

王国杰, 齐道日娜, 王磊, 等. 2016. 基于风云三号气象卫星微波亮温资料反演东北地区土壤湿度及其对比分析 [J]. 大气科学, 40 (4): 792–804. Wang Guojie, Chyi Dorina, Wang Lei, et al. 2016. Soil moisture retrieval over Northeast China based on microwave brightness temperature of FY3B satellite and its comparison with other datasets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 792–804, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15207.

## 基于风云三号气象卫星微波亮温资料反演 东北地区土壤湿度及其对比分析

王国杰<sup>1</sup> 齐道日娜<sup>2</sup> 王磊<sup>2</sup> 谭奕<sup>3</sup> 薛峰<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学地理与遥感学院气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学水文气象学院, 南京 210044

3 南京信息工程大学应用气象学院生态气象环境中心, 南京 210044

4 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

**摘要** 土壤湿度在陆面过程中发挥着重要作用, 是联系陆地水循环和能量循环的纽带和关键环节。遥感技术可以实时地对土壤湿度进行长期、大区域动态监测, 已成为监测土壤湿度的有效手段。本文基于风云三号气象卫星 (FY3B) 微波亮温资料, 利用基于微波能量辐射传输方程的陆面参数反演模型 (LPRM) 反演了中国东北地区的土壤湿度 (FY3B<sub>LPRM</sub>)。把反演获得的 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与中国气象局农业气象站土壤湿度观测资料、NCEP 和 ERA-Interim 土壤湿度再分析资料、欧洲空间局多卫星融合 ECV (Essential Climate Variable) 土壤湿度产品和国家卫星气象中心 FY3B 官方土壤湿度产品 (FY3B<sub>official</sub>) 进行了对比分析。结果表明: (1) 本文反演的 FY3B 土壤湿度与农业气象站观测资料有较高的一致性; 卫星土壤湿度整体上呈现自西向东逐渐增加的空间变化, 与农业气象站观测资料较为一致; 在季节变化上, 两者高度相关, 在大部分地区的相关系数都达到 0.7 以上。(2) 在大兴安岭和东北三省东部等地表相对湿润的地区, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与 NCEP、ERA-Interim 和 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度呈现较强的负相关; 再分析资料和 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度均无法反映该地区土壤干湿状况的季节性变化, 甚至与观测资料呈反位相变化特征。FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与欧洲空间局研发的多卫星融合 ECV 土壤湿度产品在绝大多数地区有较好的一致性。本文基于风云三号极轨气象卫星微波亮温反演的土壤湿度资料, 可用于干旱监测、数值同化与天气预报、水文水资源等领域。

**关键词** 风云三号气象卫星 土壤湿度 微波遥感 东北地区 对比分析

文章编号 1006-9895(2016)04-0792-13

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15207

## Soil Moisture Retrieval over Northeast China Based on Microwave Brightness Temperature of FY3B Satellite and Its Comparison with Other Datasets

WANG Guojie<sup>1</sup>, CHYI Dorina<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, TAN Yan<sup>3</sup>, and XUE Feng<sup>4</sup>

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2015-06-02; 网络预出版日期 2016-02-02

作者简介 王国杰, 男, 1976 年出生, 教授, 主要从事陆面—大气相互作用研究。E-mail: gwang\_nuist@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 91337108、41375099、41561124014, 大学生创新训练项目 201410300007Z 和江苏省普通高校自然科学研究项目 14KJD570001

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 91337108, 41375099, and 41561124014), the Student Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program (Grant 201410300007Z), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutes of China (Grant 14KJD570001)

3 International Center for Ecology Meteorology and Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Soil moisture is of critical importance in land surface processes, which plays a key role in linking the terrestrial water and energy cycles. Remote sensing has become a promising technique for obtaining large-scale soil moisture information. In this study, the authors use the Land Parameter Retrieving Model (LPRM), which is based on radiative transfer equations, to retrieve surface soil moisture from FY3B microwave brightness temperature images over Northeast China (FY3B<sub>LPRM</sub>). The FY3B<sub>LPRM</sub> soil moisture is then compared with other datasets including in-situ observations at agrometeorological stations in China, the NCEP and ERA-Interim reanalysis of soil moisture, the multi-satellite soil moisture product from European Space Agency (ECV data), and the FY3B soil moisture product officially produced in the National Satellite Meteorological Center of China (FY3B<sub>official</sub>). It is found that the spatial and temporal variations of the derived FY3B<sub>LPRM</sub> soil moisture agree well with that of in-situ observations. FY3B<sub>LPRM</sub> and in-situ observations both show higher soil moisture content in eastern Northeast China than in western Northeast China. The two datasets are highly correlated in most regions with correlation coefficients more than 0.7 mainly because they agree well with each other in seasonal variation. However, the FY3B<sub>LPRM</sub> is highly negatively correlated with the FY3B<sub>official</sub> and the NCEP and ERA-Interim datasets in some relatively humid regions such as the surrounding areas of Da Hinggan Mountains and eastern part of the study area. Further analysis suggests that the FY3B<sub>LPRM</sub> can realistically represent the seasonal variability of in-situ observations, whereas the other three datasets cannot. In most of the study area, the derived FY3B<sub>LPRM</sub> agrees very well with the multi-satellite ECV data. The derived FY3B<sub>LPRM</sub> soil moisture can be applied for drought monitoring and hydrology and water resource studies. It also provides realistic soil moisture information for data assimilation in numerical weather forecast studies.

**Keywords** FY3B satellite, Soil moisture, Microwave remote sensing, Northeast China, Comparison

## 1 引言

土壤水分是全球和区域水循环系统中的重要组成部分，也是联系陆地水循环和能量循环的纽带。土壤水分直接参与地表产汇流过程，是水文模拟和洪水预报中的重要参量，其变化也影响着土壤热容量、地表反照率、地表蒸发和植被生长状况等，进而制约地表水分和能量的再分配（Koster et al., 2004; 张文君等, 2008; Seneviratne et al., 2010; 李明星等, 2011）。大量研究已表明，土壤湿度的反馈机制对干旱、极端降水、热浪等水文气象过程有重要影响，是水文气象灾害的一个重要预报因子（王万秋, 1991; 郭维栋等, 2007; Wang et al., 2010; Alexander, 2011; Zhao et al., 2014）。因此，土壤湿度在气象学基础研究和水文工程等领域都是不可或缺的基础资料，具有重要的实用价值和理论意义。

近年来，国内许多专家学者对土壤湿度的时空变化特点及其对气候系统的影响进行了大量研究。王丹等（2012）、姜丽霞等（2009）、王磊等（2008）利用数理分析方法研究了在中国黑龙江省、松嫩平原及西北区西部土壤湿度的时空变化特征。马柱国等（2000）研究表明在中国东部区域土壤湿度与降

水之间存在正相关关系，与气温之间存在负相关关系，这与孙丞虎等（2005）在淮河流域土壤湿度与前期和同期降水和气温的相关关系的研究结果基本一致，而淮河流域土壤湿度与半年后的降水存在负相关、与气温则存在正相关。陈少勇等（2008）对中国黄土高原地区的土壤湿度变化规律研究表明，黄土高原地区4~10月份土壤湿度与降水地理分布的一致性较好，均为自东南向西北减少，降水是影响土壤湿度的主要因素，但气温的作用亦不可忽视。

然而，土壤湿度并非常规气象观测变量，数据资料积累量很少，限制了相关研究工作的开展（陈书林等, 2012; 郑兴明, 2012）。测量土壤湿度的传统方法主要是烘干称重法。近年来，利用遥感技术监测土壤湿度受到学术界的重视并获得快速发展。与传统的土壤水分监测方法相比，遥感技术具有很多不可替代的优势，可以实时、快速地对大尺度土壤湿度进行大区域动态监测（姚坤等, 2008）。微波波段波长较长，受大气环境影响较小，对植被冠层和地表也具有一定的穿透能力，能够探测到低矮植被覆盖下的土壤信息，而且，微波遥感能够进行全天时、全天候的探测，提供红外遥感和可见光

无法提供的物体特性信息。因此,微波遥感已成为探测土壤湿度的最有效技术,其中的被动微波遥感,因土壤自身微波辐射与土壤水分的强相关性,则成为定量探测土壤湿度的最佳方式(郑兴明, 2012)。

