

基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分变化数据集的研发 (201901–202010)

杨 婷^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 黄河三角洲现代农业工程实验室, 北京 100101;
2. 中科山东东营地理研究院, 东营 257000

摘 要: 基于遥感的大尺度土壤水分空间分布监测对农业生产管理等具有重大意义, 高精度的土壤水分数据可为区域尺度的气候研究提供数据支撑。星载 GNSS-R 属卫星导航应用与遥感的交叉学科范畴, 其工作波段 L 对土壤水分变化敏感, 为大尺度的土壤水分探测提供了一种新的技术手段。本数据集选择中国东南部 18°N–38°N, 97°E–122°36'E 为研究区, 基于公开发布的星载 GNSS-R 数据, 即 CYGNSS 数据, 优化土壤水分估算模型, 实现复杂地表的土壤水分有效计算方法, 生成了 2019 年 1 月至 2020 年 10 月中国南部土壤水分变化数据集。数据集的时间分辨率为日, 空间分辨率为 0.36°×0.36°。数据集包括: (1) 2019 年中国东南部逐日土壤水分; (2) 2020 年 1–10 月中国东南部逐日土壤水分。数据集存储存储为.tif 和.mdd 两种格式, 由 1,338 个数据文件组成, 数据量为 40.1 MB (压缩为 1 个文件 21.6 MB)。

关键词: 星载 GNSS-R; CYGNSS; 土壤水分; 植被; 粗糙度

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.09>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2024.02.09>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.01.V1>.

1 前言

土壤水分是陆气相互作用中的主要物理量之一, 它通过影响陆表蒸散、水的运移和碳循环与地球气候系统相互作用, 对气候系统及其变化产生重要影响^[1–3]。目前, 鉴于土壤水分的复杂时空特性, 长时间序列、高精度土壤水分数据获取仍极具挑战。全球卫星导航反射信号遥感技术 (Global Navigation Satellite System Reflectometry, GNSS-R) 是卫星导航与遥感学科交叉的新兴科学与技术, 是近年来国际研究的前沿和热点。该技术以 GNSS 卫

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2024-03-10; 出版日期: 2024-06-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (42101376)

作者信息: 杨婷, 中国科学院地理科学与资源研究所, yangt@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 杨婷. 基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分变化数据集的研发 (201901–202010) [J]. 全球变化数据学报, 2024, 8(2): 187–192. <https://doi.org/10.3974/geodp.2024.02.09>.
[2] 杨婷. 基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分数据集 (201901–202010) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.01.V1>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.01.V1>.

星发射的长期稳定的 L 波段信号作为信号源，可用于海洋（海面高度、河湖水位、海面风场等）和陆地（土壤水分、植被含水量、积雪深度等）参数反演，实现导航卫星的创新增值应用。凭借其低成本、高时频及覆盖范围广等诸多优点，星载 GNSS-R 技术目前成为表层土壤水分估算的有效手段之一^[4-8]。

CYGNSS 是作为目前在轨运行并且数据同步公开的业务化星载 GNSS-R 载荷之一，凭借其高时空分辨率、覆盖范围广等诸多优点，CYGNSS 目前成为土壤水盐参数反演的有效手段数据源。CYGNSS 反演土壤水分的机理在于其工作的 L 波段对土壤介电常数变化敏感，基于 CYGNSS 时延多普勒图（Delay Doppler Map, DDM）获取的信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）参数，由陆面反射信号峰值的相关功率计算而来，受土壤介电常数影响较大。从数据应用角度，目前已公开发布了基于 SNR 反演的 CYGNSS 全球逐日土壤水分反演产品，但忽略了植被和粗糙度的影响^[9]。本数据集基于 2019 年 1 月至 2020 年 10 月原始 CYGNSS 数据，对星载 GNSS-R 土壤水分反演方法进行改进，发展物理机制的地表校正方法，实现中国东南部土壤水分的逐日输出，旨在为中国东南部气候变化研究、农业生产管理提供数据支撑。

2 数据集元数据简介

《基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分数据集（201901–202010）》^[10]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分数据集（201901–202010）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分数据集（201901–202010）
数据集短名	SM_SEChina201901-202010
作者信息	杨婷，中国科学院地理科学与资源研究所, yangt@igsrr.ac.cn
地理区域	中国东南部：18°N–38°N，97°E–122°36'E
数据年代	2019 年 1 月至 2020 年 10 月
时间分辨率	逐日
空间分辨率	0.36°×0.36°
数据格式	.tif、.mdd
数据量	40.1 MB（压缩后为 20.6 MB）
数据集组成	（1）2019 年逐日土壤水分 （2）2020 年 1–10 月逐日土壤水分
基金项目	国家自然科学基金青年基金（42101376）
数据计算环境	Matlab、ArcGIS
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所

