

doi: 10.6046/zrzyyg.2023308

引用格式: 凌肖露, 陈朝荣, 郭维栋, 等. ESA CCI 土壤湿度资料在中国东部的综合评估[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 92–106. (Ling X L, Chen C R, Guo W D, et al. Comprehensive evaluation of ESA CCI soil moisture data in eastern China[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 92–106.)

# ESA CCI 土壤湿度资料在中国东部的综合评估

凌肖露<sup>1,2</sup>, 陈朝荣<sup>3</sup>, 郭维栋<sup>4</sup>, 秦凯<sup>1,2</sup>, 张锦龙<sup>5</sup>

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 2. 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 中国矿业大学, 徐州 221008; 3. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; 4. 南京大学大气科学学院, 南京 210023; 5. 创亚普产业技术研究院, 徐州 221116)

**摘要:** 卫星遥感的土壤湿度产品为研究区域尺度的气候变化、水文效应等提供了便利, 然而由于观测标准不统一、仪器更迭等因素, 长时间序列土壤湿度数据集在中国的验证和应用犹显不足。该文基于中国气象局农气数据集和国际土壤水分网络 (international soil moisture network, ISMN) 的土壤湿度资料, 首先构建了 1981—2013 年中国东部地区土壤湿度的月数据集; 并在此基础上对比分析了同时间段欧洲航天局气候变化倡议项目 (European space agency climate change initiative, ESA CCI) 的 4 种微波遥感土壤湿度产品 (包括主动、被动、融合和校正的融合产品) 在中国东部的表现能力。结果显示, 主动产品和被动产品分别低估、高估了中国东部的土壤湿度, 其中主动产品的最大偏差分布在华北和西北地区, 相对偏差分别达到 -30.9% 和 -29.6%, 被动产品在东北和西北地区的相对偏差分别为 39.1% 和 26.5%, 融合产品可以很好地改进东北地区 and 西北地区主动产品低估、被动产品高估的现象, 相对偏差分别减少到 24.3% 和 3.7%。对区域平均的月土壤湿度的变化特征而言, 主动产品和融合产品在江淮地区的表现最优, 最高相关系数达 0.66, 被动产品和融合产品在东北地区的相关系数达 0.44 和 0.47, 华北地区和西北地区较差。通过对遥感产品方差来源进行分析, 主动产品在描述土壤湿度的演变特征方面更具优势, 被动产品在精度方面表现更优, 融合产品在精度方面表现最佳。该文同时研究了 CCI 集成卫星设备的更迭对产品表现的影响, 结果表明, 不同时间段的主动产品在东北和西北表现较一致, 被动传感器在再现土壤湿度的变化特征方面还有一定的差距, 融合产品的整体方差明显优于主动产品和被动产品, 但是在相关系数方面, 融合产品在东北和西北较主动产品基本相当。校正后的融合产品没有特别明显的改进, 这在一定程度上证明了利用 CCI 融合产品进行长期研究的可行性。研究结果有助于更深刻地理解不同卫星产品数据集的误差结构和特性, 为研究者挑选相应数据产品、以及进行长时间序列的研究提供了证据支持。

**关键词:** 土壤湿度; 卫星遥感; 设备更替; 长时间序列; ESA CCI; 中国东部; 突变检验和校正; 综合评估

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0092-15

## 0 引言

作为表征土壤干湿程度的物理量, 土壤湿度通过影响陆面蒸发、植被蒸腾等过程影响整个地球系统的水循环; 此外, 土壤湿度还可以通过改变地表反照率、影响植被生长的生物物理和生物地球化学过程改变整个地球系统中的物质和能量循环<sup>[1-3]</sup>。近年来的研究发现, 土壤湿度可以作为干旱、热浪的重要指标, 在气候预测和气象预报、农业干旱管理、水资源管理、温室气体核算、民用防护、生态环境等

领域占据越来越重的作用<sup>[4-7]</sup>, 因此, 对土壤湿度的正确描述可以为地球科学相关领域的研究提供重要的数据支持和理论证据。

近年来涌现了非常多的土壤湿度数据产品, 包括台站观测、卫星遥感、模型模拟和再分析数据等。台站观测是公认的可以获得最精确的土壤湿度数据的方法, 其可以作为真实值对其他数据产品进行验证, 然而由于获得方法不统一、仪器更迭、数据获得的时空范围各异等原因, 很难获得长时间序列、区域范围甚至是全球范围的观测土壤湿度数据。例如国际土壤水分网络 (International Soil Moisture Network,

收稿日期: 2023-10-09; 修订日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“陆地植被特征在东亚次季节-季节气候预测中的同化及应用”(编号: 42075114)、江苏高校优势学科建设项目“测绘科学与技术学科”(编号: 140119001)以及徐州市重点研发计划——现代农业面上项目“基于农业遥感大数据和陆面模型的作物产量精细化监测”(编号: KC21132)共同资助。

第一作者: 凌肖露 (1986-), 女, 博士, 副教授, 主要从事生态遥感和大气环境遥感的研究。Email: lingxl@cumt.edu.cn。

ISMN)就是由全球能源和水交换项目(Global Energy and Water Cycle Experiment, GEWEX)、地球观测卫星委员会(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)、全球气候观测系统-陆地气候观测小组(Global Climate Observing System: Terrestrial Observation Panel for Climate, GCOS-TOPC)共同发起,以实现土壤湿度观测数据的共享而建成的<sup>[8-9]</sup>。

模型模拟和再分析数据是基于数理模型获得的土壤湿度数据产品,可以提供时空连续的土壤湿度分布,其中模型模拟包括公用陆面模式<sup>[10]</sup>(Community Land Model, CLM)、陆面模式(Simplified Simple Biosphere Model, SSiB)<sup>[11]</sup>等,再分析数据包括美国国家环境预报中心和美国能源部共同制作的第二代全球大气再分析资料(the National Centers for Environmental Prediction and Department of Energy Reanalysis, NCEP-DOE R2)、美国能源部和国家大气海洋局联合发布的再分析资料(The 20th Century Reanalysis Project (20CR) led by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and the University of Colorado Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), NOAA/CIRES-20CR)、欧洲中期天气预报中心再分析资料(the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis - Interim, (ERA-Interim))、全球陆地数据同化系统产品(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)、北美陆地数据同化系统产品(North American Land Data Assimilation System, NLDAS)等<sup>[12-18]</sup>。由于模型的数学物理机制、模型结构、输入参数、驱动数据、同化变量的不同,这些产品存在较大的不确定性;此外全球性的模拟和再分析产品的空间分辨率较粗,一定程度上不适用于更精细尺度的应用。

自20世纪70年代微波技术被发现可用来获得土壤表面的水分含量以来,土壤湿度的监测获得了迅猛发展。通过发射或者反射地球表面的电磁波,搭载在卫星上的主动传感器、被动传感器通过测量亮温、雷达反射系数等来测量土壤表面的水分含量<sup>[19]</sup>。随着遥感技术的发展,衍生了许多基于卫星遥感的观测数据集,包括基于单个卫星的产品、基于多个卫星的集成产品等。由于遥感数据是基于观测、同时可以提供时空连续的精细分辨率的土壤湿度数据集,基于遥感的土壤湿度数据产品在气候学、气象学、水文学、生态学等领域获得了广泛的应用<sup>[20-22]</sup>。

国内外已有许多工作对不同来源的土壤湿度数据产品进行对比和验证<sup>[23-27]</sup>,例如 Albigel 等<sup>[28]</sup>利

用非洲、澳大利亚、欧洲、美国的200多个台站土壤湿度资料对比分析了欧洲卫星气象中心中的土壤水分指数(SM-DAS-2)产品、C波段微波散射计(Advanced Scatterometer, ASCAT)和欧空局的土壤水分和海洋盐度卫星(Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS)的时间序列,得到的3种产品均能较好地捕获土壤湿度的年际变化,但是SMOS受植被的影响较大。Chen等<sup>[29]</sup>利用中国青藏高原的2个土壤湿度/温度监测信息网数据评估了美国国家航空航天局的土壤水分主被动卫星(Soil Moisture Active and Passive, SMAP)数据、SMOS和先进微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR2)产品的精度,结果表明SMAP低估了这2个区域的土壤湿度,但对于振幅和短时变化的捕捉较好,SMOS在那曲表现较好,但在帕里较差,AMSR2高估了那曲土壤湿度的短时变化。An等<sup>[30]</sup>利用气象站实测数据测评了欧空局气候变化倡议项目(ESA CCI)必要气候变量土壤湿度数据产品的主、被动融合的土壤湿度产品(Essential Climate Variables\_Soil Moisture, ECV\_SM V0.1),结果显示土壤湿度在稀疏草地的相关性最强。而González-Zamora等<sup>[31]</sup>利用西班牙实测资料对ESA CCI土壤湿度产品(主动、被动和融合产品)进行了测评,结果得到3种产品的表现均较好,其中融合产品对短期变化和季节变动都捕捉得很好,但是在湿润季节存在明显高估,干旱季节则存在明显的低估。

本文基于ISMN中国区域的土壤湿度资料和中国气象局农气数据集,对比分析了同时间段ESA CCI的4种土壤湿度产品(包括主动产品(ACTIVE)、被动产品(PASSIVE)、融合产品(COMBINED)、校正的融合产品(COMBINED ADJUSTED))在中国东部的表现能力,为更深刻地理解不同卫星产品数据集的误差结构和特性,为利用遥感数据产品在单站和区域尺度的研究和应用提供重要的证据支持和科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 ESA CCI 土壤湿度产品

ESA致力于生成ECV的相关数据产品,包括云、火、温室气体、土地覆盖、雪盖、海洋颜色、臭氧、海冰、海平面、海表温度、土壤湿度等。其中土壤湿度产品(CCI SM)可以提供长达40多年(1978—2021年)的全球土壤湿度数据,用于气候研究和应用<sup>[32-33]</sup>。CCI SM产品经过了许多版本的更新,例如版本v03.2引入了SMOS卫星,减少了产品的偏

