

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.002

CCI 土壤湿度产品在中国区的降尺度与融合研究

王逸男,安 如,尤加俊,王 喆

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:以欧洲航天局主/被动微波遥感融合的土壤湿度产品数据为主要数据源,结合地表参数、亮度温度、土壤质地、地形、降雨等辅助数据,提出基于移动窗口的线性、非线性联合的土壤湿度降尺度模型,对中国区域2003年1—12月的CCI土壤湿度产品数据进行降尺度,提高CCI土壤湿度数据的空间分辨率,使其更适用于农业、水文模拟等精细尺度的应用要求。为了克服CCI数据冬季缺失较多的情况,利用第3代再分析资料ERA-Interim表层土壤湿度的降尺度和重采样结果与之进行融合,生成空间覆盖完整的2003—2013年中国区月1 km土壤湿度数据集,并利用站点实测数据集对其进行了验证。结果表明,依据主/被动微波融合CCI、ERA-Interim再分析土壤湿度数据以及辅助数据的基于移动窗口和线性非线性集成的中国区地表土壤湿度降尺度和融合方法,提高了CCI土壤湿度数据集的空间分辨率和空间覆盖,同时还一定程度上提高了土壤湿度的估算精度。

关键词:土壤湿度;主/被动微波遥感;CCI;ERA-Interim;降尺度;融合

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)03-0196-07

Downscaling and merging of the CCI soil moisture product over China

WANG Yinan, AN Ru, YOU Jiajun, WANG Zhe

(School of Earth Sciences And Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: This study used the soil moisture product of ESA CCI (the Climate Change Initiative) and combined land surface parameters, brightness temperature, soil texture, terrain, rainfall and other auxiliary data, to establish a downscaling model for the soil moisture. Based on the moving window method, this model combined linear and nonlinear techniques. It was applied to downscaling the CCI data of soil moisture over China from 2003 Jan. to 2013 Dec., in order to improve its spatial resolution. The downscaled data will be more suitable for the agriculture, hydrological simulation and other disciplines. Because ESA CCI product is not available over the whole China in winter, we further conducted a merge of ESA CCI product and the ERA-Interim product of soil surface moisture. Finally, we obtained the monthly soil moisture product over China with 1 km spatial resolution from 2003 to 2013. We further used in-situ observations to validate the product and found that this method improved not only the spatial resolution and the coverage, but also the precision.

Key words: soil moisture; active and passive microwave remote sensing; CCI; ERA-Interim; downscaling; merging

土壤湿度又称土壤含水量或土壤水分。目前,在水文模拟、农业等领域尚需要更加精细的土壤湿度数据,因此,在已有较低分辨率土壤湿度产品数据集基础上不依赖于地面实测数据获取高分辨土壤湿度数据集有着十分重要的意义。近年来有许多学者对全国范围的土壤湿度获取及尺度转换进行探讨并取得了一定的成果^[1-4]。

基金项目: 国家自然科学基金(2013BAC03B0401)
作者简介: 王逸男(1992—),男,硕士研究生,主要从事遥感机理与应用研究。E-mail:812207639@qq.com
引用本文: 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 Yinan, AN Ru, YOU Jiajun, 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.

本文基于欧洲航天局 CCI(the climate change initiative) 土壤湿度产品数据、ERA-Interim(ERA) 土壤湿度产品数据、MODIS 产品数据、DEM 高程数据、降雨以及土壤参数等,构建中国区域基于移动窗口的多种土壤湿度降尺度模型,并利用 ERA 土壤湿度产品数据对缺失数据进行融合补充。利用农业气象站点地面实测数据对降尺度融合结果进行检验,最终获取了 2003—2013 年中国区域 1 km 空间分辨率土壤湿度的月数据集,该数据集可为国家尺度生态系统监测与评估、农业、水文、水资源、气象气候等领域的研究和应用提供参考。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

中国处在亚洲东部和太平洋西部边界,陆地面积约 960 万 km²,整个地形的特点是海拔西高东低,拥有高原、平原、盆地、山岭和丘陵 5 个基本地形类型,其中山区占总数的 2/3,纬度跨度大及多种地形导致了气候多样化,降水条件复杂。中国区域受气候影响较大,由于其特殊的地理位置,从东南沿海向西北内陆地区,年降水量呈减少趋势^[4]。

