

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.029

吴小丽, 刘桂民, 李新星, 等. CCI 多传感器组合土壤水分产品在青藏高原不同地区的适用性. 土壤, 2021, 53(2): 429–438.

# CCI 多传感器组合土壤水分产品在青藏高原不同地区的适用性<sup>①</sup>

吴小丽<sup>1,2</sup>, 刘桂民<sup>1\*</sup>, 李新星<sup>1</sup>, 纪庚好<sup>1</sup>, 李莉莎<sup>1</sup>, 毛楠<sup>1</sup>, 徐海燕<sup>1</sup>, 吴晓东<sup>2</sup>

(1 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈国家重点实验室青藏高原冰冻圈观测研究站, 兰州 730000)

**摘要:** 青藏高原的土壤水分通过对水循环和对生态系统的作用, 对区域乃至全球气候的变化起着重要的影响。由于该地区缺失长期和大规模土壤水分的现场观测, 遥感产品成为地球系统模型的有用数据集。其中, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发布的气候变化倡议(Climate Change Initiative, CCI)土壤水分产品已在全球范围内广泛应用。研究使用 3 个网络的原位测量土壤水分数据评估 CCI(主动、被动、主被动组合)产品在青藏高原地区的适用性, 这 3 个网络分别代表青藏高原的半湿润(玛曲)、半干旱(那曲)和干旱(狮泉河)气候条件。结果表明, CCI 3 种产品都能捕捉到青藏高原生长季土壤水分时间变化规律和东南高西北低的空间分布特征。其中主被动组合产品在 3 个网络的相关性都是最高的。在以高寒草甸为主的半干旱地区, CCI 主被动组合产品反演土壤水分具有较高的精度, 与实测数据相关系数高达 0.870, 均方根误差小于 0.06, 但在高密度植被区有所低估, 裸露地表有所高估。从空间分布来看, 主动产品过高估计了青藏高原土壤水分, 被动产品显示土壤水分空间分布变化范围过大, 最大值达  $0.98 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 主被动组合产品在空间上( $0 \sim 0.65 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )最接近青藏高原土壤水分实际分布情况。研究结果可以为 CCI 产品在青藏高原的应用与研究提供参考。

**关键词:** 青藏高原; 土壤水分; CCI 产品; 多传感器组合; 适用性

**中图分类号:** TV11 **文献标志码:** A

## Applicability Assessment of Multi-sensor CCI Soil Moisture Products in Different Areas of Qinghai-Tibetan Plateau

WU Xiaoli<sup>1,2</sup>, LIU Guimin<sup>1\*</sup>, LI Xinxing<sup>1</sup>, JI Genghao<sup>1</sup>, LI Lisha<sup>1</sup>, MAO Nan<sup>1</sup>, XU Haiyan<sup>1</sup>, WU Xiaodong<sup>2</sup>

(1 School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2 Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibetan Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of the Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Soil moisture in the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) plays an important role in regional and global climate change via its impacts on water cycle and ecosystems. Due to the lack of long-term and large-scale field observations of soil moisture in this area, remote sensing products potentially provide useful data sets for the Earth system models. Among them, the Climate Change Initiative (CCI) soil moisture products issued by the European Space Agency (ESA) have been widely used. Here we used in-situ soil moisture data from three networks to evaluate the applicability of CCI products (active, passive, active-passive combined) on the QTP. The three networks represent semi-humid (Maqu), semi-arid (Naqu), and arid (Shiquanhe) climate conditions. The results showed that all the three CCI products could capture temporal and spatial distribution of soil moisture content in the growing season on the QTP. The correlation coefficient between active-passive combined product and in situ measured values was the highest among the three networks. In the semi-arid areas dominated by alpine meadows, the CCI active-passive combined product showed a correlation coefficient above 0.8 and RMSE below 0.06, but the CCI combined product underestimated soil moisture in the area with dense vegetation (Maqu) and overestimated it in the barren ground (Shiquanhe). From the spatial

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41661013, 41871060, 41861011)资助。

\* 通讯作者(liuguimin@mail.lzjtu.cn)

作者简介: 吴小丽(1992—), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事寒区水循环研究。E-mail: 861219753@qq.com

distribution, the active product overestimated soil moisture, and the passive product showed great fluctuation in soil moisture, with the maximum value of  $0.98 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . The active-passive combined product ( $0-0.65 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) was similar to the actual spatial distribution of soil moisture. The results provide a reference for the application of CCI products in retrieving soil moisture content in the QTP.

**Key words:** Qinghai-Tibetan Plateau; Soil moisture; CCI products; Multi-sensor; Applicability

土壤水分作为全球水和能量循环的重要影响因子和过程参数,受降雨的渗透、径流和蒸发的影响,可影响地表产汇流和能量通量的分配,从而改变地表反照率、潜热通量和显热通量等<sup>[1-2]</sup>来显著影响地表能量收支平衡。同时,土壤水分在溶质运移、能量传递过程中也发挥着至关重要的作用,进而驱动不同生态系统的演替<sup>[3-4]</sup>。

青藏高原平均海拔在 4 000 m 以上,是世界上最大、最高的高原,可以影响全球大气环流。青藏高原也是中低纬度地带最大的多年冻土区,对气候变化高度敏感<sup>[5]</sup>。许多研究表明,青藏高原的大气和水文环境通过与亚洲季风以及全球大气环流的互相作用,极大地影响了中国、亚洲甚至全球的气候和环境<sup>[6-7]</sup>。青藏高原土壤含水量在高原的水循环和气候中起着重要作用,会影响季风系统和降水模式,因此高原地区土壤含水量的长时间动态变化引起了国内外学者广泛的关注。目前研究表明,青藏高原不同下垫面、不同深度的土壤水分变化特征不同,湿季土壤水分显著地受到降水的影响,干季土壤水分主要受土壤温度的影响<sup>[8]</sup>。1960—2016 年期间高原整体呈湿润趋势<sup>[9]</sup>。区域上而言,青藏高原土壤水分在空间上总体呈现出东多西少、自东向西逐渐递减的分布<sup>[10]</sup>。这些结果反映了土壤水分的空间分布,但由于该地区环境恶劣,地面观测稀缺,长时间序列高精度的土壤水分资料获取格外重要。