差和方差<sup>[31]</sup>；版本 v05.2 改进了反演算法,改进了被动产品中 AMSR-2 卫星中的相互校准问题,同时引入了 SMAP 卫星的土壤湿度数据；自 v06.1 以来,ESA CCI SM 同时新增了一个基于融合数据集的辅助产品,即以再分析土壤湿度数据作为参考数据集进行突变检测和校正的融合产品。

本文用于验证的数据来自于最新版本为 v07.1,该产品可以提供 1978—2021 年全球格点分布的土壤湿度数据,空间分辨率是 0.25°,时间分辨率为 1 d。开放于 2022 年 5 月,该版本新增加了 3 个主动和被动传感器(包括风云 3C(Fengyun, FY-3C),FY-3D 和 ASCAT-C 传感器),首次融合了所有传感器的上升和下降通道的观测数据,并且被证实是目前最精确的 ESA CCI SM 数据产品。该版本可提供 4 类土壤湿度产品,包括合成的主动微波遥感数据集、合成的被动微波遥感数据集、融合了主被动微波遥感的数据集和更新后的融合数据集；其中被动遥感数据产品包括 SMMR, DMSP SSM/I, Aqua ASMR-E, TRMM TMI, Coriolis WindSat, SMOS, GCOM-W1 AMSR2, SMAP, GPM, FY-3B, FY-3C, 和 FY-3D 传感器的数据,主动微波遥感土壤湿度产品包括来自 AMI-WS ESR1/2, MetOp ASCAT A&C 和 ASCAT B 传感器的数据。在分别生成主动、被动产品的基础上,通过尺度转换、Triple-Collocation 融合方法和数据融合,生成融合数据产品,并进一步生成突变检测和校正的融合数据集。CCI SM 的被动和融合产品的土壤湿度为体积含水量,主动产品则为土壤相对湿度。

1.2 土壤湿度观测数据

1.2.1 ISMN 土壤湿度产品

ISMN(<https://ismn.earth/en/>)是在国际合作的基础上建立和维护全球台站观测土壤湿度的数据库,在 ESA 的财政支持以及世界各地科学家和网络的捐款支持下成立和维护,可用于验证和改进全球卫星遥感数据产品、陆面模型、气候模型和水文模型。笔者从该网站下载了 1981—1999 年中国区域的土壤体积水含量,观测深度分别为 0~5 cm 和 5~10 cm。

1.2.2 中国农气站土壤湿度数据集

此外,还有一部分土壤湿度观测数据来自中国国家气象信息中心的“中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集”,该数据集记录了中国区域 778 个农气站 1991—2013 年逐旬的作物生长状况、土壤湿度等变量。原则上每旬测量一次(即每月 8、18 和 28 日),且冬季缺测较多,数据没有经过质量控制,质量一般。该数据集利用烘干法测量了 10 cm, 20 cm, 50 cm, 70 cm 和 100 cm 的土壤相对湿度。

1.2.3 土壤水分质量百分比

除了土壤相对湿度,中国国家气象信息中心同时记录了 1981—1998 年期间的土壤水分的质量百分比、田间持水量和土壤容重。该数据依然是每旬测定一次,分别测量了 11 层深度的土壤湿度,即 [0, 5) cm, [5, 10) cm, [10, 20) cm, [20, 30) cm, [30, 40) cm, [40, 50) cm, [50, 60) cm, [60, 70) cm, [70, 80) cm, [80, 90) cm, 和 [90, 100] cm。田间持水量与土壤质地有关,表征充分灌溉并稳定下来后,土壤所能维持的稳定的体积分数。在土壤类型没有经过特别改变的情况下,田间持水量和土壤容重可以视为常数。

1.2.4 中国东部长时间序列土壤湿度数据集的构建

由前文得到,土壤湿度的表现形式有体积百分比、质量百分比、相对湿度等,为了统一单位并进行对比验证,将所有土壤湿度的单位换算成土壤体积含水量,换算公式为:

$$\theta_v = \theta' \times \theta_f \times \rho_b / \rho_w, \tag{1}$$

式中:  $\theta_v$  为土壤体积含水量,单位是  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\theta'$  为土壤相对湿度,单位是%;  $\theta_f$  为田间持水量,单位是  $\text{g}/\text{g}$ ;  $\rho_b$  为土壤容重,单位是  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_w$  为水的密度,数值为  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b / \rho_w, \tag{2}$$

式中  $\theta_m$  为土壤水分的质量百分比,单位是%。

为构建长时间序列的土壤湿度数据集,我们将不同来源获得的观测土壤湿度数据整合成一个数据集,时间范围从 1981—2013 年。台站观测数据最终选取 10 cm 土壤体积含水量作为验证对象,为了保持深度统一,整合数据集的步骤如下:

1) 分别根据公式(1~2)和观测的田间持水量、土壤容重求得对应台站的土壤体积含水量。

2) 为计算不同台站 10 cm 处的土壤体积含水量,ISMN 的土壤湿度是将 [0, 5) cm 和 [5, 10) cm 的数值进行平均获得 10 cm 的土壤湿度;中国国家气象信息的质量百分比数据则是将 [0, 10) cm 和 [10, 20) cm 的深度进行线性换算,获得 10 cm 的土壤湿度。

3) 根据时间范围进行整合,ISMN 数据的时间范围是 1981—1999 年,中国农气站的土壤湿度数据的时间范围是 1991—2013 年;在整合的时候,如果时间不重复或者某一个时间点只有一个观测值,则使用这个观测值;如果出现时间重合,即某一个时间点有多个观测值的情况,则用这些数据的算术平均值作为该时刻的最终值。



1.3 研究区域

为了获得长序列的土壤湿度资料并保持单位统一,需要用观测的田间持水量和土壤容重作为换算的中间变量,获得的可用于验证的台站数为 119 个,其地理位置和下垫面分布详见图 1。图 1(a)中可见,可用于验证的台站主要分布在中国东部地区,此外,将台站密集的地区划分为 4 个主要研究区域,包括中国东北(NE)、华北(NC)、西北(NW)和江淮(YH),这 4 个地区也分别对应着湿润半湿润区、半湿润区、过渡区和湿润区。图 1(b)展示了来自于中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging

Spectroradiometer, MODIS)2013 年的土地利用覆盖数据(MCD12C1)<sup>[34]</sup>,东北地区东部主要覆盖着落叶阔叶林和落叶阔叶林,中部覆盖着农田,西部主要覆盖着草地。华北地区的西北部主要覆盖着草地,东南部主要覆盖着农田,并零星覆盖着城市和城市群。在华北地区的东北和东北地区的西南,零星覆盖着较密集的大型城市群。西北地区主要指我国的西北地区东部,在其北部为较贫瘠地区,中部覆盖着草地和农田,东南部覆盖着较小范围的落叶阔叶林和混合森林。而在江淮地区,则主要覆盖着草地和灌木丛草原,同时零星覆盖着城市。

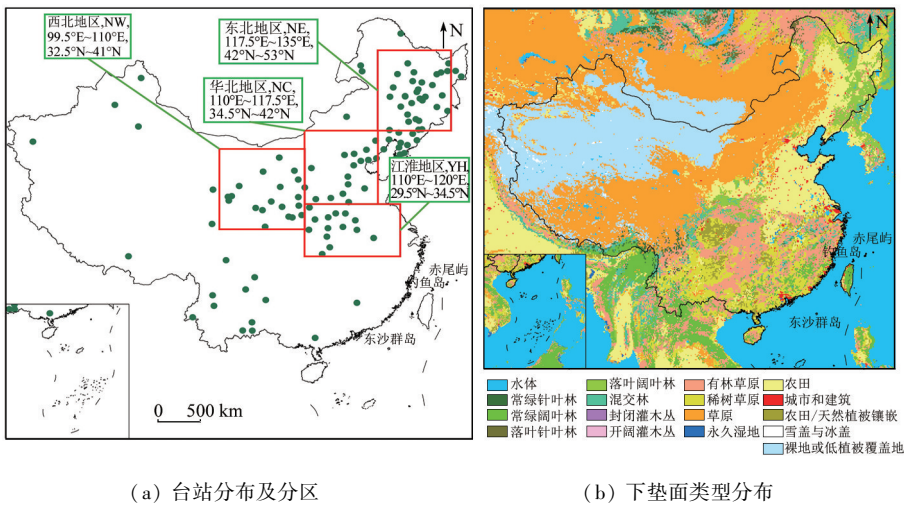


图 1 土壤湿度观测站点分布、分区及下垫面类型分布(审图号:GS 京(2024)2618 号)

Fig.1 Spatial distribution of soil moisture observation stations and four research regions, as well as land surface types

1.4 验证方法

本文利用偏差(Bias),相对偏差(rBias),均方根误差(RMSD),相对均方根误差(rRMSD),无偏均方根误差( $\mu bRMSD$ ),斯皮尔曼相关系数( $R_s$ )等统计变量来验证不同类型遥感产品的准确性,公式如下:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}, \quad (3)$$

$$rBias = \frac{Bias}{\bar{x}}, \quad (4)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

$$rRMSD = \frac{RMSD}{\bar{x}}, \quad (6)$$

$$\mu bRMSD = \sqrt{RMSD^2 - Bias^2}, \quad (7)$$

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

式中: $x_i$ 为台站观测数据(单位: $m^3/m^3$ ), $y_i$ 为卫星遥感的数据产品(单位: $m^3/m^3$ ), $n$ 为数据的数量, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示观测与产品的平均值。 $Bias$ (单位: $m^3/m^3$ )和 $rBias$ (单位:%)表征了卫星遥感产品相对于台站观测的偏离程度,绝对值越低表明遥感产品的精度越高; $RMSD$ (单位: $m^3/m^3$ )和 $rRMSD$ (单位:%)表征产品和台站观测值之间的离散程度,值越小表示观测值与真值越贴合; $\mu bRMSD$ (单位: $m^3/m^3$ )则去除了数据自身均值的影响,表征产品与台站观测之间的变化趋势的一致性,值越小表明观测与真值的变化趋势越接近。相关系数 $R_s$ 则表征 2 组数据间的线性相关程度,绝对值越高表明 2 组数据的相关性越强,皮尔逊相关系数适用于线性相关。