1.2 数据源

1.2.1 土壤湿度数据

a. CCI 土壤湿度产品数据。主/被动微波土壤湿度融合数据即 CCI 土壤湿度产品是欧洲航天局全球基础气候参数监测项目中的一部分,旨在基于主/被动微波传感器生成最为完整和一致的全球土壤湿度数据集^[5]。该地表土壤湿度产品数据通过对主/被动土壤湿度数据集的融合获得,其特点是:全球覆盖,空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为日。

b. ERA 土壤湿度产品数据。第 3 代再分析资料 ERA 是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的一套全球再分析数据集^[6]。作为第 2 代再分析资料 ERA40 的升级版,在全球大气的质量、水分、能量和角动量收支方面表现出很大的优越性。与常用的其他几套土壤湿度产品数据相比,该数据能满足本研究所需精度及覆盖度条件要求^[7]。

c. 地面实测土壤湿度数据。研究所利用的地面实测数据为中国气象数据共享服务中心提供的土壤相对含水量数据^[4]。鉴于获得的地表土壤湿度,研究收集 10 cm 深度的土壤相对湿度。

1.2.2 辅助数据

a. NDVI 植被指数产品。研究使用的 NDVI 数据来源于 MODIS 数据中的 16 d 最大值合成的植被指数 MOD13A3 数据产品,计算方法为取每月中旬前后共 10 d 最大值,空间分辨率为 1 km。

b. MODIS 中国区域 LST 陆地表面温度产品。采用基于 TERRA 卫星的中国区域 1 km 分辨率地表温度月合成产品 MODLT1M,通过中国区域 1 km 分辨率 LST 每天产品 MODLT1D 计算得到,计算方法为取月平均值。

c. 亮度温度数据。亮度温度数据来源于 DMSP SSM/I-SSMIS 探路者可扩展地球网格 EASE-Grid 每日的亮度温度数据集。

d. 降雨量数据。降雨量数据来源于中国逐日网格降水量实时分析系统数据集,通过对全国多台站实时数据进行逐日降水量的提取,并在“气候背景场”的基础上利用最优插值的方法最终得到反映中国每日降水情况的网格产品数据。

e. 土壤参数数据。土壤参数数据来源于黑河计划数据管理中心和寒旱区科学数据中心的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,以全国土地第二次调查中南京土壤研究所提供的 1:1 000 000 土壤数据为基础采用 FAO-90 土壤分类系统而得到的。

f. 地形因子数据。地形因子数据下载于寒旱区科学数据中心的基于中国区域数字高程模型数据集的基础 DEM 数据,是以中国 1:250 000 等高线和高程点为基础制成的数据集。本文使用的是 DEM、Slope 以及 Aspect 这 3 个数据集。

1.3 数据预处理

1.3.1 CCI 土壤湿度产品数据预处理

为统一数据的时效性,对原始时间分辨率为每天的 CCI 土壤湿度产品数据进行合成,方法为 ENVI 中国通用的最大合成法。由于微波数据不适用于温度低于 0℃ 及植被覆盖度高的区域,所以在主/被动微波土壤湿度融合数据合成过程中,将这些区域进行剔除,使数据存在较多的小范围空值区域,影响数据的连续性。

考虑到土壤湿度具有较强的空间相关性和连续性,利用周边数据对缺值像元进行补充。采用5×5的移动窗口进行逐像元检查,当有效数据大于设定阈值(采用的设定阈值为8)则采用周边有效数据的平均值对指定像元进行填充。采用预处理方法可以消除零星分布的土壤湿度缺失区,但依然存在大范围的无数据区。

1.3.2 前期降水指数(API)

前期降水指数于20世纪50年代由Kohler和Linsley's提出^[8],试验中倾向于以0.9作为最终衰减系数^[9]。前期降水指数是前期逐天降水在权重的基础上累加获得的。考虑到前期降水的衰减特性,在研究中计算前2个月的降水影响。

1.3.3 农业气象站实测土壤湿度数据预处理

1.3.3.1 站点数据的筛选评估

评估筛选原则为3类:数据必须包含足够的元数据;需要对处于特殊地表情况的站点进行筛选剔除;确保所选实测数据集能反映影响遥感信号的所有物理状况。根据上述原则对实测土壤湿度数据进行筛选,最终保留农业气象站数据547个,如图1所示。这些站点观测的数据将用于后续的降尺度与融合结果验证。

