, T.J., Cosh, M.H., Bindlish, R., et al., 2010. Validation of Advanced Microwave Scanning Radiometer Soil Moisture Products. *IEEE Transactions on Geoscience*

and Remote Sensing, 48(12): 4256-4272. https://doi. org/10.1109/tgrs.2010.2051035

- Jing, C.L., 2020. Comparative Evaluation of SMAP & CCI & CLDAS Soil Moisture Products in Typical Region of Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Subtropical Resources and Environment, 15(1):85-94(in Chinese with English abstract).
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., et al., 2001. Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8): 1729-1735. https://doi.org/10.1109/36.942551
- Li, J.R., Niu, Z.G., Feng, L., et al., 2020. Simulation and Prediction of Extreme Temperature Indices in Yangtze and Yellow River Basins by CMIP5 Models. *Earth Science*, 45(6):1887-1904(in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Chai, L.N., Lu, Z., et al., 2019. Evaluation of SMAP, SMOS - IC, FY3B, JAXA, and LPRM Soil Moisture Products over the Qinghai - Tibet Plateau and Its Surrounding Areas. *Remote Sensing*, 11(7): 792. https://doi. org/10.3390/rs11070792
- Liu, Q., Du, J. Y., Shi, J. C., et al., 2013. Analysis of Spatial Distribution and Multi-Year Trend of the Remotely Sensed Soil Moisture on the Tibetan Plateau. Science China:Earth Sciences, 43(10):1677-1690(in Chinese).
- Mladenova, I.E., Jackson, T.J., Bindlish, R., et al., 2013. Incidence Angle Normalization of Radar Backscatter Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1791–1804. https://doi. org/10.1109/ tgrs.2012.2205264.
- Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12):2377-2389(in Chinese with English abstract).
- Ruf, C. S., Atlas, R., Chang, P. S., et al., 2016. New Ocean Winds Satellite Mission to Probe Hurricanes and Tropical Convection. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(3): 385-395. https://doi.org/10.1175/ bams-d-14-00218.1
- Su, Z., Wen, J., Dente, L., et al., 2011. The Tibetan Plateau Observatory of Plateau Scale Soil Moisture and Soil Temperature (Tibet-Obs) for Quantifying Uncertainties in Coarse Resolution Satellite and Model Products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7):2303-2316. https://doi.org/10.5194/hess-15-2303-2011
- Yang, C. Y., Wang, S. X., Yang, C. Y., et al., 2021. Spatial-Temporal Variation Characteristics of Vegetation Coverage along Sichuan-Tibet Railway. Journal of Arid Land Resources and Environment, 35(3):174-182(in Chinese with English abstract).

- Yang, K., Qin, J., Zhao, L., et al., 2013. A Multiscale Soil Moisture and Freeze-Thaw Monitoring Network on the Third Pole. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12): 1907-1916. doi: 10.1175/bams-d-12-00203.1
- Yao, P., Lu, H., Shi, J., et al., 2021. A Long Term Global Daily Soil Moisture Dataset Derived from AMSR-E and AMSR2 (2002—2019). Scientific Data, 8(1). https://doi. org/10.1038/s41597-021-00925-8
- Zeng, J. Y., Li, Z., Chen, Q., et al., 2015. Evaluation of Remotely Sensed and Reanalysis Soil Moisture Products over the Tibetan Plateau Using In-Situ Observations.*Remote Sensing of Environment*, 163:91-110.https://doi. org/10.1016/j.rse.2015.03.008.
- Zhang, P., Zheng, D., Wen, J., et al., 2021. A 10-Year Surface Soil Moisture Dataset Produced Based on In Situ Measurements Collected from the Tibet-Obs (2009—2019). *National Tibetan Plateau Data Center*, doi: 10.4121/ 12763700.v7
- Zheng, D.H., Wang, X., van der Velde, R., et al., 2018.Impact of Surface Roughness, Vegetation Opacity and Soil Permittivity on L-Band Microwave Emission and Soil Moisture Retrieval in the Third Pole Environment. *Remote Sensing of Environment*, 209:633-647.https://doi.org/ 10.1016/j.rse.2018.03.011.

附中文参考文献

- 柴波,陶阳阳,杜娟,等,2020.西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决 型泥石流危险性评价.地球科学,45(12):4630-4639.
- 陈泓羽,吴静,李纯斌,等,2020.卫星土壤水分产品在青藏高 原地区的适用性评价.生态学报,40(24):9195-9207.
- 陈瑞,杨梅学,万国宁,等,2020.基于水热变化的青藏高原土 壤冻融过程研究进展.地理科学进展,39(11):1944-1958.
- 范科科,张强,孙鹏,等,2019.青藏高原地表土壤水变化、影响因子及未来预估.地理学报,74(3):520-533.
- 荆琛琳,2020.SMAP、CCI和CLDAS土壤湿度产品在青藏 高原典型区域的比较验证.亚热带资源与环境学报,15 (1):85-94.
- 李佳瑞,牛自耕,冯岚,等,2020.CMIP5模式对长江和黄河流 域极端气温指标的模拟与预估.地球科学,45(6): 1887-1904.
- 刘强,杜今阳,施建成,等,2013.青藏高原表层土壤湿度遥感 反演及其空间分布和多年变化趋势分析.中国科学:地 球科学,43(10):1677-1690.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏交通廊道对工程地质提出 的挑战.岩石力学与工程学报,39(12):2377-2389.
- 杨彩云,王世曦,杨春艳,等,2021.川藏交通廊道沿线植被覆 盖度时空变化特征分析.干旱区资源与环境,35(3): 174-182.