目前国内外监测土壤水分的方法主要有 3 种,包括站点原位观测、遥感产品反演以及模型模拟,其中遥感方法可以获得大尺度动态监测的土壤水分资料,但也需要经过站点原位监测数据的精度验证。利用现场观测数据,先前的报告评估了 2002—2012 年青藏高原上的 7 种遥感土壤水分产品和另一种再分析土壤水分产品的性能<sup>[11]</sup>。结果表明,源自 AMSR-E(高级微波扫描辐射计-地球观测系统)的 NASA(美国国家航空航天局)产品明显低估了青藏高原上的土壤水分,而未能显示出土壤水分的季节性变化;SMOS(土壤水分和海洋盐分)产品似乎受到射频干扰(RFI)的影响,从而导致较大的偏差;ECV(基本气候变量)CCI(气候变化倡议)产品与地面测量值显著相关,但

它们也低估了土壤水分。对美国国家冰雪数据中心发布的 SMAP(土壤水分主被动产品)在青藏高原北部不同土地覆盖类型进行了评估<sup>[12]</sup>,结果表明 SMAP-P(被动)产品在青藏高原北部适用性更好,特别是在贫瘠的土地上。基于微波扫描辐射计/地球观测系统(AMSR-E/EOS)发布的 3 种土壤水分产品:JAXA(日本航空航天局)、NASA 和 VUA(阿姆斯特丹自由大学),在青藏高原进行评估<sup>[13]</sup>,结果表明,JAXA 产品在贫瘠土地上的土壤水分反演精度高于 NASA 和 VUA 产品,而从后两种产品中获得的土壤水分与青藏高原上原位测量的空间分布较为一致。除了这些产品外,中国对地静止天气卫星(FY-3B)的数据还表明,青藏高原上的土壤水分从东向西减少,而当降雨频繁时,该产品高估了土壤水分<sup>[14]</sup>。

单传感器观测的土壤水分数据集的长度有限,这会影响到长期趋势的检测,并且单传感器输入产品时间和空间的一致性不是很好。为了解决这些问题,ESA(欧洲航天局)于 2012 年发布了第一个多年代、多传感器组合、全球卫星观测土壤水分数据集,作为其 CCI 计划的一部分,产品名为 ESA CCI SM,CCI 产品较单传感器产品能够更好地保持与地面测量数据的高度相关<sup>[15-16]</sup>。ESA CCI SM 的最新版本包括大量增强功能,包含各种新的卫星传感器,并将其时间覆盖范围扩展到 1978—2018 年,合并后的产品通常优于单传感器输入产品,可以更准确地预测土壤水分的长期变化和短期动态<sup>[17-18]</sup>。CCI 产品已在全球范围内广泛应用,在应用于青藏高原的时空变化分析之前,需要对产品进行不同气候条件及土地覆盖类型下的精度验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 实测数据

本研究中用于评估 CCI 土壤水分产品的原位监测数据来自青藏高原科学数据中心的“青藏高原土壤温湿度观测数据”,包含那曲、玛曲和阿里网络的土壤水分数据<sup>[19]</sup>。其中,那曲位于青藏高原腹地,属于高原亚寒带季风半干旱气候区,地表覆盖以高寒草甸为主;玛曲属于高寒湿润型气候,地表覆盖

主要是高寒草原；包含阿里和狮泉河地区的阿里观测网位于青藏高原西北部，气候干燥，降水稀少，地表多为裸地和稀疏草地(图 1A)。由于阿里地区数据不可用，本文仅使用狮泉河地区数据。对于那曲和狮泉河网络，使用 EM5b 数据记录仪和 0.10 m 长的 ECH<sub>2</sub>O(类型：EC-10)阻抗探头(Decagon Devices, 现为 METER Group, Inc., Pullman, WA, USA)记录土壤含水量。2006 年 7 月，在每个站点附近采集土壤样品，以重量分析法确定土壤含水量，记录仪每 30 min 记录一次读数作为校准数据。重量测定法和阻抗探针土壤水分之间建立了线性关系，得到均方根差(RMSD)为 0.029 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>[20]。在玛曲网络中，使用带有 3 个 5.2 cm 长的扁平针的 EC-TM ECH<sub>2</sub>O 电容探针来测量针周围的土壤介电常数，以获得体积土壤水分。收集土壤测定其容重、粒度分布和有机质含量。监测站大多设置在粉砂质土壤中，这是

该地区土壤性质的代表[21]。各台站土壤质地表层至 40 cm 以下均较为均匀，各台站间有机质含量差异较大。由于土壤的介电特性取决于土壤的质地和盐度，因此对玛曲地区的土壤进行了特定的校准，该方法可将适用于所有细质地矿质土的通用校正方程(数据记录器默认值)给出的约 3% 的不确定性降低到 1% ~ 2%。该校准将环测的体积土壤水分与探头测得的体积土壤水分之间的 RMSD 从 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>降低到 0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>，可以认为是该网络每个站点的绝对精度[22]。该数据集已广泛应用于量化粗分辨率卫星和模型产品中的不确定性[23-25]。3 个观测网都提供了密集的土壤水分原位测量站点，其中那曲网络 5 个监测站点，玛曲网络 20 个站点，狮泉河网络 16 个站点，各个站点包含了不同的地形和地表覆盖条件(图 1B, 表 1)。各观测网络的植被类型[26]和监测站点地理位置情况见图 1。