国内外一些专家学者对土壤湿度微波遥感技术开展了大量研究。Njoku and Chan (2006) 利用美国 EOS Aqua 卫星搭载的 AMSR-E 微波资料的微波极化差异指数反演全球土壤湿度,然而,由于该方法的局限性,所研发的土壤湿度产品在美国以外地区存在很大不确定性(Draper et al., 2009)。Shi et al. (2006) 基于简单的地表辐射(Qp)模型开发了裸土土壤湿度反演算法。Wagner et al. (1999) 提出了 TU-Wien 土壤湿度反演模型,利用 ERS/MetOp ASCAT 微波资料研究全球土壤湿度的变化。2009 年,欧洲空间局 ESA (European Space Agency) 发射了 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 卫星,利用 L 波段反演全球土壤湿度,L 波段是反演土壤湿度的最佳波段,但其空间分辨率大于 40 km。美国 NASA 于 2015 年初发射 SMAP (Soil Moisture Active Passive) 土壤湿度卫星,采用主动/被动联合反演技术获取空间分辨率为 10 km 的土壤湿度数据(Entekhabi et al., 2010)。张堂堂等(2008)利用 EVISAT/ASAR 资料反演土壤湿度,研究表明,若充分考虑植被对后向散射的影响,则获取的土壤湿度质量较高。师春香等(2011)则基于卫星遥感资料,利用 EnKF 滤波及陆面过程模型建立中国区域陆面土壤湿度同化系统。另外,国内学者也利用光学遥感技术开展了大量土壤湿度反演工作,不再一一赘述。

Owe et al. (2008) 和 De Jeu et al. (2008) 的全球微波土壤湿度反演工作比较有代表性。他们利用微波遥感技术,把地表微波亮温与土壤湿度等陆面参数联系起来,建立了一个被动微波能量辐射传输模型,以非线性循环方法最小化模型微波极化差异指数(Microwave Polarization Difference Index,  $I_{MPD}$ ),同时反演土壤湿度和植被光学深度。该模型被称为陆面参数反演模型(Land Parameters Retrieving Model, LPRM),已经应用于多颗极地轨道卫星被动微波资料反演全球土壤湿度,取了良好的效果(Liu et al., 2012; Parinussa et al., 2012, 2014)。

中国气象局卫星气象中心于 2010 年发射风云

三号气象卫星 B 星(FY3B),搭载微波辐射成像仪(Microwave Radiation Imager, MWRI) (Zhang et al., 2009); 并基于 MWRI 微波亮温资料反演了土壤湿度产品。我们拟选择东北地区为典型研究区,基于 FY3B/MWRI 微波亮温资料,采用 LPRM 陆面参数反演模型,反演地表土壤湿度。受自然条件影响,东北地区的土壤水分时空变化较大(张运福等, 2009),对作物的类型分布、生长发育和产量等有重要影响(李琛等, 2010; 孙倩倩等, 2014); 所以选择该地区进行研究比较有代表意义。我们利用中国气象局农业气象站的土壤湿度观测资料对卫星反演土壤湿度数据进行初步验证,并且,把我们反演的土壤湿度与再分析资料和其他遥感产品进行对比分析,评价他们的一致性。本文研究范围包括辽宁、吉林、黑龙江三省以及内蒙古自治区东部的赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市。

## 2 资料与方法

### 2.1 地表参数反演模型(LPRM)

LPRM 模型是一个基于极轨卫星的被动微波遥感数据能量辐射传输模型,同时可以反演土壤湿度、地表温度和植被光学深度。设定冠层上方观测到的地表微波辐射为  $T_{bp}$ ,它可用微波辐射亮温表示为低频波段的一阶近似辐射传输方程:

$$T_{bp} = T_s e_p \Gamma_p + (1 - \omega_p) T_c (1 - \Gamma_p) + (1 - e_p)(1 - \omega_p) T_c (1 - \Gamma_p) \Gamma_p, \quad (1)$$

其中,下标 p 表示极化方式(水平或垂直极化);  $\omega_p$  是植被的单次散射反照率;  $\Gamma_p$  为冠层透过率;  $e_p$  是土壤发射率;  $T_s$  和  $T_c$  分别为土壤和冠层的热力学温度。方程第一项定义了经植被层削弱后的土壤辐射,第二项将植被的上行辐射考虑在内,第三项则描述了植被的下行辐射被土壤向上反射后再次经植被削弱的上行辐射。

冠层透过率  $\Gamma_p$  可被进一步定义为植被光学厚度  $\tau_c$  及入射角  $\theta$  的函数:

$$\Gamma_p = \exp(-\tau_c / \cos \theta). \quad (2)$$

Jackson et al. (1982) 提出用植被指数量化植被对土壤微波辐射亮温的影响, LPRM 中采用微波极化差异指数 ( $I_{MPD}$ ), 定义为

$$I_{MPD} = (T_{b(V)} - T_{b(H)}) / (T_{b(V)} + T_{b(H)}), \quad (3)$$

其中,  $T_{b(V)}$  表示垂直极化亮温;  $T_{b(H)}$  表示水平极化亮温。低频时,  $I_{MPD}$  不仅包含植被信息,还含有许

多土壤辐射信息。可以采用  $I_{MPD}$  计算植被光学厚度  $\tau_c$  (Meesters et al., 2005; Owe et al., 2008):

$$\tau_c = C_1 \ln(C_2 \times I_{MPD} + C_3), \quad (4)$$

其中,  $C_i$  为土壤介电常数  $k$  的绝对值的函数:

$$C_i = P_{i,1} k^N + P_{i,2} k^{(N-1)} + \dots + P_{i,N} k + P_{i,(N+1)}, \quad (5)$$

$N$  为多次项的阶数,  $P_{i,j}$  是通过大量模拟得到的多次项系数。

将式 (2) 至 (5) 代入式 (1) 中, 辐射传输方程中的未知参数就只剩土壤发射率  $e_{tp}$  和土壤介电常数  $k$ 。土壤发射率可以通过 Fresnel 公式, 表示为介电常数的函数 (Choudhury et al., 1979)。至此, 土壤介电常数  $k$  就是唯一的未知参数。在知道了用土壤介电常数表达的冠层光学厚度和土壤发射率之后, 使用一个非线性的迭代过程优化介电常数, 以求解水平极化下的辐射传输方程 (水平极化方式对土壤水分更敏感)。直到迭代收敛, LPRM 模型就可以利用土壤属性数据和混合介质模型 (Wang and Schmugge, 1980) 来解算土壤湿度。根据风云三号卫星微波资料的特点, 我们使用 36.5 GHz 垂直极化亮温计算地表温度, 利用 10.65 GHz 水平和垂直极化亮温反演土壤湿度。

## 2.2 FY3B 微波资料

本研究采用中国气象局风云三号气象卫星 B 星 (FY3B) 微波亮温资料反演地表土壤湿度。FY3B 极轨卫星每天两次扫过地面同一地点, 即降轨和升轨。降轨和升轨的扫过时间分别为当地时间凌晨 2 点左右和 14 点左右。我们仅采用 FY3B 降轨资料反演土壤湿度。FY3B 卫星装载的微波辐射成像仪有 5 个频率, 分别为 10.65、18.7、23.8、36.5 和 89 GHz, 每个频率都有垂直和水平两个极化模式。本项研究中使用的是 X 波段 (10.65 GHz) 的水平和垂直极化亮温, 以及 Ka 波段 (36.5 GHz) 垂直极化亮温资料。X 波段的空间分辨率为  $51 \text{ km} \times 85 \text{ km}$ , 它具有穿透云雨大气的能力, 并且对地表粗糙度和土壤介电特性较敏感; Ka 波段的空间分辨率为  $18 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ , 主要用于获取地表温度。利用 X 波段和 Ka 波段, 我们最终获得土壤湿度的空间分辨率是  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

## 2.3 农业气象站观测资料与再分析资料

本文采用的土壤湿度站点数据来自中国气象局农业气象站。该套资料的时间分辨率是 10 天, 观测时间是每月的 8 日、18 日和 28 日。本文采用 2011 年 7 月到 2013 年 12 月东北地区 73 个农业气

象站 0~10 cm 层的平均土壤湿度数据, 其空间分布如图 1 所示。农业气象站土壤湿度观测资料是相对土壤湿度, 与卫星反演土壤湿度和再分析土壤湿度的单位不同, 所以我们不考察其绝对量, 而仅对其时空变化进行比较。如无特殊说明, 本文中所有的观测资料月均值是采用 8 日、18 日和 28 日每月三次观测的平均值, 而其他三套资料则是采用月内所有数据的平均值。