1.3.3.2 单位转换

CCI数据表示为体积含水量。而农业气象站土壤湿度数据则表示为土壤相对湿度,单位为%,为了实现同量纲数据的比较,需要对实测土壤湿度站点数据进行单位转换。通过公式分析得到农业气象站土壤相对湿度到土壤体积含水量的转换公式:土壤体积含水量(%)=土壤相对湿度×田间持水量×土壤密度,应用该公式统一各土壤湿度的计量单位。

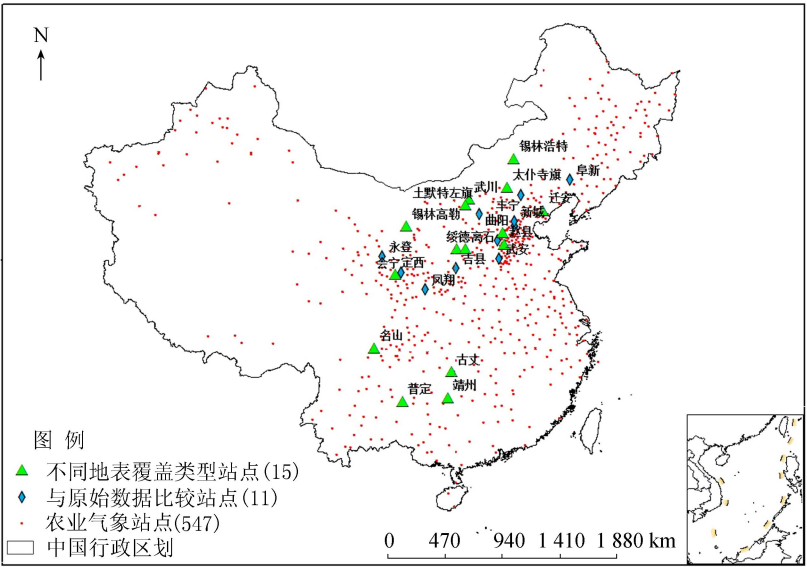


图1 中国农业气象站分布
Fig.1 Distribution of agricultural meteorological stations in China

2 研究方法

2.1 参数的选取与分析

土壤湿度受众多环境因子的影响^[10-11]。影响土壤湿度的因子主要有地表参数、气象因子、地形因子、亮度温度、土壤质地等。在考虑大范围数据可获得性和可推广性的基础上,选择的因子有:地表参数(植被指数和地表温度,气候因子选择前期降水指数)、地形因子(海拔、坡度和坡向)、土壤质地(沙土含量和黏土含量)。鉴于主/被动微波土壤湿度融合数据主要以微波数据为基础数据,因此,添加亮度温度,共有9种因子用于土壤湿度降尺度。

2.2 降尺度模型

考虑到各影响因子与土壤湿度的复杂关系^[12],笔者尝试建立线性和非线性联合降尺度模型:

$$S_m = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 a_{ijk} N^i L^j B^k + b_1 A + b_2 S + b_3 C + b_4 D + b_5 P + b_6 E$$

(1)

式中: S_m ——土壤湿度; N ——植被指数; L ——地表温度; B ——亮度温度; A ——前期降水指数; S ——沙土含量; C ——黏土含量; D ——高程; P ——坡度; E ——坡向; $a_{ijk}, b_1, \dots, b_6$ ——系数,以上因子空间分辨率均为1 km。

实验发现混合模型相较于线性或非线性模型能获得更好的建模效果。以2009年为例,除去数据本身的像元缺省,有效建模数较线性模型多9704个,较非线性模型多14835个;不能建模数较线性模型少9636个,较非线性模型少14898个,估算精度亦较好。

2.3 中国全域土壤湿度的降尺度实现

由于中国区域土壤湿度存在复杂的地理差异性,其影响因子以及土壤湿度与各影响因子间的关系复杂,应用固定的全局模型将有所局限。研究利用移动窗口逐像元建立降尺度模型,并利用多元逐步回归方法进行模型的解算。其中,显著性标准 F 值的大小决定了自变量是否被选择。多元逐步回归法具有双向筛选的特点,可以选取对土壤湿度影响明显的参数因子,去除影响不明显的参数因子,从而实现对模型参数的优化处理。