续表 1

条 目	描 述
数据共享政策	(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放,用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议,获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则,即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%,同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[11]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

3 数据研发方法

3.1 算法原理

3.1.1 地表反射率计算

此处使用双基雷达方程计算地表反射率,经过植被和地表粗糙度校正的地表反射率公式可表示为^[8,9]:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= \sigma_{cali} \cdot \exp(-2\tau \sec \theta) \cdot \exp(-h \cos^2 \theta) \\ &= \sigma_{cali} \cdot \exp(-2\tau \sec \theta - h \cos^2 \theta)\end{aligned}\tag{1}$$

式中, σ_0 代表 DDM 峰值功率与噪声之差; σ_{cali} 代表地表反射率; τ 为植被光学厚度; h 为地表粗糙度; θ 代表入射角。此处称 $\exp(-2\tau \sec \theta - h \cos^2 \theta)$ 为校正因子。

3.1.2 地表反射率校正

此处,引入零阶辐射传输模型 τ - ω 模型,获取校正因子的计算方法。该算法依靠 SMAP (Soil Moisture Active and Passive) 的亮温数据作为唯一参数输入值。 τ - ω 模型将亮温数据表述为土壤、植被和土壤反射的植被的信号综合值,表达方式如下^[12]:

$$T_{Bp} = T[1 - R_{p_rough} \exp(-2\tau \sec \theta)]\tag{2}$$

式中, T_{Bp} 代表 SMAP 亮温;假设土壤温度和植被温度相等,表示为 T ; τ 为植被光学厚度; θ 为入射角; R_{p_rough} 是粗糙表面的土壤反射率,可以用光滑表面的土壤反射率与粗糙度影响因子表示:

$$R_{p_rough} = R_{p_smooth} \cdot \exp(-h \cos^2 \theta)\tag{3}$$

式中, R_{p_smooth} 是光滑地表的土壤反射率。

校正因子可表示为:

$$\exp(-2\tau \sec \theta - h \cos^2 \theta) = \frac{T_{BV} - T_{BH}}{T_{BV}R_{H_smooth} - T_{BH}R_{V_smooth}}\tag{4}$$

式中, T_{BV} 和 T_{BH} 分别代表 V 极化和 H 极化的 SMAP 亮温, R_{H_smooth} 和 R_{V_smooth} 分别指 V 极化和 H 极化的光滑地表的菲涅尔反射系数。 R_{H_smooth} 和 R_{V_smooth} 可利用菲涅尔方程式计算得出。随后,为校正 CYGNSS 和 SMAP 的入射角度差异,对 CYGNSS 的入射角归一化,最后利用校正因子带入式(1)计算 σ_{cali} 。

3.1.3 土壤水分计算

利用 SMAP 土壤水分数据与 σ_{cali} 建立线性经验模型,获取 CYGNSS 土壤水分。此处,

利用 2021 年逐日的 CYGNSS 数据与 SMAP 数据匹配，获取每个格点的经验公式参数，随后将参数应用于 2020 年 5 月的 CYGNSS 土壤水分数据的反演^[9]。公式如下：

$$SM_{CYGNSS} = a \cdot \sigma_{cali} + b$$

(5)

式中， a 和 b 分别代表每个像元的斜率和截距， σ_{cali} 为 CYGNSS 地表反射率。

3.2 技术路线

模型训练阶段，首先使用 2018 年 8–12 月的 CYGNSS 相干信号计算地表反射率；然后耦合 SMAP 亮温数据，基于辐射传输模型校正植被和地表粗糙度误差；最后与 2018 年的 8–12 月的 SMAP 土壤水分数据线性拟合，建立土壤水分反演模型。

本研究的数据研发流程（图 1）包括 4 个步骤：（1）模型输出阶段，使用 2019 年 1 月至 2020 年 10 月的 CYGNSS 相干信号计算地表反射率；（2）然后耦合 SMAP 亮温数据，基于辐射传输模型校正植被和地表粗糙度误差，利用 SMAP 土壤水分数据进行验证；（3）利用模型训练阶段的线性拟合输出 CYGNSS 土壤水分；（4）最后，利用 2019 年 1 月至 2020 年 10 月的 SMAP 土壤水分数据进行验证。