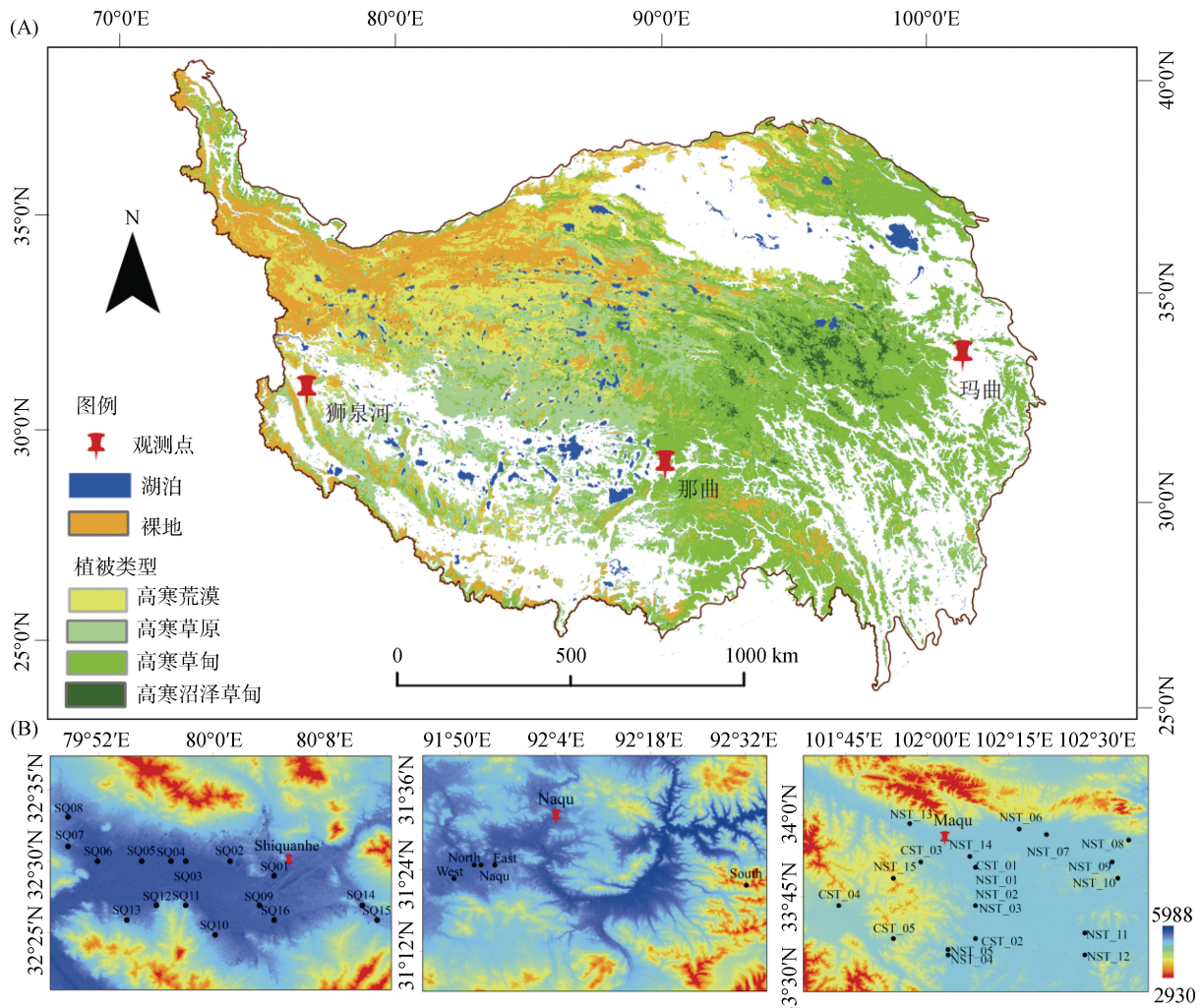


图 1 青藏高原植被类型(A)和土壤水分监测站点分布(B, 从左到右依次为狮泉河、那曲、玛曲)  
Fig. 1 Distribution of vegetation types (A) and observation sites (B, from left to right are Shiquanhe, Naqu and Maqu)

表 1 那曲、玛曲和狮泉河网络站点信息  
Table 1 Information of Naqu, Maqu and Shiquanhe networks stations