我们采用了欧洲中期天气预报中心的 ERA-Interim 和美国国家环境预报中心的 NCEP 两套广泛使用的再分析土壤湿度资料进行对比分析。ERA-Interim 土壤湿度的水平分辨率为  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ , 垂直方向上分为四层, 到地表距离分别为 7 cm、21 cm、72 cm、189 cm。本文使用了地表以下垂直厚度为 7 cm 的 ERA-Interim 土壤湿度资料。NCEP 土壤湿度再分析资料是一套比较早期的再分析资料, 已经被广泛使用在科学研究和业务应用上。NCEP 土壤湿度的水平分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$ , 垂直方向上有 10 cm 和 190 cm 两层。本文使用的是地表以下垂直厚度为 10 cm 的 NCEP 土壤湿度资料。

## 2.4 其他土壤湿度遥感产品

我们把利用 FY3B 微波资料和 LPRM 模型反演获得的土壤湿度产品与下述两种土壤湿度遥感产品进行比较。受欧洲空间局 Essential Climate

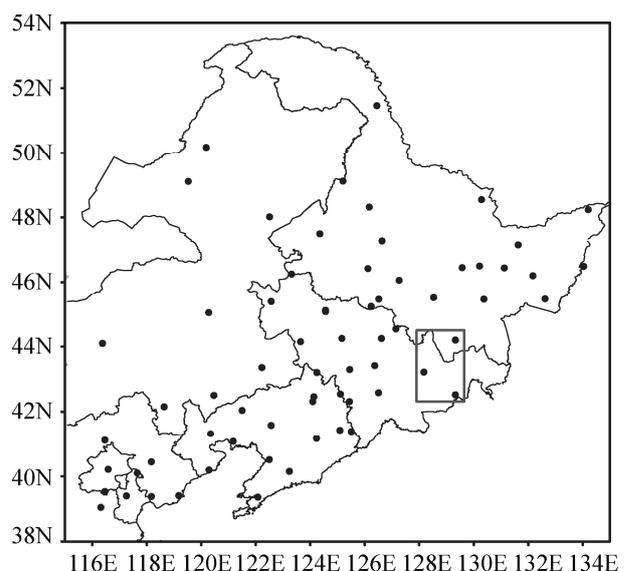


图 1 农业气象观测站东北地区 73 个站点分布。矩形框表示图 6 季节变化分析所使用的台站资料和空间范围

Fig. 1 Spatial distribution of the 73 agrometeorological stations in Northeast China. The rectangle area represents the ground sites used for seasonal variation analysis shown in Fig. 6

Variable (ECV) 项目资助, 遥感学家们把 LPRM 模型应用于 SMMR、SSM/I、TRMM-TMI、AMSR-E、AMSR-2、Windsat 等被动微波资料反演土壤湿度, 把 TU-Wien 模型应用于 SCAT、ASCAT 等主动微波遥感资料反演土壤湿度, 并且, 把主动和被动微波土壤湿度进行融合, 研制了长序列全球土壤湿度产品, 称为 ECV 土壤湿度 (Dorigo et al., 2015; Liu et al., 2012)。ECV 土壤湿度产品的时间跨度是 1978~2013 年, 时间分辨率是日, 空间分辨率是  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 该数据可从以下网站下载 <http://www.esa-soilmoisture-cci.org> [2016-03-15]。

国家卫星气象中心基于 FY3B/MWRI 微波亮温数据研发的土壤湿度产品是每日均值, 空间分辨率是  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 记为 FY3B<sub>official</sub>。FY3B<sub>official</sub> 产品采用了 Njoku and Chan (2006) 提出的迭代算法反演, 并且, 利用 Shi et al. (2006) 提出的裸土辐射参数化方案对其糙度参数进行了修改。该数据可从下网址下载 <http://fy3.satellite.cma.gov.cn/portalsite/default.aspx> [2016-03-15]。

### 3 结果与分析

#### 3.1 FY3B 反演土壤湿度的时空变化

基于风云三号极轨气象卫星微波亮温资料, 我们利用 LPRM 辐射传输模型反演我国东北地区的地表土壤湿度, 最终获得凌晨 2 时左右的逐日土壤湿度产品, 记为 FY3B<sub>LPRM</sub>。FY3B 卫星自 2011 年 7 月以后得到的数据连续性较好, 因此本文采用 2011 年 7 月至 2014 年 6 月的 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料作为研究对象。

图 2 给出了 2011 年 7 月至 2014 年 6 月东北地区三年内平均土壤湿度及春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月) 三个季节平均 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度的空间分布。东北地区冬季气温较低, 土壤中水分结冰, 无法通过 LPRM 辐射传输模型反演土壤湿度, 所以本文分析中不考虑冬季的情况。图 2a 给出了东北地区三年内平均 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度的空间分布。从图中可以看出, 东北地区大部分地区比较湿润, 土壤湿度范围在  $0.3 \sim 0.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。土壤湿度的空间变化整体上呈现自西向东逐渐增加的趋势。大兴安岭北部、小兴安岭东南段、三江平原、吉林东部及南部沿海地区的土壤湿度较高, 范围在  $0.4 \sim 0.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。内蒙古东部则较为干燥, 土壤湿度比较低, 为  $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。

图 2b-d 分别为东北地区三年内春、夏、秋三个季节平均 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度的空间分布。春季平均土壤湿度和秋季平均土壤湿度的空间分布大致相同, 均表现为自西向东逐渐变湿润的整体趋势。大兴安岭北部、小兴安岭东南段、三江平原、吉林东部及南部沿海地区的土壤湿度值较高, 介于  $0.5 \sim 0.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  之间; 西部内蒙古高原则较为干旱, 土壤湿度值介于  $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  之间。在夏季, 土壤湿度仍然呈现自西向东逐渐变湿的空间格局; 但是, 东部地区和西部地区的差异并不显著。与春季和秋季相比, 西部地区 (尤其是  $120^\circ\text{E}$  以西) 春季土壤湿度略有降低, 然而这种变化并不显著。在东部地区, 夏季土壤湿度则比春、秋两季土壤湿度显著降低, 表现为  $0.3 \sim 0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。这表明, 西部较为干旱的地区 (尤其是内蒙古高原) 土壤湿度的季节性变化不显著; 而东部地区土壤湿度的季节变化则极为显著, 春、秋两季土壤湿度较高, 而夏季土壤湿度显著降低。

东北地区 (尤其是  $120^\circ\text{E}$  以东) 属于温带大陆性季风气候, 春、秋两季降水少而夏季降水多。但是, 该地区夏季土壤湿度却较春、秋季节低。这是因为东北地区土壤湿度由降水和蒸散发共同决定, 土壤湿度主要表现为降水量与蒸散发量的差值。两者差值大, 则土壤湿度高; 反之, 则土壤湿度低。受季风影响, 夏季降水较多; 但是, 夏季气温也比春、秋季节高, 蒸散发旺盛; 夏季降水量与蒸散发量之差值可能小于春、秋季节两者的差值, 从而导致夏季土壤湿度相对较低。

#### 3.2 与农业气象站观测资料和 ERA-Interim、NCEP 再分析资料的对比分析

图 3 显示了东北地区内农业气象站、ERA-Interim、NCEP 和 FY3B<sub>LPRM</sub> 卫星反演土壤湿度在 2011 年 7 月到 2013 年 12 月平均值的空间分布。其中, 农业气象站平均土壤湿度分布是由图 1 所示的 73 个站点资料插值获得。先将 FY3B<sub>LPRM</sub> 卫星反演土壤湿度资料 (图 3d) 与农业气象站资料 (图 3a) 的空间分布进行比较。图 3a 显示, 农业气象站土壤湿度显示, 小兴安岭西北段、三江平原、吉林东部及南部沿海地区土壤湿度较高; 西部地区内蒙古高原土壤湿度较低。大兴安岭北部资料缺失。土壤湿度的空间变化整体上呈现自西向东、东北及东南方向逐渐增加的趋势。FY3B<sub>LPRM</sub> 卫星反演土壤湿度与农业气象站土壤湿度的空间分布有较好的一致