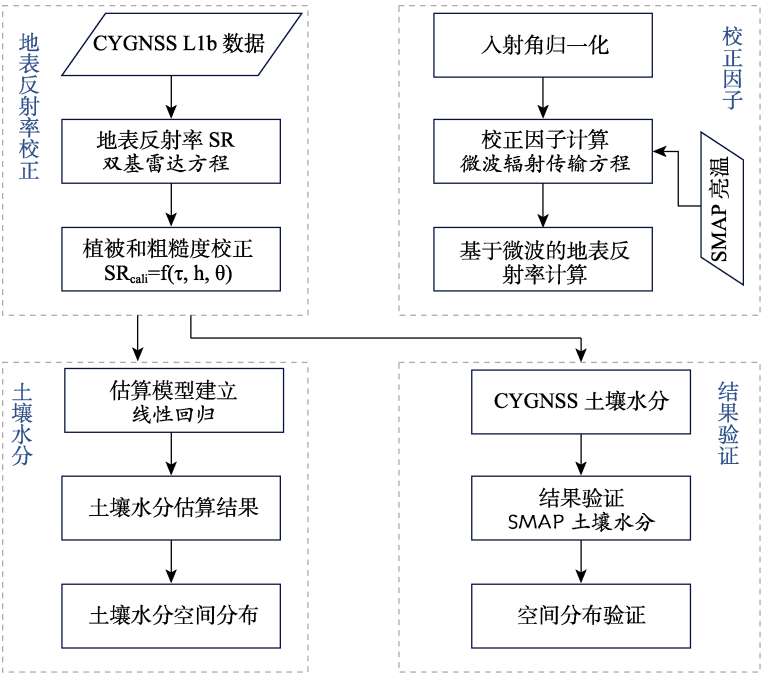


图 1 数据集研发流程图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据成果共 4 个数据文件，包括：

- （1）2019 年网格化的中国东南部数据点经纬度；
- （2）2020 年网格化的中国东南部数据点经纬度；
- （3）2019 年中国东南部每日土壤水分；

(4) 2020 年 1–10 月的中国东南部每日土壤水分。

4.2 数据结果

4.2.1 中国东南部地区土壤水分情况

基于以上的算法和流程,得到中国东南部 2019 年 1 月至 2020 年 10 月土壤水分的空间分布,空间分辨率为 36 km。为了更清晰地展示中国东南部地区土壤水分分布情况,图 2 展示了 2019 年 4 月、7 月、10 月和 2020 年 1 月的月平均土壤水分。土壤水分值在中部地区较大,变化范围在 $0.3\text{--}0.5\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,北部数值较小,变化范围在 $0\text{--}0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。整体趋势为,土壤水分自北向逐渐增高。