为了分析土壤湿度产品相对于台站观测的误差来源,引入了均方误差分解方法(MSE)对产品的误差进行了分解,以量化相关系数项、标准差项和偏差项的贡献<sup>[35-36]</sup>分别对应土壤湿度产品与观测值之间的相关性、数据变幅的相似程度和产品的准确性。计算公式为:



$MSE = 2\sigma_x\sigma_y(1-R_s) + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\bar{x} - \bar{y})^2, (9)$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, (10)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}, (11)$$

式中： $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别表示观测值和产品的标准差(单位： $m^3/m^3$ )。在获得了台站分布的数据的基础上，验证卫星遥感数据的步骤如下：

- 1)在验证对应站点的值时,挑选离站点所在位置最近的网格点的值作为相对应的站点值。
- 2)在分析空间分布特征时,以单站站点及其对应值作为研究对象进行分析。
- 3)在分析区域平均的土壤湿度的时间演变特征时,先将台站观测数据和卫星遥感数据进行面积

平均获得区域平均值,再进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤湿度产品及其误差的空间分布特征

图 2 展示了 1992—2013 年生长季节多年平均的土壤湿度的空间分布,由于积雪、冰冻等因素的影响,此处只平均了 4—9 月的土壤湿度数据;此外,由于主动产品集的数据起始时间是 1991 年 8 月,选择 1992 年作为验证的起始时间。从观测数据来看,土壤湿度呈现东北高、西北低、江淮高的空间分布特征。主动产品明显低估了土壤湿度值,被动数据在东北、西南地区明显高估了土壤湿度,在华北和西北地区则表现较好。融合数据和校正了的融合数据产品和台站观测的一致性较强,且未体现出明显的偏差。

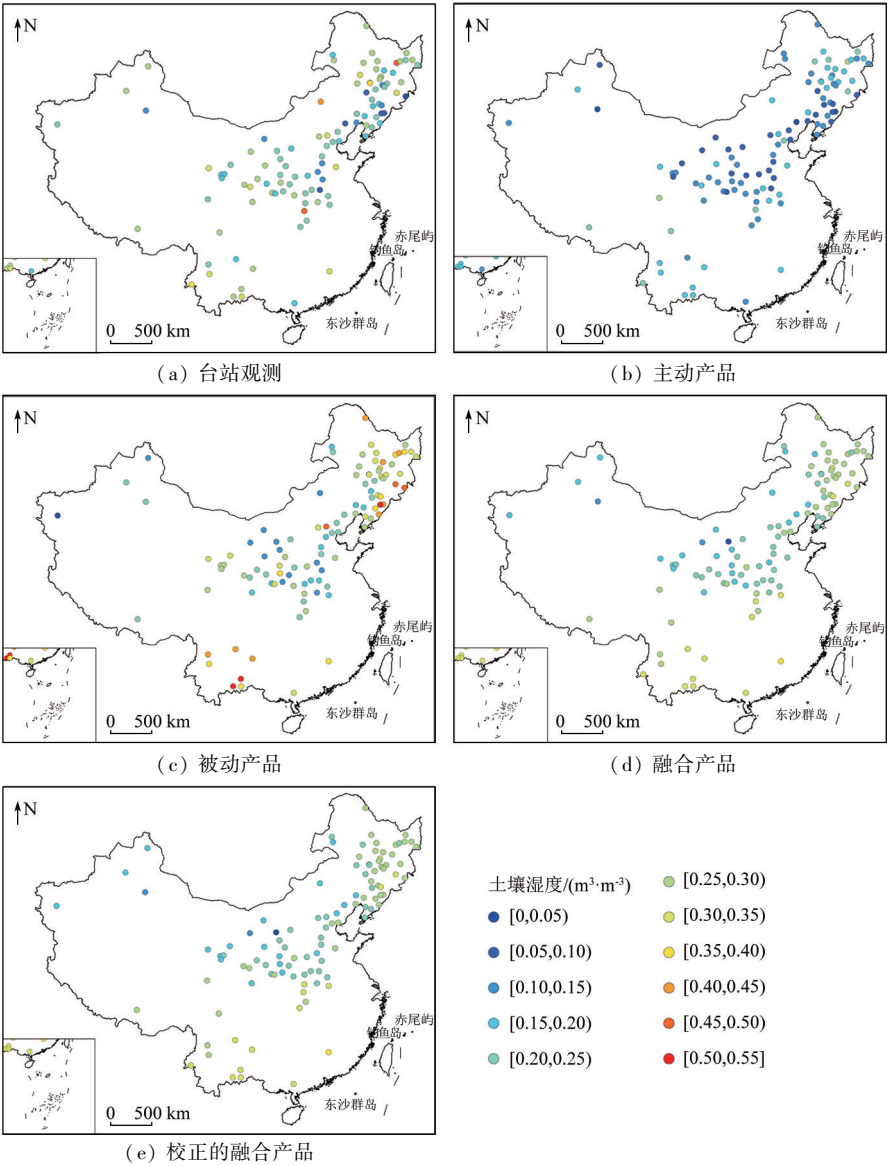


图 2 1992—2013 年生长季节(4—9 月)平均的土壤湿度的空间分布(审图号: GS 京(2024)2618 号)

Fig.2 Spatial distribution of soil moisture during growing seasons (from April to September) for the period of 1992 to 2013

图 3、图 4 分别为 1992—2013 年生长季节多年平均的土壤湿度产品和台站观测产品偏差和  $\mu\text{bRMSE}$  的空间分布。可以得到,主动产品在 4 个研究区均低估了土壤湿度值,平均偏差为  $-0.09\text{ m}^3/\text{m}^3$  左右,相对偏差约为  $-36.4\%$ ;主动产品的最高偏差分布在华北和西北地区,相对偏差分别达到  $-30.9\%$  和  $-29.6\%$ ,东北地区 and 江淮地区由于土壤湿度数据本身很大,相对偏差则较小,数值分别为  $-21.4\%$  和  $-25.8\%$ 。被动数据产品在东北、华北和西北地区高

估了土壤湿度,相对偏差分别为  $39.1\%$ ,  $7.5\%$  和  $26.5\%$ ,在江淮地区则低估了土壤湿度。融合产品和校正了的融合产品可以很好地改进东北地区 and 西北地区主动产品低估、被动产品高估的现象,相对偏差分别减少到  $24.3\%$  和  $3.7\%$ 。在华北、江淮地区,被动产品的偏差明显小于主动产品,融合产品虽然较主动产品的偏差有所改进,但相对偏差较被动产品则有所提高。值得一提的是,在东北地区南部,两类融合数据产品的偏差依然很大,没有明显的改善。

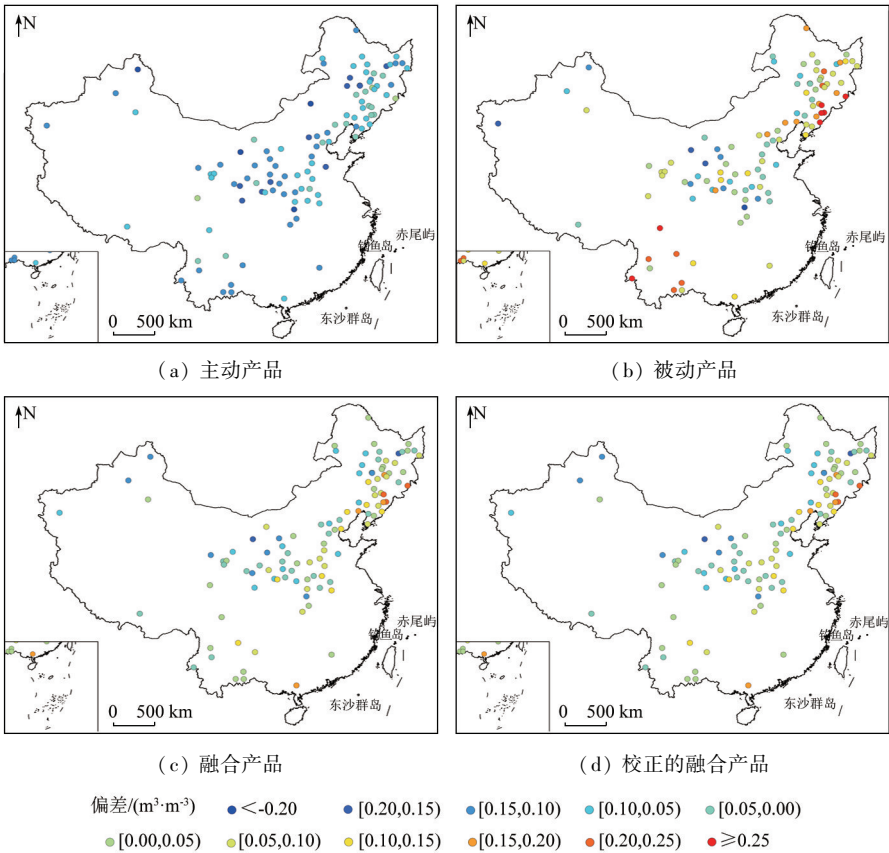


图 3 1992—2013 年 4—9 月卫星遥感产品和台站观测的偏差空间分布 (审图号: GS 京 (2024) 2618 号)

Fig.3 Spatial distribution of the bias of soil moisture during growing seasons ( from April to September) for the period of 1992 to 2013