网络	站点名称	地理坐标	海拔(m)	位置地形	地表覆盖
那曲	Naqu	91°53'E, 31°22'N	4 509	平原	草原
	West	91°49'E, 31°20'N	4 506	平原	草原
	South	91°52'E, 31°19'N	4 510	湿地斜坡	湿地
	North	91°52'E, 31°22'N	4 507	河岸斜坡	草原
	East	91°55'E, 31°22'N	4 527	平坦山顶	草原
玛曲	CST_01	102°08'E, 33°53'N	3 431	河谷	草地
	CST_02	102°08'E, 33°40'N	3 449	河谷	草地
	CST_03	101°58'E, 33°54'N	3 507	山谷	草地
	CST_04	101°43'E, 33°46'N	3 504	山谷	草地
	CST_05	101°53'E, 33°40'N	3 542	山谷	草地
	NST_01	102°08'E, 33°53'N	3 431	山谷	草地
	NST_02	102°08'E, 33°53'N	3 434	山谷	草地
	NST_03	102°08'E, 33°46'N	3 513	山地斜坡	草地
	NST_04	102°03'E, 33°37'N	3 448	河谷	湿地草
	NST_05	102°03'E, 33°38'N	3 476	河谷	草地
	NST_06	102°16'E, 34°00'N	3 428	河谷	草地
	NST_07	102°21'E, 33°59'N	3 430	河谷	草地
	NST_08	102°36'E, 33°58'N	3 473	山谷	草地
	NST_09	102°33'E, 33°54'N	3 434	河谷	草地
	NST_10	102°34'E, 33°51'N	3 512	山地斜坡	草地
NST_11	102°28'E, 33°41'N	3 442	河谷	湿地草	
NST_12	102°28'E, 33°37'N	3 441	河谷	草地	
NST_13	101°56'E, 34°01'N	3 519	山谷	草地	
NST_14	102°07'E, 33°55'N	3 432	河谷	草地	
NST_15	101°53'E, 33°51'N	3 752	山地斜坡	草地	
狮泉河	SQ01	80°04'E, 32°29'N	4 306	平地	荒漠
	SQ02	80°01'E, 32°30'N	4 304	缓坡	荒漠
	SQ03	79°58'E, 32°30'N	4 278	缓坡	荒漠(稀疏灌木)
	SQ04	79°57'E, 32°30'N	4 269	湿地边缘	稀疏草地
	SQ05	79°55'E, 32°30'N	4 261	沼泽边缘	稀疏草地
	SQ06	79°52'E, 32°30'N	4 257	平地	稀疏草地
	SQ07	79°50'E, 32°31'N	4 280	平地	荒漠(稀疏灌木)
	SQ08	79°50'E, 32°33'N	4 306	平地	灌木
	SQ09	80°03'E, 32°27'N	4 275	平地	荒漠/河床
	SQ10	80°00'E, 32°25'N	4 275	平地	草原
	SQ11	79°58'E, 32°27'N	4 274	平地	草原和灌木
	SQ12	79°56'E, 32°27'N	4 264	平地	河床边缘
	SQ13	79°54'E, 32°26'N	4 295	平地	谷底
	SQ14	80°10'E, 32°27'N	4 368	斜坡	荒漠
	SQ15	80°11'E, 32°26'N	4 387	平地	灌木 (1~2 m 高度)
	SQ16	80°04'E, 32°26'N	4 288	平地	荒漠 (离河床 50 m)

## 1.2 遥感产品

土壤水分遥感资料是来源于欧洲航天局水循环观测战略和气候变化倡议项目框架内开发的多传感器合并土壤水分产品, 简称 CCI 产品, 版本为最新

的 ESA CCI SM v04.5 版本 (<http://www.esa.int/>)。CCI 产品于 2012 年 9 月发布, 包含 3 个表面土壤水分数据: “ACTIVE”(主动产品, 由散射仪组成)、“PASSIVE”(被动产品, 由辐射计组成)和 “COMBINED 产品”(基

于主动和被动产品的组合产品)。数据文件以 NetCDF-4 经典格式提供,该数据集涵盖了 1978 年 11 月至 2018 年 12 月期间 40 a 的数据集,具有全球覆盖度和  $0.25^\circ$  的空间分辨率,以及 1 d 的时间分辨率,参考时间为 0:00 UTC。主动产品的单位以饱和度百分比(%)来提供,被动和主被动组合产品的单位以体积含水量( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )提供。

### 1.3 数据处理

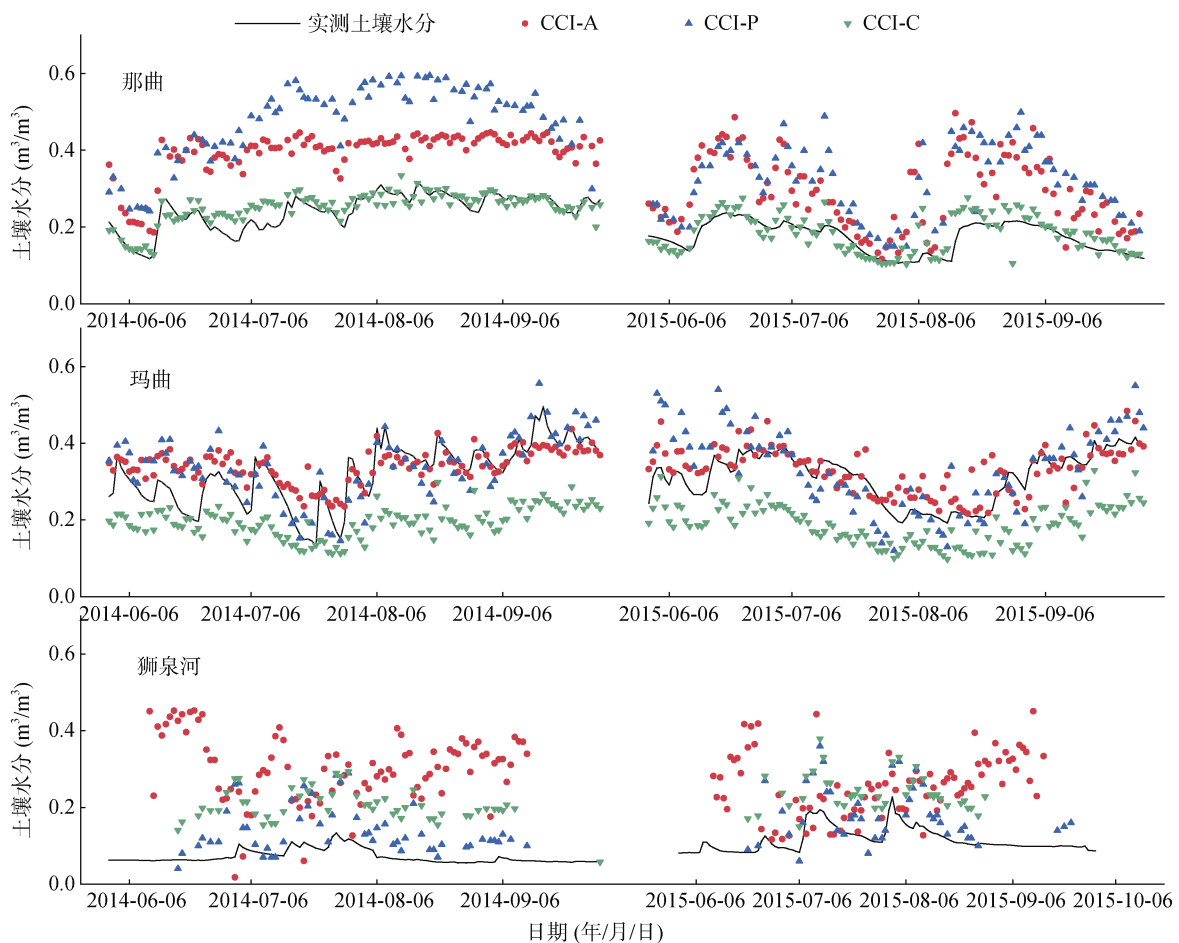
地面观测采用网络各站点平均的方式来减小尺度效应带来的误差,观测网在布点时尽量使各实测点分布于不同的地表和地貌类型中,使其更具代表性。使用观测网均值评价遥感数据能够很好地减小遥感混合像元带来的误差。观测数据中有些值缺失或错误,因此有必要对数据进行质量控制,我们排除了 0 或大于  $1(\text{m}^3/\text{m}^3)$  的土壤水分数据。遥感数据运用 ArcGIS、ENVI 软件提取,其中 CCI 主动产品的单位(饱和度 %)用 CCI 辅助数据土壤孔隙度转换为体积含水量(体积含水量=土壤饱和度 $\times$ 土壤孔隙度)。评估