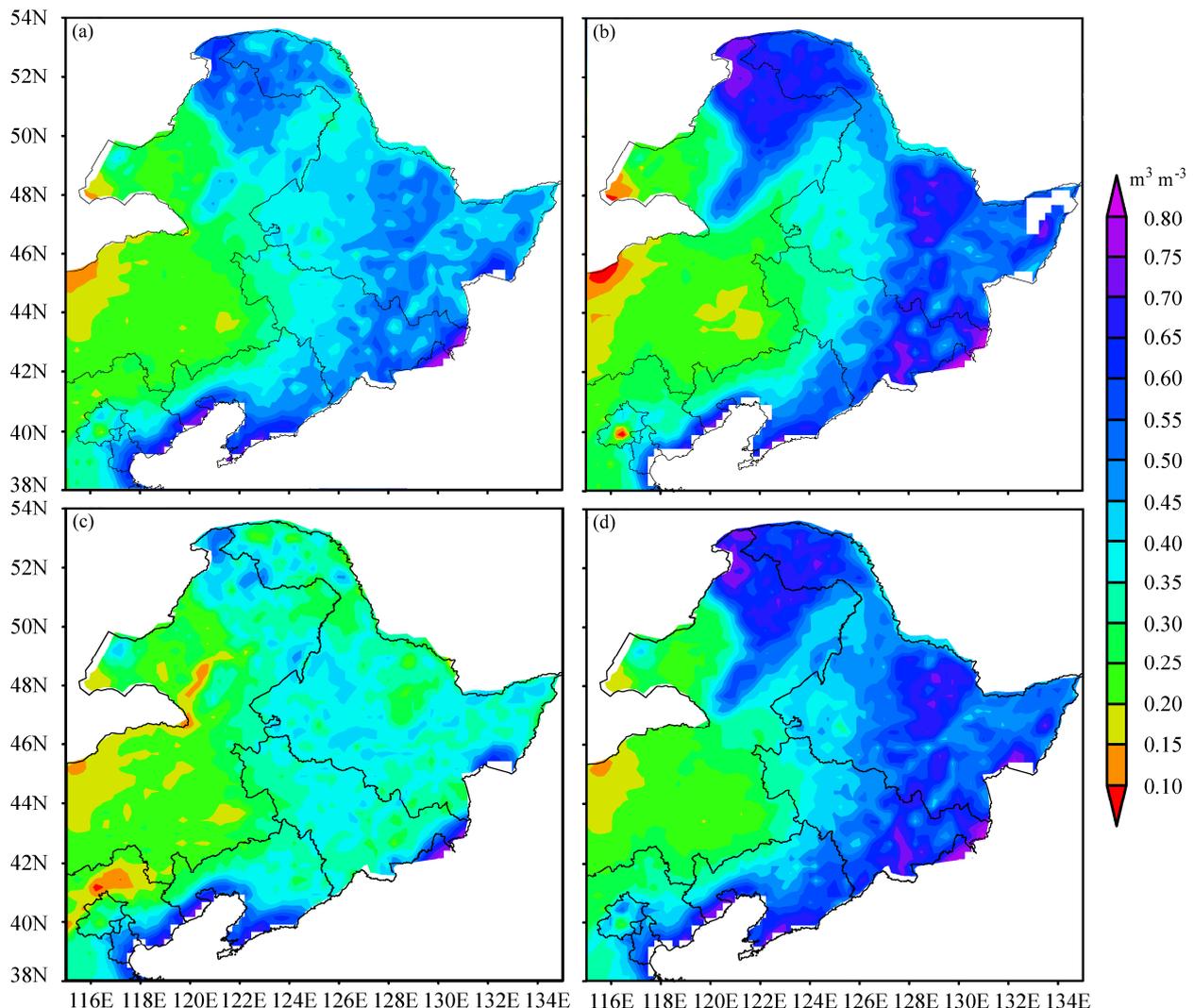


图2 我国东北地区2011年8月1日至2014年7月31日 (a) 年平均、(b) 春季平均、(c) 夏季平均和 (d) 秋季平均的FY3B<sub>LPRM</sub>土壤湿度的空间分布 (单位:  $m^3 m^{-3}$ )

Fig. 2 Spatial patterns of (a) annual average, (b) spring average, (c) summer average, and (d) winter average of FY3B<sub>LPRM</sub> (soil moisture derived from FY3B images using the Land Parameter Retrieving Model) soil moisture (units:  $m^3 m^{-3}$ ) over Northeast China for the period from 1 August 2011 to 31 July 2014

性。这表明,我们采用LPRM模型反演的FY3B<sub>LPRM</sub>卫星土壤湿度,能比较准确地反映年均土壤湿度空间变化。因为数据单位不同,我们不对两套资料的绝对量进行比较。需要说明的是,绝对土壤湿度较低的地区,相对土壤湿度一般也较低;相反,绝对土壤湿度较高的地区,相对土壤湿度一般也较高。严格说来,如果相对土壤湿度与绝对土壤湿度没有上述关系,两者的空间分布就完全没有可比性。在图3中,农业气象站的相对土壤湿度与FY3B<sub>LPRM</sub>、ERA-Interim、NCEP绝对土壤湿度的空间分布特征在大尺度上非常一致,均表现为西部干旱、东部湿

润的总体特征,这说明所采用的相对土壤湿度资料大致能够反映绝对土壤湿度的空间变化。

图3b和3c分别显示了ERA-Interim和NCEP土壤湿度再分析资料的空间分布。如图3b所示,ERA-Interim土壤湿度资料呈现自西向东逐渐增加的整体格局,与FY3B<sub>LPRM</sub>土壤湿度有较好的一致性。大兴安岭地区、小兴安岭东南段、三江平原、吉林东部及南部沿海地区土壤湿度明显偏高,而大兴安岭以南的内蒙古高原地区土壤湿度较低,较为干旱。图3c表明,NCEP土壤湿度也呈现自西向东逐渐变湿的整体格局,但是,与农业气象站、

ERA-Interim 和 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度相比, NCEP 不能细致地反映土壤湿度的空间变化, 这是因为 NCEP 资料的空间分辨率较低缘故。综上所述, 四种土壤湿度资料的空间分布大体一致, 符合我们对东北地区水循环规律的一般认识。这也说明, 我们基于 FY3B 微波亮温反演的土壤湿度资料, 能比较准确地反映东北地区土壤湿度的空间变化。但是, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与 ERA-Interim 和 NCEP 两种再分析资料在数值上有所差异。在比较干燥的地区如内蒙古高原, FY3B<sub>LPRM</sub> 与 ERA-Interim 土壤湿度在数值上相差不大, 在  $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  之间; 而 NCEP 土壤湿度较两者略高。在大兴安岭北部、小兴安岭东南段、三江平原、吉林东部及南部沿海等较为湿润的地区, ERA-Interim 与 NCEP 土壤湿度数据大体一致, 在  $0.25 \sim 0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  之间; 而 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度则比两者显著偏高, 在  $0.30 \sim 0.60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  之间。

为了比较四套土壤湿度资料在时间变化上是否具有 consistency, 我们分别计算了农业气象站土壤湿度与 FY3B、ERA-Interim 和 NCEP 土壤湿度的相关系数, 其空间分布如图 4 所示。为了与农业气象站资料的时间长度保持一致, 我们使用了 2011 年 7 月到 2013 年 12 月的月平均资料。为了便于计算, 对 ERA-Interim 和 NCEP 土壤湿度资料进行了重采样, 空间分辨率提高到了  $0.25^\circ$ 。图 4a 显示, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料与站点资料在绝大部分地区呈现正相关, 相关系数为  $0.2 \sim 0.9$ ; 在大兴安岭南段、呼伦贝尔高原与大兴安岭的中间地带、松嫩平原、吉林中部、三江平原等地相关性较强, 达到  $0.5 \sim 0.9$ 。这表明, 我们采用 LPRM 模型反演的 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与农业气象站土壤湿度资料在时间变化上具有很强的 consistency, 因而是可信的。因为该分析采用的是月平均数据, 因而主要反映的是季节性变化的一致性。只有在辽宁和吉林地区的极小区域内呈现微弱的负相关, 具体原因不明, 我们推测是由于农业气象站土壤湿度观测资料的不确定性所致。图 4b 显示, NCEP 土壤湿度资料与农业气象站土壤湿度资料在大部分地区相关性并不明显, 只在大兴安岭北段、吉林中西部、辽宁北部与河北省交界的地方等地区呈现强正相关性, 相关系数为  $0.5 \sim 0.8$ , 表明这些地区两者一致性较好。如同 FY3B 土壤湿度, NCEP 土壤湿度也在吉林和辽宁极小区域内呈现微弱的负相关。图 4c 显示,

ERA-Interim 与农业气象站土壤湿度在大兴安岭北段东部、黑龙江省、吉林东部等地呈现很强的正相关性, 相关系数为  $0.4 \sim 0.8$ , 表明两者具有很强的 consistency。然而, 两者在内蒙古高原东部、吉林和辽宁西部交汇的一片区域内呈现强负相关性, 相关系数为  $-0.8 \sim -0.4$ , 这表明, 在这个区域内 ERA-Interim 与农业气象站土壤湿度资料可能呈现反位相的时间变化, 数据可靠性存在较大问题。综上所述, FY3B<sub>LPRM</sub> 与农业气象站土壤湿度在东北大部分地区都呈现很好的一致性, 优于 ERA-Interim 和 NCEP 再分析资料。