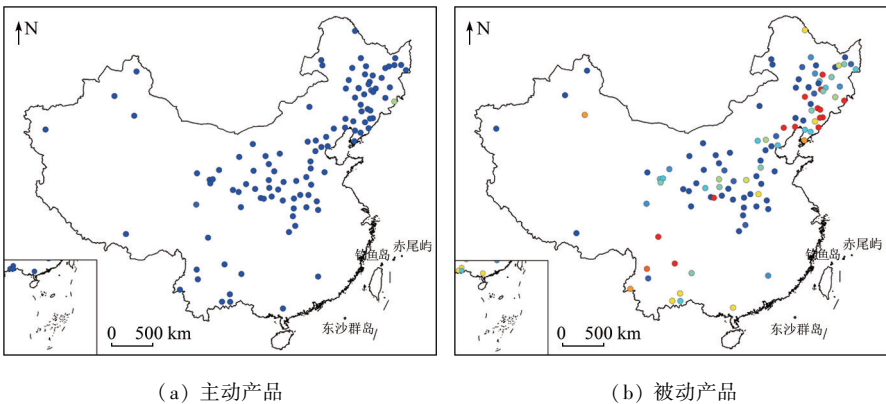


图 4-1 1992—2013 年 4—9 月卫星遥感产品和台站观测的  $\mu\text{bRMSE}$  的空间分布 (审图号: GS 京 (2024) 2618 号)

Fig.4-1 Spatial distribution of  $\mu\text{bRMSE}$  of soil moisture during growing seasons ( from April to September) for the period of 1992 to 2013

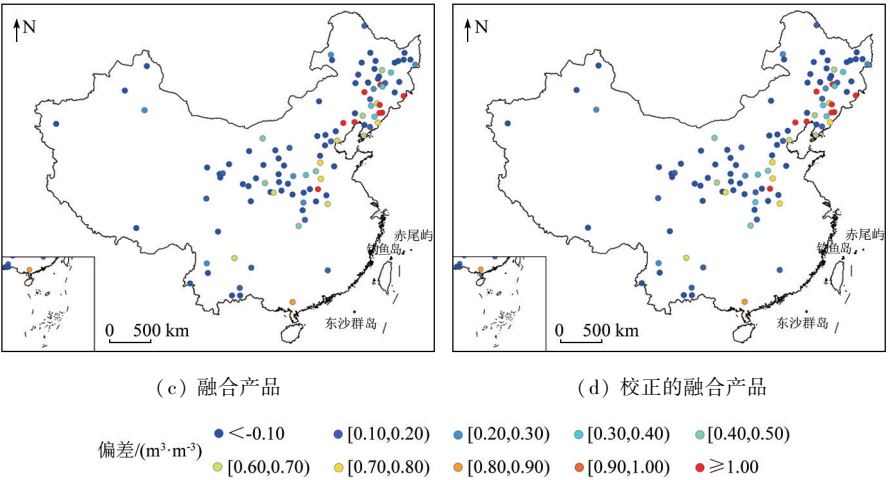


图 4-2 1992—2013 年 4—9 月卫星遥感产品和台站观测的  $\mu bRMSE$  的空间分布 (审图号: GS 京 (2024) 2618 号)

Fig.4-2 Spatial distribution of  $\mu bRMSE$  of soil moisture during growing seasons (from April to September) for the period of 1992 to 2013

从相对均方根误差来看,被动产品的偏差最大,其次是主动产品,最后是融合产品,表明融合产品能够更好地体现不同区域的土壤湿度随时间的变化特征。而融合以后的产品对东北地区和华北地区的改进更大、其次是江淮地区,对江淮流域的动态演变特征还未能很好地刻画。从无偏均方根误差看,被动产品的误差最大,其次是融合产品,主动产品的误差值最小,表明主动产品在描述土壤湿度的变化特征

的能力优于其他产品。从区域上来看,主、被动产品均在西北地区的误差最大,其次是东北和江淮地区,最后是华北地区。

图 5 展示了 1992—2013 年不同季节卫星遥感产品和台站观测的泰勒图分布,其中生长季节设置为每年的 4—9 月。整体而言,所有产品在中国夏、秋季表现更优,春季次之,冬季最差,这可能与冬季土壤水分含量较低,且易受降雪、冻土等因素影响有

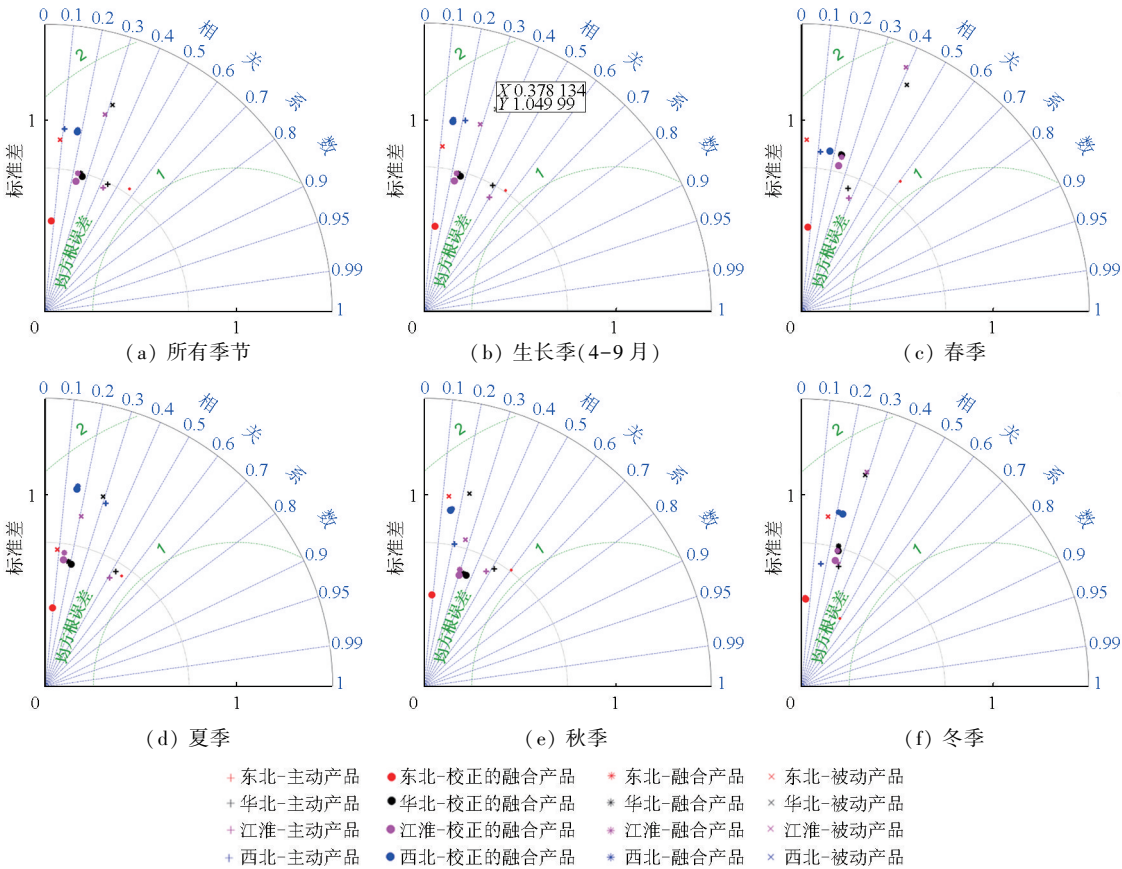


图 5 1992—2013 年 4—9 月卫星遥感产品和台站观测的泰勒图分布

Fig.5 Taylor diagram of remotely sensed products and observations for the period of 1992 to 2013



关。除了冬季以外,江淮地区和华北地区的相关系数表现更优。就标准差而言,被动产品在东北地区表现更佳,此外,主动产品、融合产品及校正的融合产品在东北地区的表现亦优于其他产品。融合产品和校正了的融合产品的均方根误差明显小于主动产

品和被动产品,且在西北地区均方根误差最大。主动产品在东北、华北和江淮地区的相关系数明显高于被动产品和综合类产品,而在西北地区,主动产品在表现相关性方面没有明显的优势,融合类产品的相关系数高于主动产品,具体统计值见表 1。

表 1 不同区域不同产品的统计值

| Tab.1 Correlation coefficients, biases, and RMSDs of the five data sets for growing seasons from 1981 to 2013 |       |             |              |             |              |             |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------|
| 区域                                                                                                            | 产品    | <i>Bias</i> | <i>rBias</i> | <i>RMSD</i> | <i>rRMSD</i> | $\mu bRMSD$ | <i>R</i> |
| 东北                                                                                                            | 主动产品  | -0.066      | -21.4%       | 0.103       | 42.7%        | 0.079       | 0.41     |
|                                                                                                               | 被动产品  | 0.056       | 39.1%        | 0.128       | 52.8%        | 0.115       | 0.16     |
|                                                                                                               | 融合产品  | 0.022       | 24.3%        | 0.095       | 41.4%        | 0.092       | 0.15     |
|                                                                                                               | 校正后融合 | 0.022       | 24.3%        | 0.095       | 41.4%        | 0.092       | 0.15     |
| 华北                                                                                                            | 主动产品  | -0.085      | -30.9%       | 0.112       | 45.5%        | 0.072       | 0.38     |
|                                                                                                               | 被动产品  | 0.002       | 7.5%         | 0.094       | 41.1%        | 0.094       | 0.27     |
|                                                                                                               | 融合产品  | 0.024       | 20.3%        | 0.085       | 37.6%        | 0.081       | 0.22     |
|                                                                                                               | 校正后融合 | 0.030       | 22.8%        | 0.085       | 37.9%        | 0.080       | 0.23     |
| 江淮                                                                                                            | 主动产品  | -0.084      | -29.6%       | 0.113       | 45.1%        | 0.076       | 0.41     |
|                                                                                                               | 被动产品  | -0.007      | 3.6%         | 0.101       | 41.8%        | 0.100       | 0.23     |
|                                                                                                               | 融合产品  | 0.039       | 26.4%        | 0.097       | 41.0%        | 0.089       | 0.16     |
|                                                                                                               | 校正后融合 | 0.046       | 29.8%        | 0.099       | 41.9%        | 0.087       | 0.15     |
| 西北                                                                                                            | 主动产品  | -0.075      | -25.8%       | 0.106       | 43.1%        | 0.076       | 0.26     |
|                                                                                                               | 被动产品  | 0.041       | 26.5%        | 0.145       | 61.3%        | 0.139       | 0.07     |
|                                                                                                               | 融合产品  | -0.009      | 3.7%         | 0.087       | 36.1%        | 0.087       | 0.15     |
|                                                                                                               | 校正后融合 | -0.005      | 5.6%         | 0.086       | 35.8%        | 0.086       | 0.15     |