中使用统计变量相关系数( $r$ )、均方根误差(RMSE)和平均偏差(Bias)来表征 CCI 估算土壤水分与实测数据的关系。由于实测站点均处于高海拔地区,微波传感器监测不到固态土壤水分情况且只提供表层土壤含水量,为避免土壤水冻结对分析结果的影响并考虑遥感数据的缺失,本研究选择青藏高原所有观测网 6—9 月期间深度为 5 cm 的数据进行研究。

## 2 结果

### 2.1 土壤水分的时间序列

由 2014、2015 年生长季 6—9 月 CCI 土壤水分产品与实测数据时间序列可以看出(图 2),3 种产品都能反映 3 个网络土壤水分的时间变化规律。主动产品在玛曲地区与地面观测数据具有很好的一致性,在那曲地区变化幅度较大,在狮泉河地区一致性较差;被动产品在玛曲和狮泉河地区较好地捕捉了土壤水分的变化,但在那曲地区同样显示过高的变化范围;主被动组合产品可以很好地捕捉到那曲地区的土



(CCI-A 代表主动产品, CCI-P 代表被动产品, CCI-C 代表主被动组合产品)

图 2 CCI 产品与实测土壤水分数据时间序列分布

Fig. 2 Time series distribution of CCI products and in-situ soil moisture data

壤水分变化动态,也能很好地表现玛曲地区和狮泉河地区的变化趋势,但是在玛曲地区有明显的低估现象,狮泉河地区有明显的高估,结果从 CCI 产品与实测数据的散点图中也可以看出(图 3)。由 CCI 土壤水分数据和实测数据相关性和误差分析(表 2)可知 3 个产品都能较好地反映 3 个网络的时间变化趋势,产品与观测资料的相关系数均通过了 0.05 的显著性检验。主动产品在玛曲地区误差最小,但由于其对

那曲和狮泉河地区虚假的高估不能很好地代表青藏高原土壤水分变化;被动产品在玛曲和狮泉河地区的误差较小,但相关性略低于主被动组合产品;而主被动组合产品与实测数据的相关性系数都是最高的(那曲地区 0.870,玛曲地区 0.742,狮泉河地区 0.774),在那曲地区的误差最小,在玛曲和狮泉河的系统性误差可由一元线性回归方法校正,总体来看在 3 个网络上表现出最佳性能。

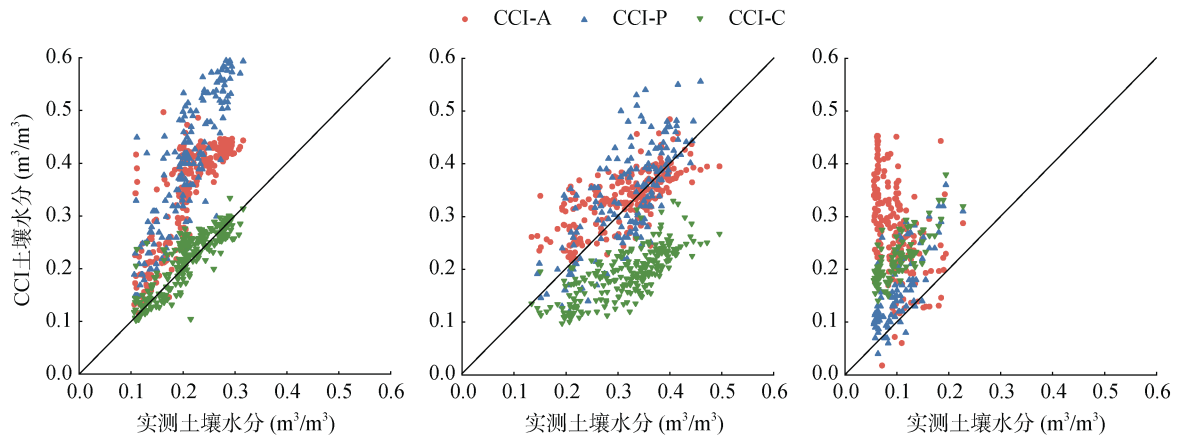


图 3 CCI 产品与实测土壤水分数据散点图

Fig. 3 Scatter plots of soil moistures retrieved from CCI products and in-situ measurement