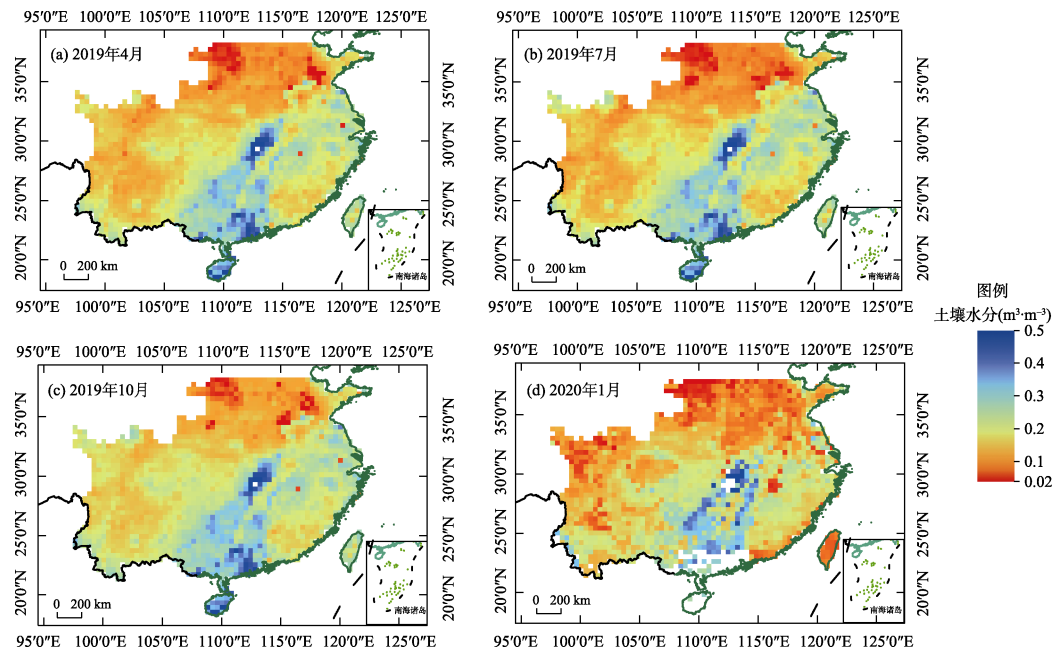


图 2 中国东南部土壤水分图(分辨率 36 km): (a) 2019 年 4 月, (b) 2019 年 7 月, (c) 2019 年 10 月, (d) 2020 年 1 月

4.3 数据结果验证

图 3 显示了依据每日数据计算的 2019 年 1 月至 2020 年 10 月 CYGNSS 土壤水分与 SMAP 土壤水分的相关系数 (correlation coefficient, R) 与 ubRMSE。总体而言, CYGNSS 土壤水分与 SMAP 土壤水分拟合度均较高,在数值上也较贴近,两个指数的空间模式都很好 (R 的平均值为 0.761; ubRMSE 的平均值为 $0.052\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$),表明本数据集的精确性较好。

5 讨论和总结

星载 GNSS-R 新型遥感技术发展速度快,其理论体系及方法研究也已逐步完善,但还存在一定的不足。在土壤水分反演方面,作者对土壤水分的反演方法进行了改进。同时,区别于经验模型或半经验模型,作者结合了辐射传输的物理模型,实现了植被覆盖和地表粗糙度的校正。结果显示,中国东南部地区土壤水分空间异质性强,且逐月变化大。作者

提供的数据集精度较高，其中与 SMAP 土壤水分相比， R 可达 0.768，ubRMSE 可达 $0.052 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。本数据集有望为遥感土壤水分精度提高提供技术支撑，为中国东南部气候变化研究、农业生产管理提供数据支撑，具有实际应用价值。

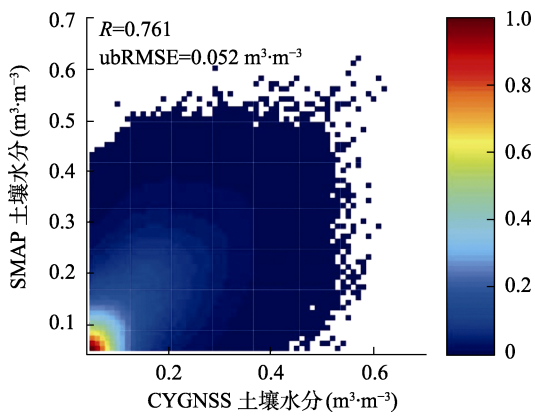


图 3 基于 SMAP 土壤水分的 2021 年中国东南部土壤水分反演精度验证图

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 施建成, 杜阳, 杜今阳等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 814–842.
- [2] 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): 2023, 49(1): 15–26.
- [3] Zeng, J. Y, Shi, P. F, Chen, K. S., *et al.* Assessment and error analysis of satellite soil moisture products over the third pole [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 1–18.
- [4] 严清赓, 金双根, 黄为民等. 基于 CyGNSS 数据的土壤水分与植被光学厚度反演研究[J]. 南京: 南京信息工程大学学报(自然科学版)[J], 2021, 13(2): 194–203.
- [5] 尹聪. 基于导航卫星反射信号的土壤湿度研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [6] 张云, 张丹丹, 孟婉婷等. CYGNSS/SMAP 数据融合半经验模型的土壤湿度反演研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(11): 2873–2882.
- [7] Clarizia, M. P., Pierdicca, N., Costantini, F., *et al.* Analysis of CYGNSS data for soil moisture retrieval [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(7): 2227–2235.
- [8] Yang, T., Wan, W., Wang, J. D., *et al.* A physics-based algorithm to couple CYGNSS surface reflectivity and SMAP brightness temperature estimates for accurate soil moisture retrieval [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–15.
- [9] Chew, C., Small, E. Description of the UCAR/CU soil moisture product [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10), 1558.
- [10] 杨婷. 基于 CYGNSS 的中国东南部逐日土壤水分数据集 (201901–202010) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.08.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.08.01.V1>.
- [11] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [12] O'Neill, P., Bindlish, R., Chan, S., *et al.* Algorithm Theoretical Basis Document. Level 2 & 3 Soil Moisture (Passive) Data Products [M]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 2018.