利用日平均资料, 我们进一步计算了 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度和两套再分析土壤湿度资料的相关系数, 如图 5 所示。由图 5a 可知, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料与 ERA-Interim 土壤湿度再分析资料在呼伦贝尔高原、内蒙古高原中东部、松嫩平原和辽河平原西部等地呈现较强的正相关, 相关系数为  $0.3 \sim 0.7$ , 这些区域主要是土壤湿度较低的地区。而在大兴安岭北部、小兴安岭东南段、吉林东部等土壤湿度较高的地区, 两者呈现明显的负相关, 相关系数为  $-0.6 \sim -0.2$ 。图 5b 显示, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料与 NCEP 土壤湿度资料在中部平原一带无明显相关性, 在内蒙古高原一带的干旱地区呈现正相关, 相关系数为  $0.1 \sim 0.3$ ; 而在大兴安岭北部、小兴安岭东南段、吉林东部等湿润地区呈现强负相关性, 相关系数为  $-0.6 \sim -0.2$ 。总而言之, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与两套再分析资料在较为干旱的区域呈现较强的正相关, 而在比较湿润的地区大多呈现较强的负相关。

鉴于 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与再分析资料在土壤湿度较高的地区具有很大的不一致性, 有必要进一步分析哪套资料较为可靠。根据农业气象站土壤湿度资料的可获取情况, 我们选择吉林东部一个矩形区域进行对比分析, 该矩形区域内有三个农业气象站, 如图 1 中所示。在该矩形区域内, FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与 ERA-Interim 和 NCEP 再分析资料都呈现很强的负相关。因为农业气象站没有日分辨率的资料, 我们仅绘制该矩形区域内三套数据的多年 (2011 年 7 月至 2013 年 12 月) 月均值, 即其季节性变化的柱状图。在该区域, 自 2 月份中下旬起有 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料, 所以, 利用中下旬的平均值代表 2 月份平均值。图 6 显示, 所选矩形区域内 FY3B<sub>LPRM</sub> 卫星反演土壤湿度与农业气象站土壤湿

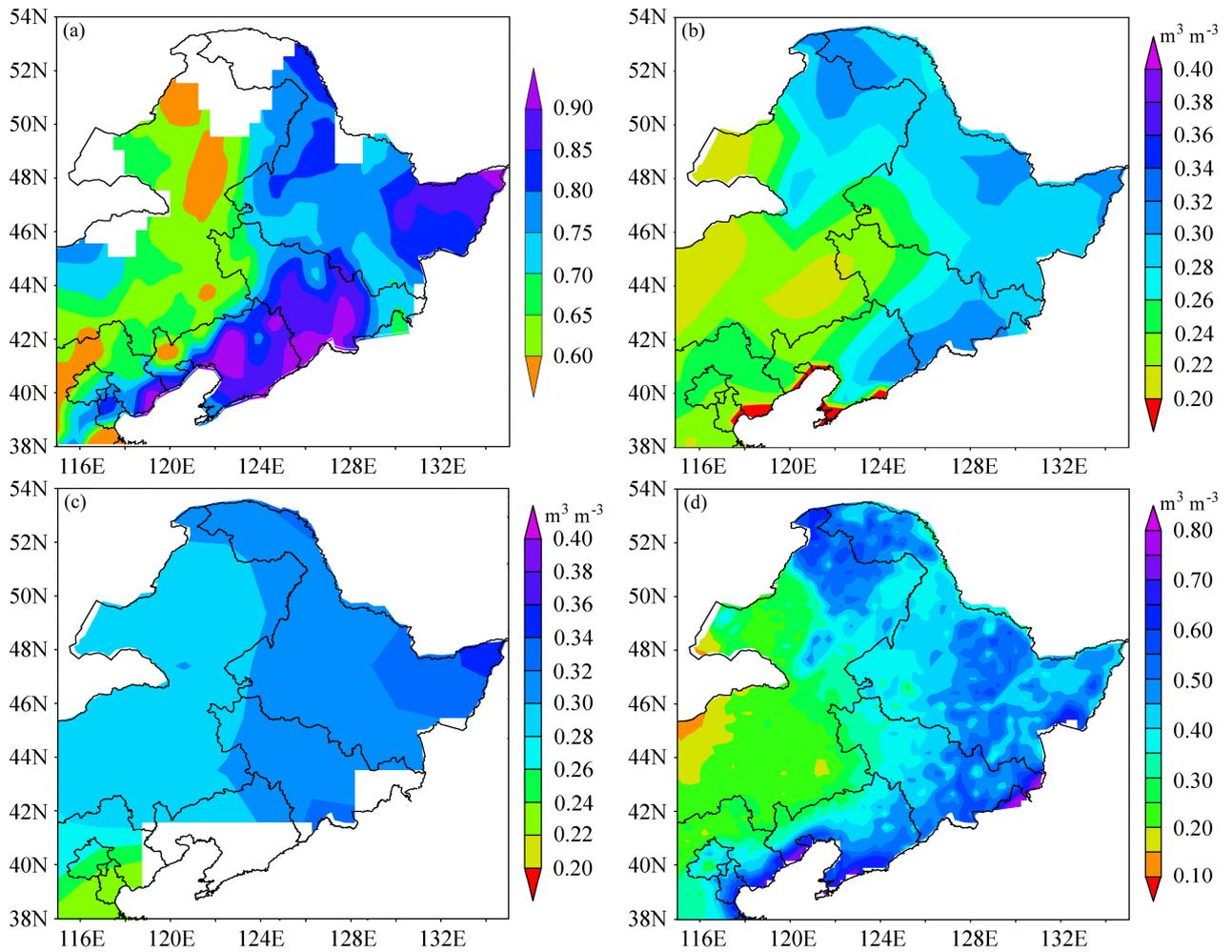


图3 2011年7月到2013年12月东北地区 (a) 农业气象站的相对土壤湿度、(b) ERA-Interim、(c) NCEP 和 (d) FY3B<sub>LPRM</sub> 卫星反演土壤湿度的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of averaged (a) soil relative moisture in-situ observations, and soil moisture from (b) ERA-Interim, (c) NCEP reanalysis, and (d) FY3B<sub>LPRM</sub> datasets in Northeast China during the period from July 2011 to December 2013

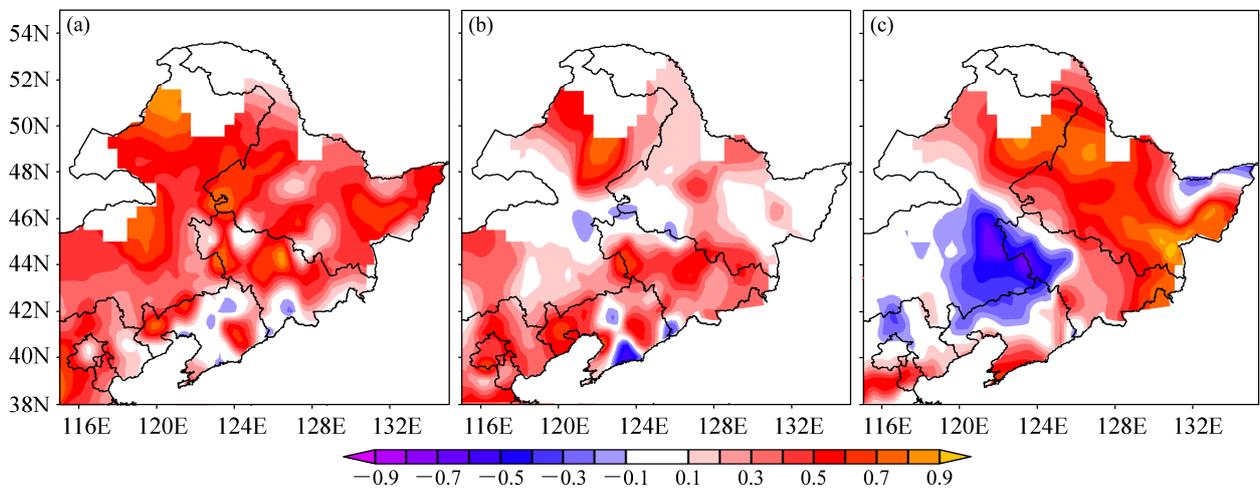


图4 农业气象站土壤湿度资料分别与 (a) FY3B<sub>LPRM</sub>、(b) NCEP 和 (c) ERA-Interim 土壤湿度资料的相关系数

Fig. 4 The correlation coefficients of soil moisture between in-situ observations and (a) FY3B<sub>LPRM</sub>, (b) NCEP, (c) ERA-Interim datasets