表 2 CCI 产品的土壤水分与原位观测值之间的相关性

Table 2 Correlation between soil moisture from CCI products and in-situ observations

观测点	产品	RMSE	Bias	<i>r</i>	<i>P</i> -value	<i>N</i>
那曲	CCI-A	0.102	0.136	0.803	0.000	224
	CCI-P	0.129	0.190	0.859	0.000	166
	CCI-C	<b>0.056</b>	<b>0.010</b>	<b>0.870</b>	0.000	237
玛曲	CCI-A	<b>0.064</b>	<b>0.020</b>	0.710	0.000	240
	CCI-P	0.084	0.020	0.728	0.000	167
	CCI-C	0.087	-0.123	<b>0.742</b>	0.000	241
狮泉河	CCI-A	0.112	0.187	-0.415	0.000	184
	CCI-P	<b>0.056</b>	<b>0.067</b>	0.753	0.000	97
	CCI-C	0.068	0.126	0.774	0.000	94

注:表中加粗数据表示偏差最小或相关性最大。

## 2.2 土壤水分的空间分布

为研究 CCI 3 种土壤水分产品的时空分布特征,本文基于 3 种土壤水分产品制作了 2014 年生长季 6—9 月青藏高原土壤水分空间分布图(图 4)。从图中可以看出,3 种土壤水分产品的空间分布基本都符合青藏高原土壤水分东南向西北递减的基本分布特征。主动产品空间分布与实际情况相差较大,显示过高估计青藏高原土壤水分值。另外被动产品土壤水分变化范围与其他两种产品有着很大不同,显示介于 0~0.98 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,大于实际土壤水分的变化范围。3

种产品中,主被动组合产品土壤水分的空间分布与高原实际情况最为接近,估算值介于 0~0.65 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。从时间上来看,主动和主被动组合产品都显示青藏高原西部 7、8 月份的土壤含水量高于 6、9 月,这是由于高原地区降水主要集中在 7、8 月,其中主被动组合产品所显示的变化范围更符合实际情况。总体而言,CCI 3 种产品都符合青藏高原从东南向西北递减的土壤水分变化趋势,其中主被动组合产品在土壤水分空间变化范围及时间变化规律上更符合高原实际情况,但其变化范围的准确性仍需检验。

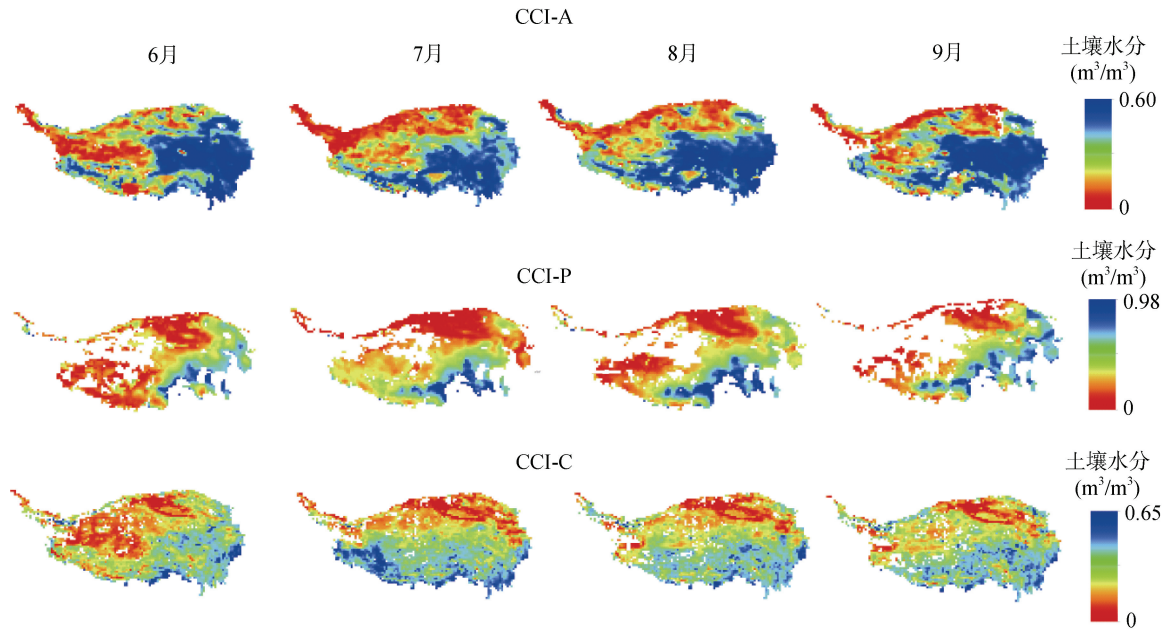


图 4 CCI 3 种产品在青藏高原地区的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil moistures derived from three CCI products on the QTP

### 3 讨论

本研究基于青藏高原土壤温湿度观测网(Tibet-Obs)的那曲、玛曲和狮泉河地区的土壤水分实测数据,对欧洲空间局发布的 CCI 产品在 2014、2015 年生长季的土壤水分数据进行评估,评价其在青藏高原不同地区的适用性。