鉴于中国领土幅员辽阔,地表差异极大,研究区内土壤湿度的空间分异,小区域内基于回归的土壤湿度降尺度算法不能满足实际的建模要求。在图像上以像元为中心建立窗口,在每个窗口内结合多元逐步回归的方法进行降尺度处理。通过实验比较,窗口选择 5×5 大小可以有效缓解由于 CCI 数据产品在空间上的数据缺失对降尺度结果的影响。

2.4 CCI 土壤湿度降尺度结果与 ERA 融合

由于 CCI 土壤湿度数据在冬季缺失较多(图 2),因此需将 ERA 土壤湿度数据与之融合,以获得空间覆盖完整的中国全境土壤湿度数据。由于地表温度数据空间分布不完整,从而导致 ERA 降尺度结果依然有缺失。本文使用降尺度之后的 ERA 数据与降尺度之后的 CCI 数据进行融合,将 CCI 无值区用降尺度后的 ERA 数据替代。如 ERA 降尺度数据依然缺失,则选择 ERA 重采样后结果(图 3)进行补充。对中国区像元进行遍历,生成覆盖完整的中国区土壤湿度降尺度融合月数据集。以 2009 年 2 月为例,结果如图 4 所示。

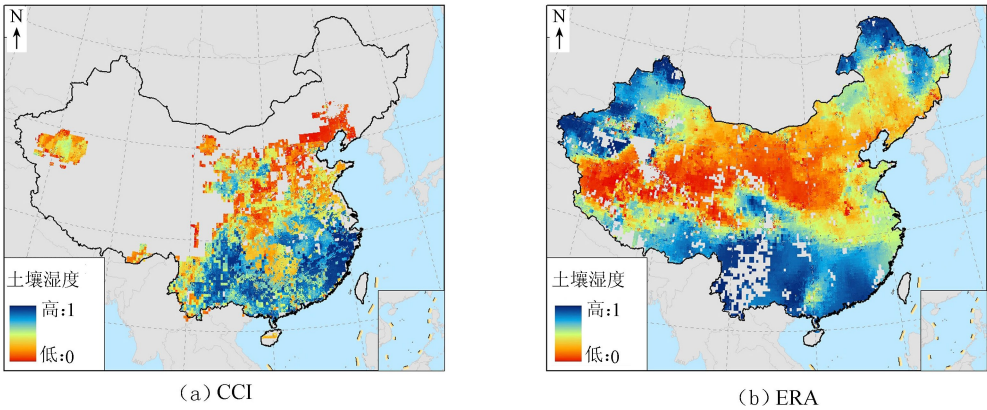


图 2 土壤湿度产品降尺度结果

Fig. 2 Downscaled result of soil moisture products

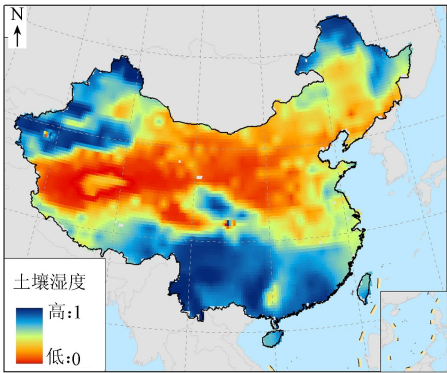


图 3 ERA 土壤湿度产品重采样结果

Fig. 3 Resampling result of ERA soil moisture products

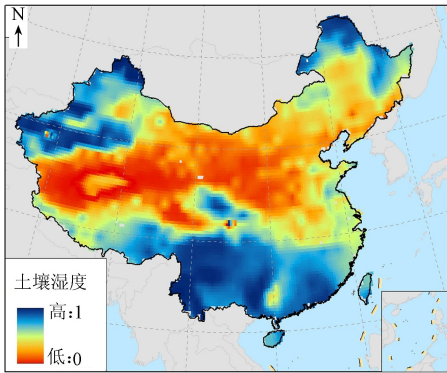


图 4 CCI、ERA 降尺度及重采样融合结果

Fig. 4 Overlay result of CCI and ERA soil moisture products

3 结果验证与分析

3.1 验证指标

以农业气象站点实测土壤湿度数据验证土壤湿度降尺度结果。用于检验的统计指标包括相关系数

(R)、平均偏差(I)、绝对误差(V)、相对误差(E)以及均方根误差(M),并选取若干典型站点对比分析了CCI土壤湿度及对应的降尺度结果的精度情况。

3.2 数据降尺度融合结果不同地表类型的验证

基于2007—2010年中国区域农业气象站点共26256条数据,应用误差验证指标,获取林地、草地、农田、城市与建筑用地以及裸地与稀疏植被类型的误差统计指标,结果如表1所示。