2.2 土壤湿度产品的时间分布特征

图 6 展示了 1981—2013 年 4—9 月区域平均的月土壤湿度随时间的演变,由于主动产品从 1992 年开始有数据,故统计相关的特征量只计算有数据的时间段。总体而言,4 种土壤湿度产品在江淮地区的再现能力最高。在东北地区,不同类型土壤湿度产品和台站观测有较明显的系统性偏差,其中被动

产品偏高,校正前后的融合产品次之,主动观测产品的值最低;主动产品、被动产品、融合产品和校正的融合产品和台站观测的平均偏差( $\mu bRMSD$ )分别为 -0.066(0.036),0.088(0.028),0.048(0.019)和 0.048(0.019)。被动产品、融合产品和校正的融合产品与台站的相关系数分别为 0.44,0.47 和 0.47,主动产品的相关系数未通过显著性检验。华北地区未

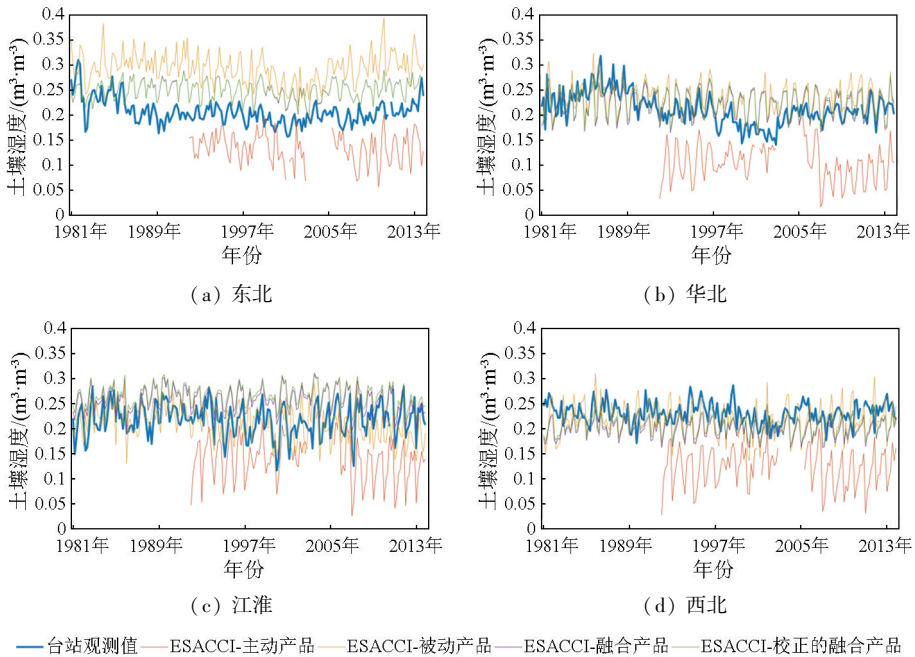


图 6 1981—2013 年 4—9 月区域平均的月土壤湿度随时间的演变  
Fig.6 Time series of soil moisture in four regions from 1981 to 2013

出现明显的系统性偏差,但被动产品和校正前后的融合产品高估了土壤湿度,主动产品则相对低估了台站观测,平均偏差 ( $\mu\text{bRMSD}$ ) 分别为  $-0.096$  ( $0.040$ ),  $0.031$  ( $0.030$ ),  $0.022$  ( $0.029$ ) 和  $0.026$  ( $0.029$ )。在华北地区,被动产品和校正前后的融合产品的相关系数分别为  $0.38, 0.34$  和  $0.35$ 。4 种产品在江淮流域的相关性最高,时间相关系数分别为  $0.61, 0.45, 0.64$  和  $0.66$ ,偏差 ( $\mu\text{bRMSD}$ ) 分别为  $-0.063$  ( $0.045$ ),  $0.001$  ( $0.040$ ),  $0.056$  ( $0.029$ ) 和  $0.065$  ( $0.027$ )。西北地区的相关性较差,4 种产品较台站观测整体偏差较小,偏差 ( $\mu\text{bRMSD}$ ) 分别为  $-0.078$  ( $0.037$ ),  $0.012$  ( $0.039$ ),  $-0.000$  ( $0.019$ ) 和  $0.004$  ( $0.018$ )。

2.3 土壤湿度产品的误差分解

图 7 展示了 1981—2013 年 4—9 月区域平均的月土壤湿度产品的误差分解,其中蓝色、橙色和灰色分别代表了误差的相关系数项、标准差项和偏差项。除了东北地区,主动产品的均方根误差最大,被动产品次之,融合类产品最小。主动产品的误差主要来源于偏差项,尤其是在西北地区和华北地区达到最大,占总方差的 85% 以上。被动产品的表现差异则比较大,在东北地区,偏差项高达总方差的 87.9%,而在华北、江淮和西北地区,偏差项则较低,占比分别为 22.1%, 6.18% 和 12.9%。除了江淮地区,融合产品的表现优于其他产品,尤其是西北地区,校正了的融合产品明显优于没有校正前的融合产品。区域平均以后的主动产品的相关系数明显低于单站,被动产品和融合产品的相关系数却有所增高,可见在区域尺度上选择产品时需更加谨慎。经过校正后的融合产品在江淮地区的方差没有降低,反而升高了,这可能需要做进一步的讨论和验证。

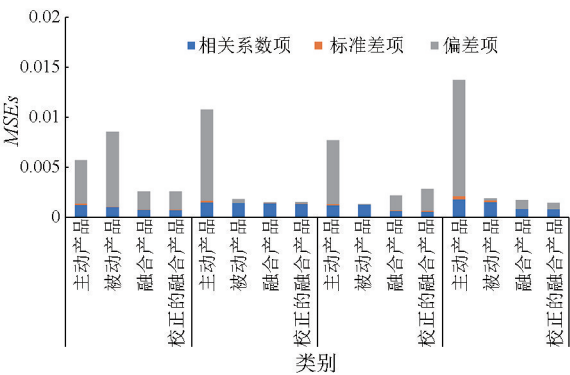


图 7 1981—2013 年 4—9 月区域平均的月土壤湿度产品的误差分解

Fig.7 The decomposition of three terms to the mean square errors (MSEs) for the four satellite products from 1981 to 2013

3 讨论

3.1 设备更替对土壤湿度产品质量的影响

由于设备老化、故障等因素,卫星及其传感器的工作年份会受到限制;同时由于算法更新和设备进步等原因,不同机构会将新的遥感设备发射至太空进行监测。为了实现长时间序列这一目标,ESA 将监测获得的土壤湿度资料进行了处理和集成,获得了新的集成数据产品。为了验证设备更替对土壤湿度产品质量的影响,本文根据不同产品引入主、被动传感器的时间进行了分段,详见表 2。主动产品分成了 5 个时间段,前 3 个时间段为 1992 年 1 月—2006 年 12 月,为 ERS1/2(AMI-WS)传感器,后 2 个时间段为 2007 年 1 月—2012 年 11 月和 2012 年 11 月—2013 年 12 月,为 ASCAT 传感器。被动产品时间段的划分相对复杂一些,自 1992 年 1 月—1997 年 12 月使用 SSM/I(a/d)传感器以来,于 1998 年 1 月、2002 年 7 月、2007 年 10 月、2010 年 1 月、2011 年 6 月、2011 年 9 月、2012 年 7 月和 2013 年 10 月分别添加了 TMI(a/d)、AMSR-E(a/d), WindSat(a/d), SMOS(a/d), FY3B(a/d), AMSR2(a/d)和 FY-3C(a/d)传感器,因此将被动产品划分了 9 个时间段。结合主动产品和被动产品的时间段,将融合产品划分成 11 个时间段,其每个时间段的主被动传感器见表 2。和前面的工作保持一致,本节依然选取生长季 4—9 月的数据进行统计,此外,由于校正了的融合产品和传感器的时间划分有所出入,本节只对比分析主动产品、被动产品和融合产品,校正的融合产品则放在下节进行讨论。

图 8 展示了主动产品、被动产品和融合产品月土壤湿度在不同时间段不同研究区域(东北、华北、江淮、西北地区)的误差分解。总体而言,所有研究区域融合产品的均方根误差较主动产品和被动产品有明显的改善,东北、西北地区被动产品的均方根误差大于主动产品,华北、江淮地区则是主动产品的均方根误差大于被动产品。在东北地区,3 个产品的相关系数项占了均方根误差的较大比重,被动产品的相关系数项和偏差项的再现能力均较差,主动产品次之,而融合产品可以很好地解决偏差带来的误差,但却在一定程度上增加了标准差项所占的比重。

不同时间段的主动产品在东北和西北地区的表现较一致,但在华北和江淮地区有较大的差异。在 ERS1/2 (AMI-WS)传感器使用早期,华北和江淮地区存在较大的标准差,随着时间的演变,第二阶段和第三阶段标准差逐渐减小,相关系数和偏差项也相