从 2014、2015 年时间序列的评估结果来看,CCI 3 种土壤水分产品都能反映青藏高原 3 个网络的时间变化规律,其中主动产品对土壤水分较敏感,变化过于剧烈,因为它在时间序列数据的最大值和最小值之间进行了标准化<sup>[27]</sup>,而被动和主被动组合产品可以很好地捕捉土壤水分动态变化,其中主被动组合产品具有更高的相关性及较低的误差,与实测数据具有较好的一致性。这一发现与之前在西班牙<sup>[27]</sup>、东非<sup>[28]</sup>、华北<sup>[29]</sup>和中国西南<sup>[30]</sup>等地区的研究一致。CCI 土壤水分产品在那曲地区的精度明显高于玛曲和狮泉河地区,那曲地区的土地覆盖类型主要是高寒草甸,低地上生物量对卫星数据的反演影响较小<sup>[31]</sup>。在玛曲地区,亚湿润的气候有利于植被生长,相对较高的地上生物量(高寒草原)对微波信号影响很大<sup>[12, 32]</sup>。因此,尽管主被动组合产品显示出较高的相关系数,但它低估了玛曲地区的土壤水分,这与之前的研究结果一致<sup>[33]</sup>,该地区被动产品比较接近实测土壤水分,但相关性较主被动组合产品略低,这与 Zeng 等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。在以干旱气候为特征的狮泉河地区,

土地覆盖类型主要为裸地和荒漠草原,被动产品的土壤水分更接近实测数据,而主动产品高估了土壤水分且波动很大,主被动组合产品显示高估了该地区土壤水含量,但是具有最高的相关性。在干旱地区,表层土壤干燥,微波信号可以穿透更深的土壤,感知土壤体积散射<sup>[11, 34]</sup>,从而导致土壤水分的高估。显然,CCI 产品由于大量数据缺失无法显示狮泉河地区的土壤水分时间变化。有研究表明,CCI 产品很难显示出极端潮湿或干燥地区土壤的瞬时水分变化<sup>[18]</sup>,主要原因是这些区域的卫星数据通常具有低信噪比的特征<sup>[35-36]</sup>。另外,极端的气候条件(干燥和寒冷,终年积雪)也是造成卫星数据接收信号低的原因<sup>[37-39]</sup>,因此狮泉河地区没有足够的 CCI 数据来反演土壤水分时间变化动态。

在空间分布上,CCI 3 种产品在青藏高原地区的空间分布都符合土壤水分东南高西北低的基本分布特征<sup>[10]</sup>。其中主动产品显示过高估计土壤水分,被动产品在青藏高原的土壤水分变化范围过大,均不符合实际情况,而主被动组合产品反演的土壤水分分布较接近高原实际情况。7、8 月份青藏高原西部干旱地区土壤水分与其他月份相比较为湿润,这可能是由于该地区 7、8 月份降水较集中<sup>[40]</sup>。东南部土壤水分值较高,是因为降水多,植被覆盖较多,所以有较强的固水能力<sup>[41]</sup>。

我们所评估的时空变化结果显示,与主动或被动产品相比,CCI 主被动组合产品具有更高的相关

系数和较低的误差<sup>[27, 42]</sup>。有研究通过评估主被动组合产品在不同气候、地形、土地覆盖和土壤类型的时空变化,发现 CCI-C 产品与爱尔兰和西班牙网络中的实地观测非常吻合,而在芬兰地区获得的结果较差<sup>[43]</sup>,而芬兰 CCI-C 产品与实测数据相关性较低的主要原因是寒冷的冬季长,以及与冻融循环有关的强后向散射<sup>[15]</sup>。我们的发现与这些研究是一致的,即 CCI 主被动组合产品比主动或被动产品更准确地反演青藏高原土壤水分,尤其在半干旱地区表现最好,但很难捕获干旱地区土壤水分的时间动态变化<sup>[18]</sup>。大量研究表明,主动和被动微波传感器在不同的土地覆盖类型和下垫面条件上具有互补性,一般辐射计在干燥地区的性能更好,散射仪在植被比较密集的区域表现更好,而在半干旱地区表现二者都有较好的性能<sup>[44-46]</sup>。主被动组合产品有效地融合了主动和被动产品的协同作用,引入 SNR(信噪比)合并算法<sup>[47]</sup>,减少了主动和被动产品尺度不一致引起的误差<sup>[48]</sup>。

综上所述,3 种产品中 CCI 主被动组合产品在青藏高原地区的表现最佳,在半干旱气候区那曲地区精度最高,虽然在高密度植被的玛曲和干旱荒漠的狮泉河地区相关性也很高,但有不同程度的误差,被动产品的表现仅次于主被动组合产品。虽然组合产品在青藏高原地区显示出与地面测量结果的最佳关联,并且非常好地捕捉了原地土壤水分的变化,但它低估了青藏高原的土壤水分绝对值,这与 Zeng 等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。这些结果表明,主被动产品对青藏高原的土壤水分有着较好的反映,但仍存在一些误差,如何对遥感土壤水分数据进行校正,从而提高其精度,还需要继续进行深入研究。

#### 4 结论

基于青藏高原地区土壤水分的现场观测,我们评估了 CCI 3 种产品在该地区获取土壤水分的适用性。结果表明,在时间序列或空间分布上,CCI 主被动组合产品的性能均优于主动和被动产品,且在以高寒草甸为主的半干旱地区具有更高的精度,与实测数据相关系数大于 0.8,均方根误差小于 0.06,在高密度植被地区有低估现象,干旱裸露植被区有高估现象。此外,高原西北部的产品缺失在今后的研究中还需改善。我们的研究表明,CCI 主被动组合产品可以很好地应用于青藏高原土壤水分反演,在具体的应用中,还需要考虑进一步校正,以提高 CCI 主被动产品反演土壤水分的精度。