表1 不同地表类型土壤湿度改进结果误差分析

Table 1 Error analysis on the improved soil moisture results of different land surfaces						
地表类型	数量 N /个	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	E	$M/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R
林地	379	0.041	0.078	0.252	0.096	0.377
草地	1547	0.011	0.069	0.362	0.087	0.595
农田	12754	0.031	0.071	0.313	0.091	0.452
城市与建筑用地	11469	0.022	0.079	0.383	0.103	0.471
裸地与稀疏植被	107	0.016	0.082	0.707	0.098	0.201

4种地表类型的平均偏差相差不大,最小为草地0.011,最大为林地0.041;绝对误差大致相同,最小为草地0.069,最大为裸地与稀疏植被0.082;相对误差相差较大,裸地与稀疏植被最大,达到0.707,林地、草地和农田相对误差较小,集中在0.252~0.383之间;均方根误差也相差不大,最小为草地0.087,最大为城市与建筑用地0.103;5种地表类型的相关性均通过了0.05的显著性检验,其中草地相关系数最大,达到0.595,裸地与稀疏植被地表最小,只有0.201。

通过具体农业气象站点来进一步验证不同地表类型下土壤湿度降尺度融合结果,对上述各个类型分别选择代表站点进行验证。选择时间序列较连续的站点作为验证站点,同时尽量选择处于相应土地覆盖类型中间位置的站点,而非处于两种土壤覆盖类型交界处的站点,在一定程度上保证类型的准确性。站点分布如图2中不同地表覆盖类型站点(15个)所示,获得不同地表覆盖类型的特征站点误差分析见表2。

表2 不同地表类型典型站点的土壤湿度降尺度结果误差分析

Table 2 Error analysis on the downscaled soil moisture results of different land surface stations									
站点	省份	经度(E)	纬度(N)	地表利用类型	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	E	$M/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R
古丈	湖南	109.76°	28.56°	林地	0.001	0.055	0.184	0.071	0.129
靖州	湖南	109.48°	26.66°	林地	0.013	0.059	0.194	0.081	0.109
定西	甘肃	104.60°	35.53°	草地	-0.012	0.040	0.245	0.054	0.558
锡林浩特	内蒙古	116.12°	43.95°	草地	-0.023	0.045	0.535	0.057	0.409
名山	四川	103.13°	30.10°	草地	0.013	0.051	0.146	0.060	0.220
绥德	陕西	110.21°	37.50°	草地	0.003	0.060	0.388	0.076	0.606
离石	山西	111.10°	37.50°	耕地	-0.003	0.040	0.193	0.057	0.481
土默特左旗	内蒙古	111.15°	40.68°	耕地	0.008	0.042	0.247	0.056	0.610
曲阳	河北	114.68°	38.63°	耕地	-0.020	0.042	0.371	0.059	0.489
赵县	河北	114.73°	37.76°	耕地	-0.027	0.044	0.302	0.061	0.244
普定	贵州	105.75°	26.31°	城市与建筑用地	0.016	0.039	0.109	0.048	0.597
太仆寺旗	内蒙古	115.28°	41.90°	城市与建筑用地	0.007	0.046	0.325	0.058	0.268
武川	内蒙古	111.45°	41.10°	城市与建筑用地	0.001	0.039	0.270	0.049	0.478
迁安	河北	118.71°	40.00°	城市与建筑用地	-0.026	0.042	0.403	0.054	0.202
锡林郭勒	内蒙古	105.38°	39.08°	裸地与稀疏植被	-0.014	0.071	0.782	0.087	0.372