表 2 ESA CCI SM 产品验证时间分段及其包括的传感器罗列  
Tab.2 Time segments and list of sensors for ESA CCI SM products

| 产品类型 | 时间段                     | 主动传感器                        |                                                                | 被动传感器 |
|------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------|
| 主动产品 | 1992 年 01 月—1997 年 05 月 | ERS1/2 (AMI-WS)              | N/A                                                            |       |
|      | 1997 年 05 月—2003 年 02 月 | ERS2 (AMI-WS)                | N/A                                                            |       |
|      | 2003 年 02 月—2006 年 12 月 | ERS1/2 (AMI-WS)              | N/A                                                            |       |
|      | 2007 年 01 月—2012 年 11 月 | Metop-A ASCAT                | N/A                                                            |       |
|      | 2012 年 11 月—2013 年 12 月 | Metop-A ASCAT, Metop-B ASCAT | N/A                                                            |       |
| 被动产品 | 1992 年 01 月—1997 年 12 月 | N/A                          | SSM/I (a/d)                                                    |       |
|      | 1998 年 01 月—2002 年 06 月 | N/A                          | SSM/I (a/d), TMI (a/d)                                         |       |
|      | 2002 年 07 月—2007 年 09 月 | N/A                          | AMSR-E (a/d), TMI (a/d)                                        |       |
|      | 2007 年 10 月—2010 年 01 月 | N/A                          | AMSR-E (a/d), Windsat (a/d), TMI (a/d)                         |       |
|      | 2010 年 01 月—2011 年 05 月 | N/A                          | AMSR-E (a/d), WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d)             |       |
|      | 2011 年 06 月—2011 年 09 月 | N/A                          | AMSR-E (a/d), WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d), FY3B (a/d) |       |
|      | 2011 年 10 月—2012 年 06 月 | N/A                          | WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d)              |       |
|      | 2012 年 07 月—2013 年 09 月 | N/A                          | SMOS (a/d), AMSR2 (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d)                |       |
|      | 2013 年 10 月—2013 年 12 月 | N/A                          | SMOS (a/d), AMSR2 (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d), FY-3C (a/d)   |       |
| 融合产品 | 1992 年 01 月—1997 年 12 月 | AMI-WS                       | SSM/I (a/d)                                                    |       |
|      | 1998 年 01 月—2002 年 06 月 | AMI-WS                       | SSM/I (a/d), TMI (a/d)                                         |       |
|      | 2002 年 07 月—2006 年 12 月 | AMI-WS                       | AMSR-E (a/d), TMI (a/d)                                        |       |
|      | 2007 年 01 月—2007 年 09 月 | Metop-A ASCAT                | AMSR-E (a/d), TMI (a/d)                                        |       |
|      | 2007 年 10 月—2010 年 01 月 | Metop-A ASCAT                | AMSR-E (a/d), Windsat (a/d), TMI (a/d)                         |       |
|      | 2010 年 01 月—2011 年 05 月 | Metop-A ASCAT                | AMSR-E (a/d), WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d)             |       |
|      | 2011 年 06 月—2011 年 09 月 | Metop-A ASCAT                | AMSR-E (a/d), WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d), FY3B (a/d) |       |
|      | 2011 年 10 月—2012 年 06 月 | Metop-A ASCAT                | WindSat (a/d), SMOS (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d)              |       |
|      | 2012 年 07 月—2012 年 10 月 | Metop-A ASCAT                | SMOS (a/d), AMSR2 (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d)                |       |
|      | 2012 年 11 月—2013 年 09 月 | Metop-A ASCAT, Metop-B ASCAT | SMOS (a/d), AMSR2 (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d)                |       |
|      | 2013 年 10 月—2013 年 12 月 | Metop-A ASCAT, Metop-B ASCAT | SMOS (a/d), AMSR2 (a/d), TMI (a/d), FY-3B (a/d), FY-3C (a/d)   |       |

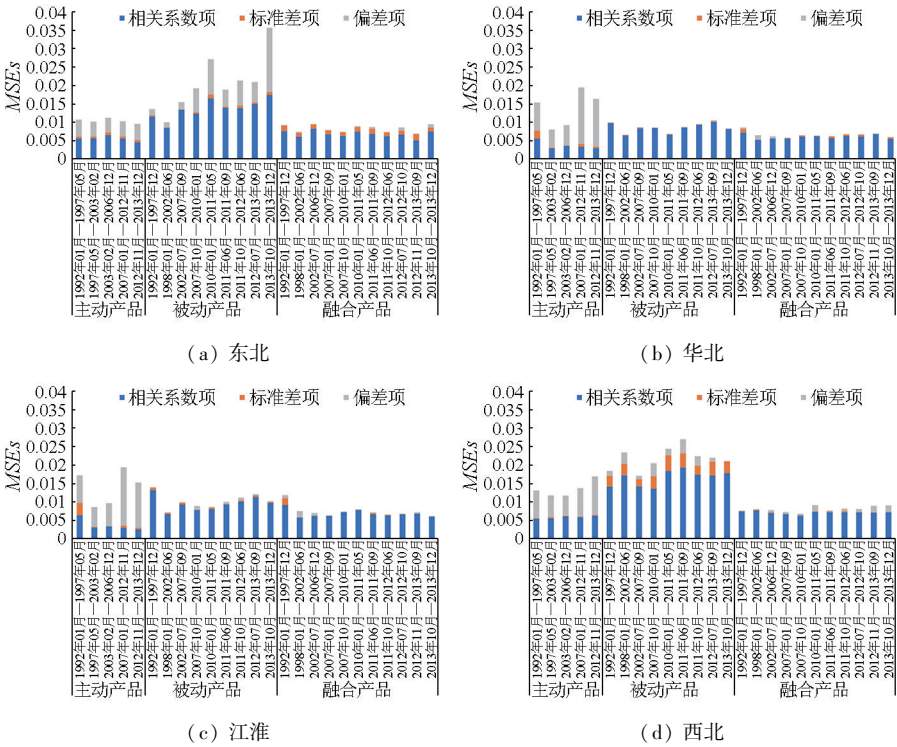


图 8 主动产品、被动产品和融合产品月土壤湿度在不同时间段不同研究区域的误差分解

Fig.8 The decomposition of three terms to the mean square errors (MSEs) for the four satellite products from 1992 to 2013 over different regions during different time segments



应减少。相比较而言, Metop-A ASCAT 传感器获得的主动产品可以增加土壤湿度的相关系数, 但是也带来了较大的偏差。

被动产品误差的主要贡献项是相关系数项, 这表明被动传感器在再现土壤湿度的变化特征方面还有一定的差距。被动产品在华北和江淮地区的表现优于西北和东北区域, 其主要方差的贡献是相关系数项, 偏差项的贡献很小, 可见被动产品在体现土壤湿度的准确性方面更优。被动产品在东北地区的误差贡献来自于相关系数项和偏差项, 可见被动产品在东北地区的表现相对较差。而在西北地区, 被动产品的误差则主要来自于相关系数项和标准差项, 表明被动遥感产品体现西北地区土壤湿度的相似性还有待提高。被动产品在最后一个时间段表现不佳, 可能与选择的时间段(2013 年 10 月—2013 年 12 月)有一定的关系, 选取的时间只有 3 个月, 并且是冬季。

融合产品的整体方差明显优于主动产品和被动产品, 但是在相关系数方面, 融合产品在东北和西北地区与主动产品基本相当。融合产品的偏差项明显优于主、被动产品, 但是在东北地区标准差项有所提高。

3.2 突变检测和校正对土壤湿度产品质量的影响

由于 CCI SM 长时间序列数据集引入了多源传感器, 随着不同传感器特性的差异(如频率、极化等

特性), 多源传感器产生的组合产品可能会出现断裂, 尤其是不同传感器输入期间, 这种传感器的不同可能会引起产品的统计量, 比如趋势、极端值的改变。许多研究表明, 气候数据记录的结构性断裂会对科学分析的结论产生负面影响<sup>[37-38]</sup>, 因为无法区分科学分析得到的不均匀性和不连续性是自然发生的, 还是人为处理数据的过程中产生的, 因此需要对数据产品进行检测和校正。由于时间序列较短, 以往的研究并未过多地聚焦于土壤湿度的突变检测和校正, 自 v6 版本以来, ESA CCI SM 产品对 COMBINED 数据集开始进行突变检测和校正<sup>[39-40]</sup>。

本文选择了 6 个时间段分别分析经过校正和未经过校正的融合产品对土壤湿度产品质量的影响(图 9)。总体而言, 校正前后的产品的表现相当, 从误差分解来看并没有特别明显的改进。东北地区, 经过校正的融合产品略优于校正前, 校正后偏差有一定的改进, 相关系数项反而变差, 标准差项无明显变化。在华北和江淮地区校正后的产品误差略大于校正前, 且偏差项反而变差。根据 Preimesberger 等<sup>[39]</sup>的研究结果, 2010-01-15 传感器转换检测到的断点最少, 这可能是由于 2010 年后使用的 4 个传感器中的 3 个已经是前一个时间段中合并数据集的一部分, 这表明如果更多的传感器产品被替换或被其他传感器补充, 数据集的同质性会受到更多的影响, 而如果传感器集群保持相似, 则影响较小。