度在季节变化上具有良好的一致性。在春季，FY3B<sub>LPRM</sub> 与农业气象站土壤湿度均表现为逐渐增加趋势，这是因为春季气温回升，冰雪融水补给增加，土壤湿度增高。春末夏初，随着气温进一步回升，蒸散发量增大而降水补给不足，导致土壤湿度逐渐下降。夏末，季风到达东北地区，带来丰沛降水，降水量大于蒸散发量，土壤湿度逐渐增高。两者良好的一致性，说明 FY3B<sub>LPRM</sub> 资料准确地抓住了该地区土壤湿度的季节性变化。ERA-Interim 和 NCEP 再分析土壤湿度资料的季节性变化比较一致，但是与 FY3B<sub>LPRM</sub> 和农业气象站土壤湿度的季节性变化相差很大。两套再分析资料均没有抓住春季土壤湿度增加这一过程，而是表现为持续缓慢降低，5 月份到达低值，然后逐渐升高，8 月份开始逐渐下降。再分析资料这种季节性变化与 FY3B<sub>LPRM</sub>

土壤湿度资料基本相反，所以表现为负相关。图 6 也表明，FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度在春季和秋季显著高于两套再分析资料，在夏季，FY3B 土壤湿度与两套再分析资料相差不大。显而易见，FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度资料对季节性变化的描述要优于两套再分析资料。

### 3.3 与 ECV 和 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度遥感产品比较

我们利用 2011 年 7 月到 2013 年 12 月份的资料，分别计算了 FY3B<sub>LPRM</sub> 和 FY3B<sub>official</sub>、ECV 两套土壤湿度资料的相关系数，其空间分布如图 7 所示。由图 7a 可见，FY3B<sub>LPRM</sub> 和 FY3B<sub>official</sub> 两套资料在土壤湿度较低的呼伦贝尔高原、内蒙古高原中东部、松嫩平原和辽河平原的西部等地区表现为较弱的正相关，相关系数为 0.1~0.5。而在大兴安岭、小兴安岭东南段和东北三省东部等土壤湿度较高的地区，两套资料表现为很强的负相关，相关系数

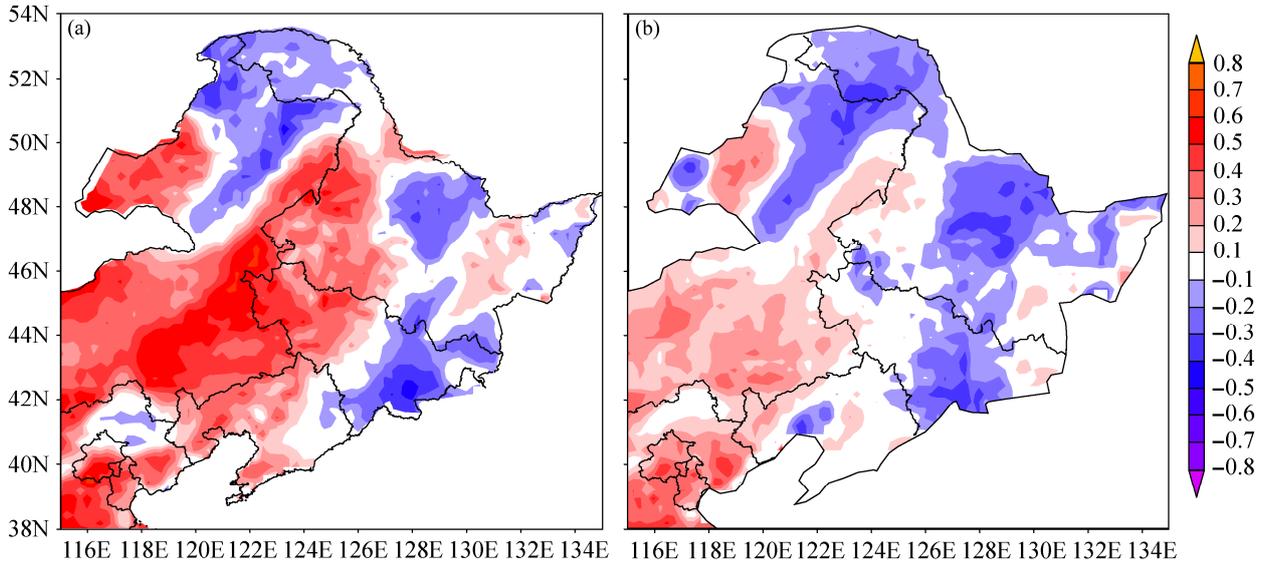


图 5 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与 (a) ERA-Interim 和 (b) NCEP 资料土壤湿度的相关系数空间分布  
Fig. 5 The correlation coefficients of soil moisture between FY3B<sub>LPRM</sub> and (a) ERA-Interim, (b) NCEP datasets

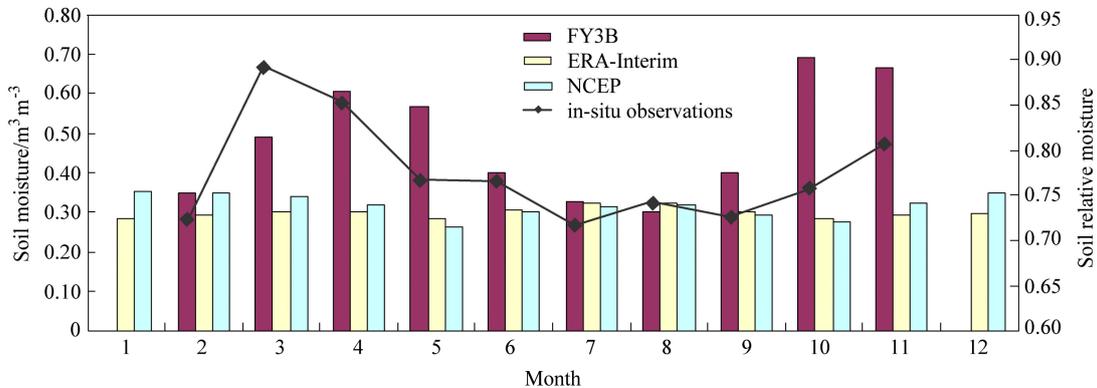


图 6 吉林东部地区农业气象站资料的相对土壤湿度以及 FY3B、ERA-Interim 和 NCEP 土壤湿度的季节性变化  
Fig. 6 The seasonal variations of soil relative moisture from in-situ observations, and soil moisture from FY3B, ERA-Interim, and NCEP reanalysis datasets in the eastern part of Jilin Province

达到-0.8~-0.5。图 7a 所示的负相关表明，在这些地区 FY3B<sub>LPRM</sub> 和 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度资料显著不一致。两者相关系数的空间分布，与 FY3B<sub>LPRM</sub> 和 ERA-Interim、NCEP 再分析资料的相关系数空间分布（图 5）较为一致，表明 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度资料与 ERA-Interim 和 NCEP 两套再分析资料具有类似的时空变化特征。在上述土壤湿度较高的地区，FY3B<sub>LPRM</sub> 和 FY3B<sub>official</sub> 资料的负相关程度高于 FY3B<sub>LPRM</sub> 和再分析资料的负相关程度。图 7b 显示了 FY3B<sub>LPRM</sub> 和 ECV 土壤湿度的相关系数。FY3B<sub>LPRM</sub> 与 ECV 土壤湿度在大部分地区表现为较强的正相关，相关系数达到 0.5~0.8，甚至更高。仅在黑龙江省中部和吉林省、辽宁省东部较小范围内，FY3B<sub>LPRM</sub> 与 ECV 土壤湿度表现为较弱的负相

关，相关系数在约 0.2~0.5 之间。在大兴安岭地区，两者几乎不相关。总而言之，FY3B<sub>LPRM</sub> 与 FY3B<sub>official</sub> 土壤湿度的一致性较差，尤其是在土壤较为湿润的地区，两者甚至呈现高度的负相关。相比之下，FY3B<sub>LPRM</sub> 与 ECV 土壤湿度则在绝大部分地区都高度相关。

FY3B<sub>LPRM</sub> 与 FY3B<sub>official</sub> 的负相关，主要是两者季节性变化的差异所致。我们选择了吉林省东部一个典型区域（如图 7 中矩形区所示），把 FY3B<sub>LPRM</sub>、FY3B<sub>official</sub> 和 ECV 三套卫星遥感资料与农业气象站的观测资料进行了对比。在典型区域内，FY3B<sub>LPRM</sub> 与 FY3B<sub>official</sub> 数据表现为较强的负相关，而与 ECV 数据表现为很强的正相关，该区域有 3 个数据质量较好的农业气象站。图 8 显示了典型区域内多年月