从表2可以看出,各站点的绝对误差均较小,最大为锡林郭勒0.071;除锡林郭勒(裸地与稀疏植被)和锡林浩特(草地)相对误差均超过0.5以外,其他各类型站点的相对误差均较小,最小为普定0.109;裸地与稀疏植被和林地均方根误差相对较大,均超过0.07,草地、农田以及城市与建筑用地均方根误差较小,最小为普定0.048;各地表覆盖类型站点相关系数相差较大,林地站点相关系数均较小,分别0.129和0.109,其他各类型相关系数均超过了0.2,最大为土默特左旗(耕地),达到0.610,所有典型站点中,除古丈、靖州、赵县和迁安,其他站点相关性均通过了 $p=0.01$ 的显著性检验,赵县和迁安通过了 $p=0.05$ 的显著性检验。综上,各地表覆盖类型上的土壤湿度降尺度结果存在一定的统计规律,但其精度还是相差很大,林地和裸地与稀疏植被的降尺度精度相对较低,草地、农田和城市与建筑用地的降尺度精度相对较高。

3.3 数据融合结果与原始数据的比较

对土壤湿度数据降尺度融合结果与原始 CCI 土壤湿度产品数据(25 km)在中国区域不同土地利用类型上的表现情况进行比较。站点分布如图 2 中与原始数据比较站点(11 个)所示。利用各项误差统计指标,分别计算不同土地利用类型上代表站点的实测土壤湿度数据与土壤湿度产品和数据融合处理结果的各项统计指标,结果如表 3 所示。

表 3 不同地表类型站点 CCI 原始产品与 CCI 降尺度结果误差分析
Table 3 Error analysis on different land stations' CCI product and downscaled/merged result

站点	CCI 原始产品					降尺度融合结果				
	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	E	$M/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	E	$M/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R
凤翔	0.076	0.080	0.333	0.091	0.535	0.067	0.075	0.321	0.088	0.550
会宁	0.041	0.068	0.262	0.083	0.438	0.038	0.068	0.265	0.082	0.443
吉县	-0.043	0.050	0.550	0.073	0.382	-0.044	0.049	0.541	0.066	0.455
武安	-0.030	0.047	0.483	0.059	0.430	-0.012	0.043	0.442	0.058	0.327
丰宁	-0.039	0.046	0.437	0.058	0.539	-0.021	0.041	0.400	0.052	0.509
右玉	-0.098	0.098	0.787	0.109	0.372	-0.037	0.046	0.383	0.059	0.506
永登	-0.074	0.081	0.581	0.095	0.523	-0.010	0.051	0.335	0.062	0.484
井陘	0.047	0.060	0.318	0.072	0.211	0.033	0.052	0.277	0.068	0.157
阜新	0.047	0.066	0.335	0.077	0.478	0.007	0.055	0.334	0.068	0.456
容城	0.021	0.048	0.295	0.055	0.253	-0.017	0.044	0.276	0.057	0.301
新城	-0.039	0.045	0.481	0.061	0.539	-0.030	0.042	0.399	0.053	0.584

由表 3 可见,各地表类型代表站点在降尺度前后各项误差指标都发生了一些变化,除部分站点的相关性系数指标有所下降以外,各站点各项指标在进行降尺度后均有一定程度的提高,平均精度也得到一定的改善。11 个站点平均相关系数由 0.427 提升到 0.434,均方根误差由 0.076 下降到 0.065。其中,右玉和永登站点的绝对误差数值分别从 0.098 和 0.081 降到 0.046 和 0.051,相对误差数值分别从 0.787 和 0.581 降到 0.383 和 0.335,均方根误差分别从 0.109 和 0.095 降到 0.059 和 0.062,其精度在降尺度融合后得到了一定的改善。

3.4 数据降尺度融合结果不同季节验证

同一站点土壤湿度具有时态稳定性。但受到全球气候变化以及气温、降水等突发气候条件的影响,同一站点在年内与年际之间存在一定的变化。下面主要通过春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 和 12 月)四季对 CCI 土壤湿度降尺度结果进行精度检验。根据精度验证指标,获取 2007—2010 年春、夏、秋、冬的误差分析表,如表 4 所示。

表 4 不同季节土壤湿度降尺度结果误差分析
Table 4 Error analysis on the downscaled soil moisture results of different seasons

季节	数据量 N /个	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$V/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	E	$M/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R
春季	10659	0.045	0.086	0.448	0.111	0.412
夏季	10075	0.003	0.090	0.556	0.121	0.345
秋季	9099	0.031	0.087	0.394	0.113	0.365
冬季	2194	0.064	0.094	0.357	0.118	0.397