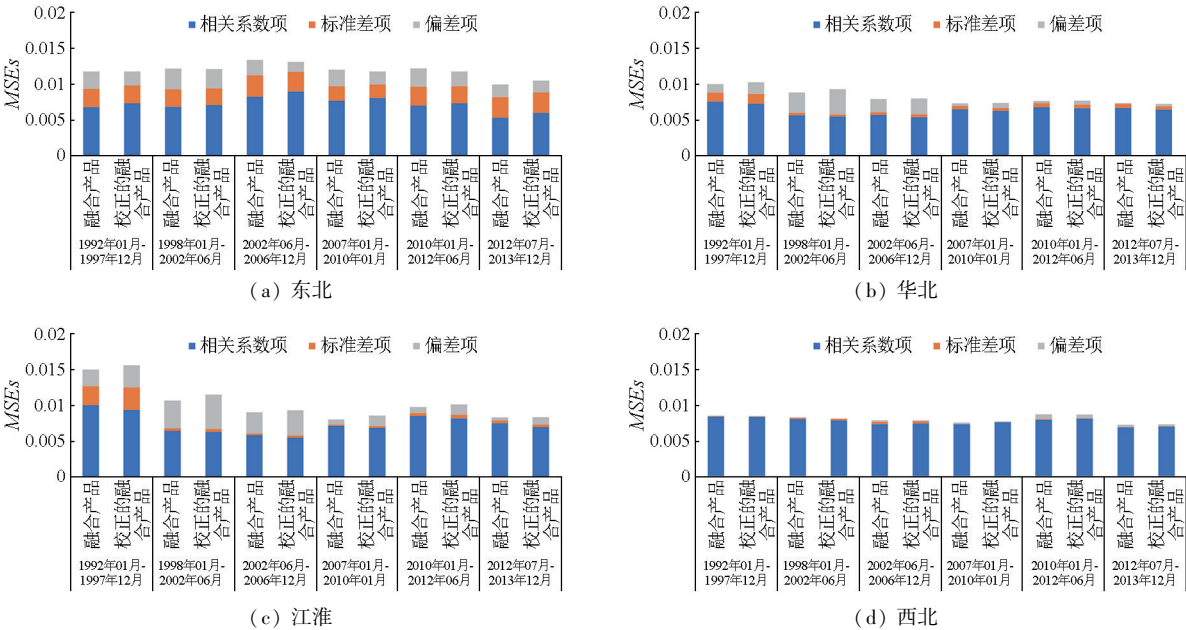


图 9 融合产品月土壤湿度校正前后不同区域的误差分解

Fig.9 The decomposition of three terms to the mean square errors (MSEs) for the COMBINED and ADJUSTED COMBINED products from 1992 to 2013 over different regions

3.3 土壤湿润程度对土壤湿度产品质量的影响

图 10 展示了 4 种产品在不同数值范围内的相

对偏差分布, 图中, A 为主动产品, P 为被动产品, C 为融合产品, CA 为校正了的融合产品。整体而言,

主动产品在所有区间范围内均低估了土壤湿度产品,被动产品和台站观测的偏差整体较高,校正前后的融合产品可以减小主、被动产品的偏差。在观测的土壤湿度小于  $0.2\text{ m}^3/\text{m}^3$  时,除了主动产品低估了土壤湿度值外,被动产品、融合产品和校正了的融合产品均呈现平均约 50% 的正偏差,校正前后的融合产品可以减少偏差的范围,但是平均偏差较被动产品没有改进,甚至高于主动产品的偏差的绝对值。在  $0.2\sim0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$  范围内,被动产品和融合产品的相对偏差均很小,而主动产品有大约 50% 左右的负

相对偏差。当土壤湿度大于  $0.3\text{ m}^3/\text{m}^3$  时,所有产品均低估了土壤湿度,主动产品的负偏差依然较大,被动产品的负偏差范围较大,而融合类产品可以缩小负偏差的范围和平均值。这也从一定程度上说明,主动产品在偏差方面的表现比较一致,均为系统性偏低;此外,在偏干的情况下,融合类产品易高估土壤湿度值,而在偏湿的情况下,产品则更易出现低估的现象,这一结论在其他相关工作中也得到了证实<sup>[20]</sup>。

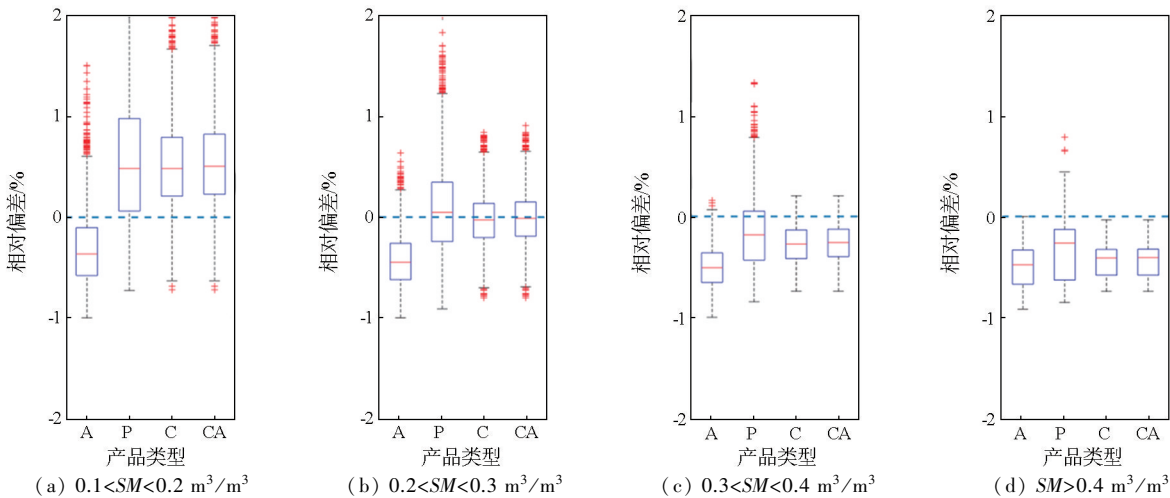


图 10 主动产品(A)、被动产品(P)、融合产品(C)和校正后的融合产品(CA)的月土壤湿度在不同数值范围的相对偏差分布

Fig.10 Relative bias of monthly soil moisture for ACTIVE, PASSIVE, COMBINED, and ADJUSTED COMBINED products in different numerical ranges

根据文献[39]的研究结果,校正前中国东北、江淮地区的最长均质性平均周期长度约为 12 a,西北、华北地区的平均周期长度约为 16~24 a;经过校正后,均质性最长年限平均增加 0~4 a,而在我国西北地区和华北地区可增加 4~8 a。Preimesberger 等的研究结果同时表明,经过突变检测和校验后,尽管去除了数据的不确定性,数据的偏差、(无偏)均方根差、相关性等只显示了很小的变化,且北半球土壤湿度的趋势变化几乎不受到影响,这意味着 CCI SM 的融合产品受到的影响较小,这也加强了人们对多源遥感数据进行融合的信心,增强了构建长期研究数据集的可行性。但同时也表明,在区域尺度上,进行校正后可以使得土壤湿度原来不明显的变化趋势变得更加显著,尤其是密集植被覆盖的地区。因此,在数据集使用的过程中,需根据实际情况进行调用和研究。总体而言,在利用 CCI SM 数据分析中国东部地区不同区域土壤湿度的时空演变特征时,融合产品是更好的选择,且在研究西北地区长期的演变趋势时,建议选择进行校正后的土壤湿度数据融合产品。在单站尺度上,如果侧重于土壤湿度的数值,华北和江淮地区的站点可以选择被动产品,东北

和西北地区建议选择融合产品进行分析;如果侧重于土壤湿度的动态演变,建议在融合产品的基础上同时选择主动产品进行分析。

CCI SM 产品主要获得的是浅层的土壤水分含量,具体的深度取决于融合的辐射传感器的特性,尤其是融合不同频率波段的传感器,和获得土壤特性的深度有密切关系:例如 L 波段主要获得的是表层 5 cm 的土壤,C 波段主要获得是表层 1 cm 的土壤<sup>[41]</sup>。用于验证的台站土壤湿度数据所在深度为 0~10 cm,也被认为是浅层的土壤湿度。虽然不同深度的土壤湿度数据验证可能会产生一定的系统性误差,但是由于浅层和表层土壤湿度呈显著相关,已有很多研究证明利用 10 cm 的土壤湿度数据进行验证是可行的<sup>[25,42]</sup>。

此外,下垫面的植被覆盖类型可能也会对不同传感器造成影响,比如频率越高,通过植被衰减的电磁波就会越大,因此,植被比较密集的区域,也可能是土壤湿度产品表现不太好的地区。这在一定程度上可以解释土壤湿度产品在我国东北地区生长季节精度相对较差。此外,土壤质地和类型也是造成土壤湿度反演效果不一的主要因子之一。

4 结 论

本研究利用构建的中国东部长时间序列的土壤湿度产品,对 ESA CCI SM v07.1 的主动产品、被动产品、融合产品、以及校正了的融合产品进行了评估,以分析这些遥感产品在不同空间尺度的表现能力,同时分析设备的更迭以及校正前后不同产品的表现能力,为研究者挑选不同类型的遥感产品提供一定的依据。得到的结论如下:

1) CCI SM 的 4 种产品均可以较好地描述中国东部的土壤湿度分布,主动产品倾向于低估土壤湿度,最高偏差主要分布在东北地区南部和江淮地区,数值可达 $-0.25\text{ m}^3/\text{m}^3$ ;而从相对偏差来看,最大偏差出现在华北和西北地区。被动产品则倾向于高估土壤湿度,尤其在中国东北、西南有明显的高估现象。融合产品和校正的融合产品表现相当,可以很好地再现土壤湿度的值,尤其在东北地区、西南地区这类主被动产品偏差较大的区域,改进效果明显。

2) 就区域平均的土壤湿度而言,融合类的产品表现更优,尤其在江淮地区,东北和华北地区次之,西北地区较弱。此外,4 种产品在区域平均以后,与台站观测数据的相关系数更高。

3) 不同时间段的主动产品在东北和西北的表现一致,但在华北地区和江淮地区有较大的差异。被动产品在描述土壤湿度的变化特征方面有较大误差,融合产品的整体误差明显优于主动产品和被动产品,但是在相关系数方面,融合产品在东北地区和西北地区 and 主动产品基本相当。

4) Metop-A ASCAT 传感器获得的主动产品在一定程度上增加了土壤湿度的相关性,但在偏差方面没有明显的改进。被动传感器获得的 SM 产品在偏差方面表现更优,在相关系数方面表现较差,且引入更多的传感器并不能提高被动产品在再现土壤湿度变化方面的能力。

5) 校正前后的融合产品表现相当,东北地区经过校正的融合产品略优于校正前,校正后偏差有一定的改进,相关系数项反而变差,标准差项无明显变化。在华北和江淮地区校正后的产品误差略大于校正前,且偏差项反而变差。

由于台站观测数据的限制,本研究用于验证的是土壤湿度的月数据集,台站观测的数据是由旬数据平均获得,而卫星产品则是通过每日的数据进行平均获得,因此,今后的工作将获得更细时间分辨率的土壤湿度台站观测数据,对卫星遥感产品进行验证。

志谢: 本文的研究数据来自国际土壤湿度网 (ISMN)、中国国家气象信息中心的“中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集”和欧洲航天局气候变化倡议项目 (ESA CCI),作者在此表示感谢!