#### 参考文献:

- [1] Li R, Zhao L, Wu T H, et al. The impact of surface energy exchange on the thawing process of active layer over the northern Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(6): 2091–2099.
- [2] Dickinson R E. Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance[J]. *Advances in Geophysics*, 1983, 25: 305–353.
- [3] Li H D, Shen W S, Zou C X, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 479: 215–225.
- [4] 刘蓓, Bo Elberling, 贾仲君. 不同水分条件下格陵兰岛冻土活性甲烷氧化菌群落分异规律[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 90–96.
- [5] Yang M X, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: a review of recent research[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(1/2): 31–44.
- [6] Ma Y M, Su Z B, Koike T, et al. On measuring and remote sensing surface energy partitioning over the Tibetan Plateau—from GAME/Tibet to CAMP/Tibet[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(1/2/3): 63–74.
- [7] Yang K, Ye B S, Zhou D G, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3/4): 517–534.
- [8] 杨健, 马耀明. 青藏高原典型下垫面的土壤温湿特征[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 813–820.
- [9] 贾艳青, 张勃. 近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1085–1097.
- [10] 刘强, 杜今阳, 施建成, 等. 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[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1677–1690.
- [11] Zeng J Y, Li Z, Chen Q, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using *in situ* observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 91–110.
- [12] Ma C F, Li X, Wei L, et al. Multi-scale validation of SMAP soil moisture products over cold and arid regions in northwestern China using distributed ground observation data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 327.
- [13] 席家驹, 文军, 田辉, 等. AMSR-E 遥感土壤湿度产品在青藏高原地区的适用性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 194–202.
- [14] 万红, 高硕, 郭鹏. 青藏高原地区 FY-3B 微波遥感土壤水分产品适用性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 132–137.
- [15] Dorigo W A, Gruber A, de Jeu R A M, et al. Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 380–395.



- [16] Liu Y Y, Dorigo W A, Parinussa R M, et al. Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 280–297.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Bob Su, 阳坤. 青藏高原土壤温湿度逐时观测数据集 (2008-2016). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI:10.11888/Soil.tpd.270110. CSTR:18046.11.Soil.tpd.270110.
- [20] van der Velde R, Su Z B, van Oevelen P, et al. Soil moisture mapping over the central part of the Tibetan Plateau using a series of ASAR WS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 175–187.
- [21] Li W P, Zhao L, Wu X D, et al. Soil distribution modeling using inductive learning in the eastern part of permafrost regions in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[J]. *CATENA*, 2015, 126: 98–104.
- [22] Dente L, Su Z B, Wen J. Validation of SMOS soil moisture products over the Maqu and Twente regions[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2012, 12(8): 9965–9986.
- [23] Su Z, Wen J, Dente L, et al. The Tibetan Plateau observatory of plateau scale soil moisture and soil temperature (Tibet-Obs) for quantifying uncertainties in coarse resolution satellite and model products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2303–2316.
- [24] Dente L, Vekerdy Z, Wen J, et al. Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 55–65.
- [25] Lv S, Zeng Y J, Wen J, et al. A reappraisal of global soil effective temperature schemes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 144–153.
- [26] Fang H B, Zhao L, Wu X D, et al. Soil taxonomy and distribution characteristics of the permafrost region in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(6): 1448–1459.
- [27] 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.
- [28] McNally A, Shukla S, Arsenault K R, et al. Evaluating ESA CCI soil moisture in East Africa[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 96–109.
- [29] Wang S S, Mo X G, Liu S X, et al. Validation and trend analysis of ECV soil moisture data on cropland in North China Plain during 1981-2010[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 110–121.
- [30] Peng J, Niesel J, Loew A, et al. Evaluation of satellite and reanalysis soil moisture products over southwest China using ground-based measurements[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 15729–15747.
- [31] Zhang Z J, Sun G Q. Model investigation of the effect of vegetation on passive microwave soil moisture retrieval[C]// *Third International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. Proc SPIE 4894, Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III*, Hangzhou, China. 2003, 4894: 140–149.
- [32] Parinussa R M, Holmes T R H, de Jeu R A M. Soil moisture retrievals from the WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2683–2694.
- [33] Zucco G, Brocca L, Moramarco T, et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 193–199.
- [34] Shi J, Jiang L, Zhang L, et al. Physically based estimation of bare-surface soil moisture with the passive radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3145–3153.
- [35] Gruber A, Su C H, Crow W T, et al. Estimating error cross-correlations in soil moisture data sets using extended collocation analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(3): 1208–1219.
- [36] van der Schrier G, Barichivich J, Briffa K R, et al. A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901-2009[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10): 4025–4048.
- [37] Cosh M H, Ochsner T E, McKee L, et al. The soil moisture active passive marena, Oklahoma, *in situ* sensor testbed (SMAP-MOISST): testbed design and evaluation of *in situ* sensors[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(4): vzj2015.09.0122.
- [38] Loew A, Stacke T, Dorigo W, et al. Potential and limitations of multidecadal satellite soil moisture observations for selected climate model evaluation studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(9): 3523–3542.
- [39] 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.
- [40] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. *地理科学*, 2013, 33(8): 999–1005.
- [41] Feng H H. Individual contributions of climate and vegetation change to soil moisture trends across multiple spatial scales[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32782.
- [42] Fang L, Hain C R, Zhan X W, et al. An inter-comparison of soil moisture data products from satellite remote sensing and

- a land surface model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 37–50.
- [43] Pratola C, Barrett B, Gruber A, et al. Quality assessment of the CCI ECV soil moisture product using ENVISAT ASAR wide swath data over Spain, Ireland and Finland[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 15388–15423.
- [44] 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.
- [45] Taylor C M, de Jeu R A M, Guichard F, et al. Afternoon rain more likely over drier soils[J]. *Nature*, 2012, 489(7416): 423–426.
- [46] 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.
- [47] Gruber A, Dorigo W A, Crow W, et al. Triple collocation-based merging of satellite soil moisture retrievals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 6780–6792.
- [48] Liu Y Y, Parinussa R M, Dorigo W A, et al. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 425–436.