由表 4 可见,冬季数据量相对较少,推测是由于我国大部分地区冬季地表冰雪覆盖严重,地面农业气象站实测数据、CCI 数据与相关因子数据都非常少造成的。从整体上看,春、夏、秋、冬四季的平均偏差相差较大,夏季的平均偏差最小,只有 0.003,冬季的平均偏差最大,达到 0.064;4 个季节的绝对误差较为相近,均保持在 0.090 左右,最大的冬季和最小的春季仅相差 0.008;秋冬两季的相对误差均小于 0.400,精度达到了 60% 以上,而春夏两季的相对误差相对较大,尤其是夏季,其相对误差达到了 0.556,精度不足 50%,推测由于夏季温度较高,土壤地表水分蒸发较快,土壤含水量相对较小,最终导致夏季降尺度结果值的相对误差偏差很大;春夏秋冬四季的均方根误差相差不大,均在 0.110 左右,最大为夏季 0.121,最小为春季 0.111,相差仅 0.010;相关性在 0.400 左右,且均通过了 0.001 的显著性检验,具有明显的统计意义。

4 结 语

笔者提出了依据主/被动微波融合 CCI、ERA-Interim 再分析土壤湿度数据以及辅助数据的基于移动窗

口和线性非线性集成的中国区地表土壤湿度降尺度和融合方法。该方法适合大尺度和多时态区域。经农业气象站实测土壤湿度验证表明通过处理不仅提高了土壤湿度的空间分辨率,且估算精度也得到了一定的改善,能满足精细尺度的应用和研究要求。CCI产品在干旱沙漠区、下覆冻土区、过度湿润区以及植被茂密等地区估算误差大而造成数据缺失,无法获得时空连续覆盖中国区域的土壤湿度数据。利用ERA-Interim再分析土壤湿度数据的降尺度和重采样结果与之融合,达到了覆盖中国全区的目的。由于不同地区数据源的不同以及其在中国区的数据精度的差异,所得到的结果仍存在着一些时空尺度不一致的问题,影响数据的质量。

由于本研究的时间和空间跨度都不完整,今后可在以下方面继续努力:评估不同土壤湿度数据产品在中国不同地区的适用性及精度,采用分区的方法进一步改善土壤湿度在全国不同地区的估算效果;进一步研究降尺度参数和方法,研究中国区土壤湿度分布及其变化的时空特点,建立自适应窗口大小的降尺度模型。总之,面对中国地区如此复杂的地形、土壤类型和多样的气候类型,获取精度更高的中国区土壤湿度数据集还需要更加深入细致的研究。

参考文献:

[1] 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 Mingxing, MA Zhuguo, NIU Guoyue. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China[J]. Chinese Science Bull, 2011, 56(16): 1288-1300. (in Chinese))

[2] TAO Xine, CHEN Hua, XU Chongyu, et al. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(4): 273-281.

[3] 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.

[4] AN Ru, ZHANG Ling, WANG Zhe, 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.

[5] MERCHANT C J, LEEUW G D, WAGNER W. Selecting algorithms for Earth observation of climate within the European Space Agency Climate Change initiative: introduction to a special issue[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 239-241.

[6] 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.

[7] 张玲. 2011—2013年中国区域土壤湿度多源数据BMA融合及质量评估[D]. 南京: 河海大学, 2016.

[8] 王春林, 陈慧华, 唐力生, 等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J]. 气候变化研究进展, 2012(3): 157-163. (WANG Chunlin, CHEN Huihua, TANG Lisheng, et al. Daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temporal variation[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2012(3): 157-163. (in Chinese))

[9] MC Q J. A simple index of drought conditions[J]. Weatherwise, 1954, 7(3): 64-67.

[10] 娄利娇. 被动微波遥感土壤湿度数据降尺度研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.

[11] 高雄飞, 刘元会, 郭建青, 等. R / S分析法在石家庄市栾城区土壤含水量动态分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 72-77. (GAO Xiongfei, LIU Yuanhui, GUO Jianqing, et al. Application of R / S method to dynamic analysis of soil moisture content in Luancheng District of Shijiazhuang City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences, 2015, 43(1): 72-77. (in Chinese))

[12] PILES M, CAMPS A, VALL L M, et al. Downscaling SMOS-derived soil moisture using MODIS Visible/Infrared data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3156-3166.

(收稿日期: 2017-04-08 编辑: 张志琴)