参考文献 (References):

[1] Dirmeyer P A. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation [J]. Journal of Climate, 2000, 13 (16): 2900–2922.

[2] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 2004, 305 (5687): 1138–1140.

[3] McColl K A, Wang W, Peng B, et al. Global characterization of surface soil moisture drydowns [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44 (8): 3682–3690.

[4] 郭维栋, 马柱国, 王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨 [J]. 气候与环境研究, 2007, 12 (1): 20–28.

Guo W D, Ma Z G, Wang H J. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12 (1): 20–28.

[5] Komma J, Blöschl G, Reszler C. Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2008, 357 (3–4): 228–242.

[6] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth–Science Reviews, 2010, 99 (3–4): 125–161.

[7] 张文君, 周天军, 智海. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验 [J]. 气象学报, 2012, 70 (1): 78–90.

Zhang W J, Zhou T J, Zhi H. A numerical experiment on the effect of soil moisture to summer climate over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70 (1): 78–90.

[8] Dorigo W A, Wagner W, Hohensinn R, et al. The international soil moisture network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15 (5): 1675–1698.

[9] Dorigo W, Himmelsbauer I, Aberer D, et al. The international soil moisture network: Serving earth system science for over a decade [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25 (11): 5749–5804.

[10] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2011, 3: M03001.

[11] Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies [J]. Journal of Climate, 1991, 4 (3): 345–364.

[12] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77 (3): 437–472.

[13] 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41 (3): 375–385.

Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. Scientia Sinica Terrae, 2011, 41 (3): 375–385.

[14] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP–DOE AMIP–II



reanalysis (R-2) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83 (11): 1631-1643.

[15] Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109: D07S90.

[16] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85 (3): 381-394.

[17] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137 (656): 553-597.

[18] Xia Y, Mitchell K, Ek M, et al. Continental-scale water and energy flux analysis and validation for North American Land Data Assimilation System Project phase 2 (NLDAS-2): 2. Validation of model-simulated streamflow [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117: D03109.

[19] 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述 [J]. 地球科学进展, 2012, 27 (11): 1192-1203.

Chen S L, Liu Y B, Wen Z M. Satellite retrieval of soil moisture: An overview [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27 (11): 1192-1203.

[20] Liu W, Wang J, Xu F, et al. Validation of four satellite-derived soil moisture products using ground-based in situ observations over northern China [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (6): 1419.

[21] 王逸男, 安如, 尤加俊, 等. CCI 土壤湿度产品在中国区的降尺度与融合研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (3): 196-202.

Wang Y N, An R, You J J, et al. Downscaling and merging of the CCI soil moisture product over China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (3): 196-202.

[22] 姚晓磊, 鱼京善, 李占杰, 等. CCI 遥感土壤水在东北粮食主产区表征干旱的准确性评估 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2019, 55 (2): 233-239.

Yao X L, Yu J S, Li Z J, et al. Accuracy evaluation of the ESA CCI remote sensing soil moisture for revealing drought in Northeast China [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55 (2): 233-239.

[23] 李昂, 陆其峰, 杨晓峰, 等. AMSR-E 卫星反演土壤湿度与 EC-WMF、NECP 再分析土壤湿度比较分析 [J]. 遥感技术与应用, 2013, 28 (4): 666-673.

Li A, Lu Q F, Yang X F, et al. AMSR-E soil moisture compared with ECWMF and NECP soil moisture [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28 (4): 666-673.

[24] 李明星, 马柱国, 牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究 [J]. 科学通报, 2011, 56 (16): 1288-1300.

Li M X, Ma Z G, Niu G Y. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56 (16): 1288-1300.

[25] Ling X, Huang Y, Guo W, et al. Comprehensive evaluation of satellite-based and reanalysis soil moisture products using in situ observations over China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25 (7): 4209-4229.

[26] 刘丽伟, 魏栋, 王小巍, 等. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析 [J]. 干旱气象, 2019, 37 (1): 40-47.

Liu L W, Wei D, Wang X W, et al. Multi-data intercomparison of soil moisture over China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37 (1): 40-47.

[27] 朱智, 师春香, 张涛, 等. 四套再分析土壤湿度资料在中国区域的适用性分析 [J]. 高原气象, 2018, 37 (1): 240-252.

Zhu Z, Shi C X, Zhang T, et al. Applicability analysis of four soil moisture reanalysis datasets in China [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37 (1): 240-252.

[28] Albergel C, de Rosnay P, Gruhier C, et al. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 215-226.

[29] Chen Y Y, Yang K, Qin J, et al. Evaluation of SMAP, SMOS, and AMSR2 soil moisture retrievals against observations from two networks on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122 (11): 5780-5792.

[30] An R, Zhang L, Wang Z, et al. Validation of the ESA CCI soil moisture product in China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 48: 28-36.

[31] González-Zamora Á, Sánchez N, Pablos M, et al. CCI soil moisture assessment with SMOS soil moisture and in situ data under different environmental conditions and spatial scales in Spain [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 225: 469-482.

[32] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, et al. ESA CCI Soil Moisture for improved earth system understanding: State-of-the art and future directions [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 185-215.

[33] Gruber A, Scanlon T, van der Schalie R, et al. Evolution of the ESA CCI soil moisture climate data records and their underlying merging methodology [J]. Earth System Science Data, 2019, 11 (2): 717-739.

[34] Friedl M, Sulla-Menashé D. MCD12C1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2023-01-19 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12C1.006>.

[35] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377 (1/2): 80-91.

[36] Dorigo W A, Scipal K, Parinussa R M, et al. Error characterisation of global active and passive microwave soil moisture datasets [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14 (12): 2605-2616.

[37] Conrad V, Pollak L W. Methods in climatology [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1951, 77 (332): 328-330.

[38] Peterson T C, Easterling D R, Karl T R, et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review [J]. International Journal of Climatology, 1998, 18 (13): 1493-1517.

[39] Preimesberger W, Scanlon T, Su C H, et al. Homogenization of structural breaks in the global ESA CCI soil moisture multisatellite climate data record [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59 (4): 2845-2862.

[40] Earth Observation Data Center for Water Resources Monitoring (EODC) GmbH, TU Wien, VanderSat, CESBIO and ETH Zürich. ESA Climate Change Initiative Plus-Soil Moisture, Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD) Supporting Product Version 07.1, D2.1 Version 3 [Z]. 2022: 14-15.

[41] Ulaby F T, Long D G, Blackwell W J, et al. Microwave radar and radiometric remote sensing [M]. University of Michigan Press, 2014;

569–570.

[ 42 ] Albergel C, Rüdiger C, Pellarin T, et al. From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: An assessment of the method based on in situ observations and model simulations[ J ]. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 12( 6 ) : 1323–1337.

Comprehensive evaluation of ESA CCI soil moisture data in eastern China

LING Xiaolu<sup>1,2</sup>, CHEN Chaorong<sup>3</sup>, GUO Weidong<sup>4</sup>, QIN Kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinlong<sup>5</sup>

( 1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 3. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 4. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. Jiangsu CYP Light Heat Electronics Industrial Technology Research Insitute, Ltd., Xuzhou 221116, China )

**Abstract:** Soil moisture products based on remote sensing are crucial for investigating climatic change and hydrological effects on a regional scale. However, there is a lack of verification and application of long-term soil moisture datasets in China due to factors such as inconsistent observation standards and instrument upgrades. Using the agro-meteorological dataset from the China Meteorological Administration and soil moisture data from the International Soil Moisture Network (ISMN), this study constructed a monthly dataset of soil moisture in eastern China covering the period from 1981 to 2013. Accordingly, this study analyzed and compared the performance of four microwave remote sensing-based soil moisture products developed by the European Space Agency’s Climate Change Initiative (ESA CCI): active, passive, combined, and combined adjusted products. The results indicate that active and passive products underestimated and overestimated soil moisture in eastern China, respectively. The maximum deviations from active products were found in the northern and northwestern regions, with relative deviations of -30.9% and -29.6%, respectively. In contrast, the passive products showed relative deviations of 39.1% and 26.5%, respectively for soil moisture in northeastern and northwestern regions. The combined products mitigated the underestimation of the active products and the overestimation of the passive product in these regions, reducing the relative deviations to 24.3% and 3.7%, respectively. Regarding the variation characteristics of regional monthly average soil moisture, both the active and combined products performed best for soil moisture in the Yangtze-Huaihe (YH) region, with the highest correlation coefficient of 0.66. The passive and combined products yielded correlation coefficients of 0.44 and 0.47, respectively for soil moisture in the northeastern region and performed poorly for soil moisture in the northern and northwestern regions. The analysis of the variance sources of the remote sensing-based products indicates that the active products enjoyed more advantages in describing the evolutionary characteristics of soil moisture, the passive products demonstrated greater accuracy, and the combined products yielded the highest accuracy overall. Additionally, this study investigated the impacts of changes in the integrated satellite equipment of CCI on product performance. The results indicate that the active products exhibited consistent performance for soil moisture in the northeastern and northwestern regions in different periods. However, passive sensors still exhibited gaps in reproducing the variations in soil moisture. The combined products exhibited better overall variance than both active and passive products. However, these products yielded comparable correlation coefficients with the active products for soil moisture in the northeastern and northwestern regions. The combined products presented no notable improvement after correction, proving that it is feasible to conduct long-term research using the combined products of CCI. The results of this study contribute to a deeper understanding of the error structures and characteristics of various satellite product datasets, providing evidence for researchers to select appropriate data products and conduct research on long time series.

**Keywords:** soil moisture; satellite remote sensing; instrument replacement; long time series; ESA CCI; eastern China; break-adjusted COMBINED product; comprehensive evaluation

( 责任编辑: 李 瑜 )