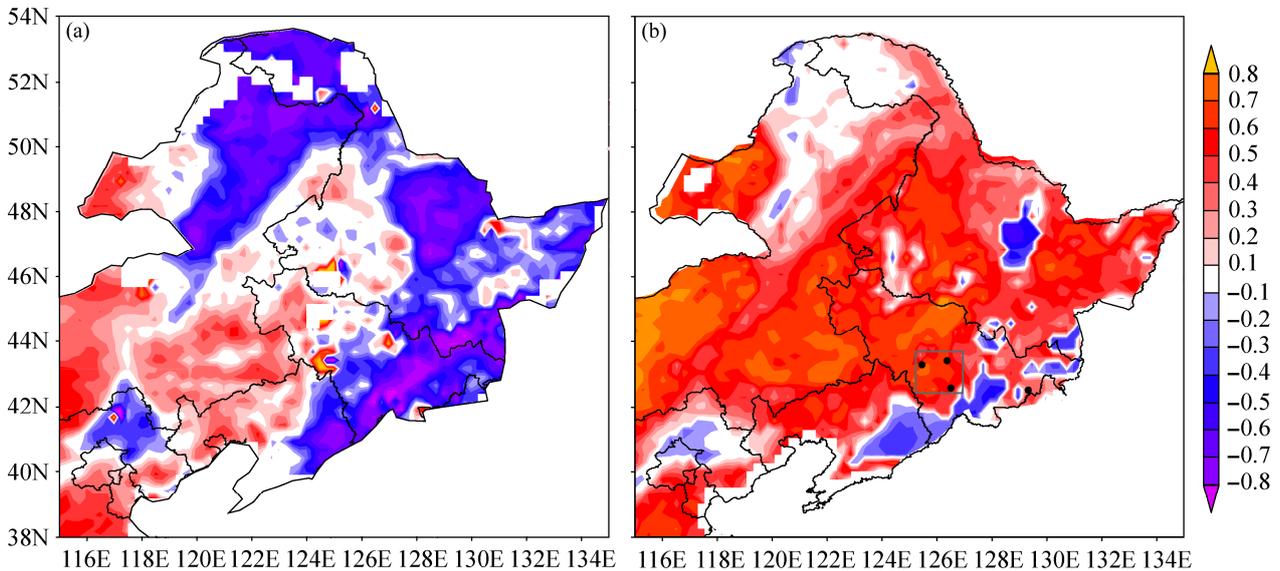


图 7 FY3B<sub>LPRM</sub> 土壤湿度与 (a) FY3B<sub>official</sub> 和 (b) ECV 土壤湿度的相关系数空间分布。吉林省境内的矩形区域是选定的用于图 8 时间序列分析的区域

Fig. 7 The correlation coefficients of soil moisture between FY3B<sub>LPRM</sub> and (a) FY3B<sub>official</sub>, (b) ECV (Essential Climate Variable). The rectangle area in Jilin Province is used in Fig. 8 to analyse time series

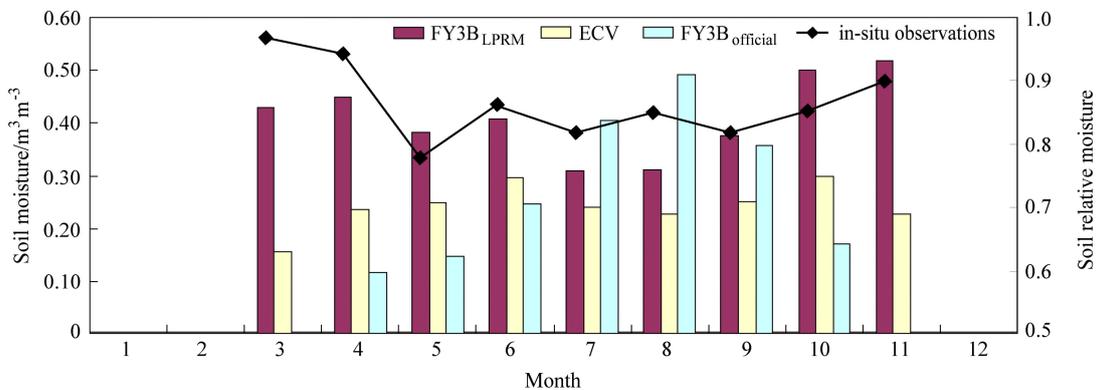


图 8 吉林东部地区农业气象站资料的相对土壤湿度以及 FY3B<sub>LPRM</sub>、FY3B<sub>official</sub>、ECV 土壤湿度的季节性变化

Fig. 8 The seasonal variations of soil relative moisture from in-situ observations, and soil moisture from FY3B<sub>LPRM</sub>, FY3B<sub>official</sub>, ECV dataset in the rectangle area in Jilin Province denoted in Fig. 7

均值的季节性变化。在该区域,  $FY3B_{LPRM}$ 、ECV 和农业气象站土壤湿度在 3 月到 11 月有数据, 而  $FY3B_{official}$  土壤湿度则只在 4 月到 10 月有数据。可以看出,  $FY3B_{LPRM}$  和农业气象站土壤湿度, 均表现为春季和秋季土壤湿度较高, 而夏季土壤湿度较低, 春夏之交土壤湿度下降, 而夏秋之交土壤湿度回升。ECV 土壤湿度在夏季有个下降过程, 与  $FY3B_{LPRM}$  和农业气象站土壤湿度类似; 但是, 它在春季持续上升, 在深秋有所下降, 这与  $FY3B_{LPRM}$  和农业气象站资料有所不同。 $FY3B_{official}$  土壤湿度从 4 月份开始持续上升, 8 月份达到最高值, 然后持续下降, 这与  $FY3B_{LPRM}$  和农业气象站资料差异巨大, 表现为反位相的季节性变化特征。

#### 4 结论

土壤湿度是气象学和水文学研究中的重要基础资料, 在水利工程领域也具有应用价值。基于国家气象局风云三号气象卫星微波资料, 我们采用 LPRM 微波辐射传输模型反演了我国东北地区的逐日土壤湿度资料, 并与农业气象站观测资料、ERA-Interim 和 NCEP 再分析资料、ECV 多卫星融合资料和国家卫星气象中心的  $FY3B/MWRI$  官方土壤湿度产品进行了对比分析, 评价了他们的差异性和一致性, 得到以下几点主要结论:

(1) 东北地区  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度产品, 整体上呈现从西侧内蒙古高原向北部和东部逐渐增加的空间分布, 西部地区土壤湿度较低, 而大兴安岭北部、小兴安岭东南段、三江平原、吉林东部及东南部沿海地区土壤湿度较大。这种空间分布在春季和秋季最为显著, 夏季, 因为东部地区土壤湿度显著降低, 这种空间差异有所减弱。农业气象站土壤湿度观测资料和 ERA-Interim、NCEP 两套再分析资料都显示了相似的空间分布, 表明我们利用 LPRM 模型反演的  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度抓住了东北地区土壤湿度空间分布的主要特征。

(2) 在时间变化方面, 在绝大部分地区  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度与农业气象站观测资料高度相关。但是, 在大兴安岭北部、小兴安岭东南段、吉林东部等偏湿润的地区,  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度与 ERA-Interim 和 NCEP 再分析资料呈显著的负相关, 差异性很大, 这主要是由于他们的季节性干湿变化的差异引起。在春季和秋季,  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度较高; 夏季降水较多,  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度反而较低。 $FY3B_{LPRM}$  土

壤湿度的这种季节性变化与农业气象站的观测资料基本一致, 而 ERA-Interim 和 NCEP 再分析资料不能反映这种季节性变化, 这表明我们反演的  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度在描述季节性变化方面优于再分析资料。

(3)  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度与 ECV 多源卫星融合产品和国家卫星气象中心产品  $FY3B_{official}$  土壤湿度进行对比, 发现  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度与  $FY3B_{official}$  土壤湿度在大兴安岭地区和东北三省东部等较为湿润的地区呈显著的负相关, 而与 ECV 土壤湿度的一致性则显著高于前者。在较为湿润的地区,  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度的季节性变化与农业气象站观测资料较为一致, 而  $FY3B_{official}$  土壤湿度则与农业气象站观测资料呈现明显的反位相季节性变化。在反映地表的季节性干湿变化方面, 我们反演的  $FY3B_{LPRM}$  土壤湿度数据明显优于  $FY3B_{official}$  土壤湿度数据。 $FY3B_{LPRM}$  与  $FY3B_{official}$  土壤湿度, 都是基于  $FY3B$  微波亮温资料, 两者的显著差别, 源于所采用的反演算法不同。具体原因不在本文讨论范围之内, 有待继续研究。

#### 参考文献 (References)

- Alexander L. 2011. Climate science: Extreme heat rooted in dry soils [J]. *Nat. Geosci.*, 4 (1): 12–13, doi:10.1038/ngeo1045.
- 陈书林, 刘元波, 温作民. 2012. 卫星遥感反演土壤水分研究综述 [J]. *地球科学进展*, 27 (11): 1192–1203. Chen Shulin, Liu Yuanbo, Wen Zuomin. 2012. Satellite retrieval of soil moisture: An overview [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 27 (11): 1192–1203.
- 陈少勇, 郭凯忠, 董安祥. 2008. 黄土高原土壤湿度变化规律研究 [J]. *高原气象*, 27 (3): 530–537. Chen Shaoyong, Guo Kaizhong, Dong Anxiang. 2008. Research of variety rule of soil humidity in Loess Plateau of China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 530–537.
- Choudhury B J, Schmugge T J, Chang A, et al. 1979. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils [J]. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 84 (C9): 5699–5706, doi:10.1029/JC084iC09p05699.
- Draper C S, Walker J P, Steinle P J, et al. 2009. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 113 (4): 703–710, doi:10.1016/j.rse.2008.11.011.
- De Jeu R A M, Wagner W, Holmes T R H, et al. 2008. Global soil moisture patterns observed by space borne microwave radiometers and scatterometers [J]. *Surveys in Geophysics*, 29 (4–5): 399–420, doi:10.1007/s10712-008-9044-0.
- Dorigo W A, Gruber A, De Jeu R A M, et al. 2015. Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations [J]. *Remote Sens. Environ.*, 162: 380–395, doi:10.1016/j.rse.2014.07.023.
- Entekhabi D, Njoku E G, Neill P E O, et al. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 98 (5): 704–716,

- doi:10.1109/JPROC.2010.2043918.
- 郭维栋, 马柱国, 王会军. 2007. 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, 12 (1): 20–28. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 20–28, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.01.003.
- Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. 1982. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies [J]. Water Resour. Res., 18 (4): 1137–1142, doi:10.1029/WR018i004p01137.
- 姜丽霞, 李帅, 纪仰慧, 等. 2009. 1980~2005 年松嫩平原土壤湿度对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 20 (1): 91–97. Jiang Lixia, Li Shuai, Ji Yanghui, et al. 2009. Responses of soil humidity on Songnen Plain to climate change in 1980–2005 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 20 (1): 91–97.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 305 (5687): 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217.
- 李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究 [J]. 科学通报, 56 (16): 1288–1300. Li M X, Ma Z G, Niu G Y. 2011. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. Chinese Sci. Bull., 56 (17): 1809–1820, doi:10.1007/s11434-011-4493-0.
- 李琛, 沈新勇, 李伟平. 2010. 东北地区土壤湿度的诊断分析 [J]. 安徽农业科学, 38 (9): 4969–4700. Li Chen, Shen Xinyong, Li Weiping. 2010. Diagnostic analysis of soil moisture in Northeast China [J]. Journal of Anhui Agricultural Science (in Chinese), 38 (9): 4969–4700, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2010.09.107.
- Liu Y Y, Dorigo W A, Parinussa R M, et al. 2012. Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals [J]. Remote Sens. Environ., 123: 280–297, doi:10.1016/j.rse.2012.03.014.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 2000. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系 [J]. 气象学报, 58 (3): 278–287. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (3): 278–287, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.03.003.
- Meesters A G C A, De Jeu R A M, Owe M. 2005. Analytical derivation of the vegetation optical depth from the microwave polarization difference index [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2 (2): 121–123, doi:10.1109/LGRS.2005.843983.
- Njoku E G, Chan S K. 2006. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations [J]. Remote Sens. Environ., 100 (2): 190–199, doi:10.1016/j.rse.2005.10.017.
- Owe M, De Jeu R, Holmes T. 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture [J]. J. Geophys. Res., 113 (F1): 196–199, doi:10.1029/2007JF000769.
- Parinussa R M, Holmes T R H, De Jeu R A M. 2012. Soil moisture retrievals from the WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 50 (7): 2683–2694, doi:10.1109/TGRS.2011.2174643.
- Parinussa R M, Wang G, Holmes T R H, et al. 2014. Global surface soil moisture from the microwave radiation imager onboard the Fengyun-3B satellite [J]. Int. J. Remote Sens., 35 (19): 7007–7029, doi:10.1080/01431161.2014.960622.
- Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth-Science Reviews, 99(3–4): 125–161.
- 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 2011. 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, 41 (3): 375–385. Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. Sci. China: Earth Sci., 54 (9): 1430–1440, doi:10.1007/s11430-010-4160-3.
- Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, et al. 2006. Physically based estimation of bare-surface soil moisture with the passive radiometers [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44 (11): 3145–3153, doi:10.1109/TGRS.2006.876706.
- 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 2005. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 129–138. Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zuqiang, et al. 2005. Distribution and variation features of soil humidity anomaly in Huaihe River basin and its relationship with climatic anomaly [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 129–138, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.02.001.
- 孙倩倩, 刘晶淼, 梁宏. 2014. 东北地区土壤湿度的区域性预报模型研究 [J]. 自然资源学报, 29 (6): 1065–1075. Sun Qianqian, Liu Jingmiao, Liang Hong. 2014. Analysis of regional soil moisture forecasting model in Northeast China [J]. Journal of Nature Resources (in Chinese), 29 (6): 1065–1075, doi:10.11849/zrzyxb.2014.06.014.
- Wagner W, Lemoine G, Rott H. 1999. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data [J]. Remote Sens. Environ., 70 (2): 191–207, doi:10.1016/S0034-4257(99)00036-X.
- 王丹, 南瑞, 韩俊杰, 等. 2012. 黑龙江省土壤湿度及其对气温和降水的敏感性分析 [J]. 气象与环境学报, 28 (2): 49–53. Wang Dan, Nan Rui, Han Junjie, et al. 2012. Characteristics of soil humidity and its sensitivity to temperature and precipitation in Heilongjiang Province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28 (2): 49–53, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.02.010.
- Wang G J, Dolman A J, Blender R, et al. 2010. Fluctuation regimes of soil moisture in ERA-40 reanalysis data [J]. Theor. Appl. Climatol., 99 (1–2): 1–8, doi:10.1007/s00704-009-0111-3.
- Wang J R, Schmugge T J. 1980. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 18 (4): 288–295, doi:10.1109/TGRS.1980.350304.
- 王磊, 文军, 韦志刚, 等. 2008. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应 [J]. 高原气象, 27 (6): 1257–1266. Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. 2008. Soil moisture over the west of Northwest China and its response to climate [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (6): 1257–1266.
- 王万秋. 1991. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 15 (5): 115–123. Wang Wanqiu. 1991. Numerical experiments of the soil temperature and moisture anomalies' effects on the short term climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (5): 115–123, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.05.14.
- 姚坤, 师庆东, 逢淑女, 等. 2008. 遥感反演土壤湿度综述 [J]. 楚雄师范学院学报, 2008, 23 (6): 89–92. Yao Kun, Shi Qingdong, Feng Shunv,

- et al. 2008. A brief review of remote sensing retrieving the soil moisture [J]. *Journal of Chuxiong Normal University (in Chinese)*, 23 (6): 89–92, doi:10.3969/j.issn.1671-7406.2008.06.021.
- Zhang P, Yang J, Dong C H, et al. 2009. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 3 (3): 367–373, doi:10.1007/s11707-009-0036-2.
- 张堂堂, 文军, Van Der Velde R, 等. 2008. 基于 ENVISAT/ASAR 资料的土壤湿度反演方法 [J]. *高原气象*, 27 (2): 279–285. Zhang Tangtang, Wen Jun, Van Der Velde R, et al. 2008. Soil moisture retrieval based on ENVISAT/ASAR data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 279–285.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. *大气科学*, 32 (3): 581–597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part I: Multi-data inter-comparison [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 581–597, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15.
- 张运福, 胡春丽, 赵春雨, 等. 2009. 东北地区降水年内分配的不均匀性 [J]. *自然灾害学报*, 18 (2): 89–94. Zhang Yunfu, Hu Chunli, Zhao Chunyu, et al. 2009. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation in Northeast China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 18 (2): 89–94, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2009.02.014.
- Zhao J, Jin J L, Guo Q Z, et al. 2014. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28 (8): 2175–2183, doi:10.1007/s00477-014-0881-8.
- 郑兴明. 2012. 东北地区土壤湿度被动微波遥感高精度反演方法研究 [D]. 中国科学院东北地理与农业生态研究所博士学位论文. Zheng Xingming. 2012. Research on soil moisture microwave remote sensing inversion method in northeast of China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences.