

地表土壤水分的卫星遥感反演方法研究进展

徐嘉昕¹ 李璇¹ 朱永超² 房世波¹ 吴东¹ 武英洁¹

(1 中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081; 2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730000)

摘要: 土壤水分是影响农业生产的重要因子之一, 掌握农田地表土壤水分对农业生产实践有着重要的意义和作用。目前监测土壤水分的方法有传统的点尺度物理监测、基于物理模型和数学计算方法的模拟技术以及遥感监测方法。而随着遥感技术的发展, 逐渐克服了前两种方法由于采样点限制以及所需参数复杂等制约因素。从不同的遥感波段和遥感方法划分, 介绍了可见光-近红外遥感、热红外遥感、微波遥感的发展现状及不同波段所对应的研究方法, 并对各种方法的优势和局限性进行了总结, 加强改进模型方法研究, 增强主被动微波结合反演方法的利用对于减少植被对土壤水分的影响有很大的益处, 这也是今后遥感技术反演农田地表土壤水分的趋势。

关键词: 热红外, 遥感反演, 合成孔径雷达, 被动微波, 干旱指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.003

Progress of the Methods of Remote Sensing Monitoring the Soil Moisture

Xu Jiixin¹, Li Xuan¹, Zhu Yongchao², Fang Shibo¹, Wu Dong¹, Wu Yingjie¹

(1 Institute of Ecoenvironment and Agrometeorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730000)

Abstract: Soil moisture is one of the crucial elements affecting agricultural production. To monitor the surface soil moisture of the cropland is of great significance for agricultural production. Currently, the methods applied to monitor the soil moisture include the traditional physical measurement based on the sites, the simulation techniques by physical models and mathematical methods, and the remote sensing technology. The deficiencies induced by the first two methods mainly are the limited samples and the complicated parameters. Now these have been overcome with the development of remote sensing. On the basis of the differences among spectral bands and methods for remote sensing, this paper introduces the progress of remote sensing techniques about visible-near infrared, thermal infrared, microwave and their corresponding methodology, summarizes the advantages, disadvantages and applicability for different methods and also give the outlook about the retrieval of surface soil moisture of cropland by the remote sensing technology. Strengthen the study of improved model method and enhance the use of active and passive microwave data to reduce the influence of vegetation on soil moisture. It is also the trend of remote sensing monitoring the soil moisture over agricultural area in the future.

Keywords: thermal infrared, remote sensing monitoring, synthetic aperture radar, passive microwave, drought index

0 引言

在地球生态系统中, 地表土壤水分是连接地表水和地下水的纽带, 也是气候、水文和农业等研究领域衡量土壤干旱程度的重要指标^[1-3]。同时可以通过其变化来改变地表反射率、地表蒸发量、土壤热容量和植被生长状况等地表参数, 从而影响地表水热过程^[4-5], 在农业生产中, 农田地表土壤水分是农作物生长发育

的基本条件, 也是作物干旱灾害的预警信息^[6], 在作物灌溉前, 土壤水分是干旱监测的重要指标、判断作物需水量的重要依据和作物长势监测、估产的重要参数; 作物灌溉后, 土壤水分的变化情况是评价灌溉效果的重要依据。因此获取精确可靠的土壤水分信息对准确实施农田灌溉具有重要的指导意义。

近年来, 国内外对土壤水分的反演做了大量研究, 现有反演方法已相对成熟, 主要有以下三类: 传统的基于点尺度土壤水分物理监测方法、基于物理模型和数学计算方法的土壤水分模拟技术和基于空间遥感技术的土壤水分反演方法^[3, 7-9]。传统的基于点尺度土壤水分物理监测方法主要有取样称重法(烘土法)^[10]、张力计法(负压计法)^[11]、电阻法、中子仪

收稿日期: 2018年9月13日; 修回日期: 2019年2月27日

第一作者: 徐嘉昕(1993—), Email: xjxkiwi@163.com

通信作者: 房世波(1974—), Email: sbfang0110@163.com

资助信息: 干旱气象科学研究基金(IAM201607); 中国气象科学研究院的基本科研业务费(2018Z008, 2017Z004); 国家自然科学基金(61661136005)

法^[12]、驻波比法、时域反射仪法（TDR法）^[13-14]和土壤湿度计法等。上述方法具有测定的土层多、深度大、精度高等特点，同时，大气和植被等要素对其影响很小。由于取样称重法在测量精度上具有其他方法不可比拟的优势，因此它作为一种实验室测量方法并用于其他方法的标定将长期存在。但是，由于土壤水分在空间、时间尺度上的变化都较大，因此基于点尺度的土壤水分监测方法最大的不足则是取样代表性难以保证，不仅会消耗大量人力财力，而且无法在规定时间内取得大范围的地表土壤湿度信息，数据实时性差。基于数学模型的土壤水分模拟计算方法主要有数理统计模型（统计回归模型、人工神经网络模型等）^[15]、概念性机理模型、物理机理模型等。对于较小空间尺度来说，一般利用确定性的土壤水动力模型或者基于随机理论的数理统计模型都可对土壤水分变化进行研究。其中，数理统计模型与概念型模型这类模型的优势是参数要求不高，计算量较小，缺点是模拟精度有限；而物理机理模型虽然模拟精度较高，但对土壤参数要求较为复杂，所需气象数据较多，不适用于大尺度农田地表土壤水分监测^[16-18]。

而随着空间遥感技术的发展，以上反演土壤水分方法的缺点可以逐渐被克服，其时效快、区域广等特点使得遥感技术成为反演农田地表土壤水分变化的主要方法。从原理上可分为两大类：一类基于土壤水分的变化引起土壤光谱反射率的变化。另一类基于干旱引起植物生理过程的变化，从而改变叶片的光谱属性，并显著地影响植物冠层的光谱反射率^[19]。

1 土壤水分遥感反演方法发展与现状

1.1 可见光和近红外遥感

该方法主要利用土壤及土壤上所覆盖植被的光谱反射特性来估算土壤水分。当土壤含水量较高时，各个波段的光谱反射率下降，反之上升，因此光谱反射率在一定程度上可以反映土壤表面的干湿状况。20世纪60年代初期，基于遥感技术进行土壤水分反演的理论研究已经开始了^[20]，到70年代中期，日本学者以5种土壤的反射率为基础，建立了绿波段和蓝波段的胶片密度和土壤水分含量的多元回归线性方程^[21]。Henricksen等^[22]利用1983年和1984年两个时期Ethiopia的四景AVHRR影像，比较了同地区不同时期的干旱状况。80年代起我国学者也开始了此方面的研究，李建龙等利用TM 2~4波段数据，建立了农田土壤水分遥感监测模型，采用反演模型与地面实践相结合的方法，建立土壤水分遥感动态监测系统^[23]。徐彬彬等^[24-26]通过野外观测不同水分情况下的稻田光谱反射曲线，发现水体在蓝绿波段（0.4~0.6 μm）反射率较

高，红波段开始下降，红外波段明显吸收；水中含有较多泥沙时，光谱反射率明显增高，湿土的光谱反射率明显下降。进一步表明特别是在红外波段，土壤含水量的增加会降低光谱反射率。但是当田间持水量超过最大值时，土壤的光谱反射率又再次增加，这是因为土壤水表面的镜面反射引起的。郭广猛等基于水的吸收率曲线，利用MODIS数据的中红外波段来反演土壤湿度，通过野外调查验证和回归分析，表明土壤水分与MODIS第7波段的反射率之间具有良好的相关性^[27]。但虞献平等^[28]指出，利用土壤反射率的差异来反演土壤水分，会因为土壤类型不同，使得土壤水分反演误差较大。

1.2 热红外遥感

该方法的理论基础是不同水分含量土壤的热力学特征明显不同，即土壤水分的变化会导致土壤的热传导系数、密度以及比热容都发生变化，从而使得土壤温度发生变化。热红外遥感主要是利用土壤表面温度变化幅度、土壤植被冠层和冠层空气温差、表观热惯量、蒸散比等来监测土壤含水量^[29]。Myers等^[30]指出，无植被或者植被覆盖较少的土壤其水分含量可由土壤表面温度变化测定，最深可到50 cm。Watson等通过热红外遥感影像插值计算得到地表温度日较差，从而获得土壤热惯量^[31]。Jackson^[32-34]等利用NDVI监测干旱发现只有水分胁迫严重时，植被指数才会发生明显的变化。Kogan^[35]在20世纪90年代初提出了植被状态指数（Vegetation Condition Index，VCI），Price用植被指数、地表温度来监测研究区蒸散发量。章立玲等^[36]通过实验发现，土壤水分含量越大，土壤温度变化越慢，潮湿土壤热容量大，温度不易升高，干燥土壤热容量低，温度易升高。罗秀陵^[37]和李杏朝^[38]利用AVHRR4波段的数据，分别结合密度分割法、日夜温差法和地面气象、农情等资料进行旱情监测。目前有较多植被、水文、土壤水分等指数应用于微波遥感法，如表1所示^[39]。

1.3 微波遥感

微波遥感反演土壤水分的理论基础是土壤的介电特性与土壤水分含量有密切的相关性，表现在遥感影像是灰度值及亮度温度的变化^[40-41]。液态水的介电常数大概在80，干土的为3，随着土壤中水分含量的不断增加，土壤介电常数随之增大，导致后向散射系数同样增大^[42-44]。李俐等^[45]总结出用于建立土壤水分与后向散射系数之间关系的常用算法，主要有变化检测法^[46-47]、回归分析法^[48-49]、人工神经网络法^[50-52]、优化方法^[53]、查找表反演法^[54-55]、多极化数据反演方法^[56-57]。主要分为主动微波遥感、被动微波遥感和主被动结合微波遥感。

表1 常用指数名称、类型总结
Table 1 Summary of common index type

指数名称	指数类型	所需变量
干旱异常指数 (AAI)	降水和温度	<i>P, T, PET, ET</i>
Keetch-Byram干旱指数 (KBDI)	降水和温度	<i>P, T</i>
标准化降水指数 (SPI)	降水和温度	<i>P</i>
综合干旱指数 (CDI)	合成、建模或实验	<i>Mod, P, Sat</i>
全球干旱监测与预报系统 (GIDMaPS)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod</i>
全球土地数据同化系统 (GLDAS)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod, Sat</i>
多变量标准化干旱指数 (MSDI)	合成、建模或实验	<i>Multiple, Mod</i>
美国干旱监测 (USDM)	合成、建模或实验	<i>Multiple</i>
增强型植被指数 (EVI)	植被	<i>Sat</i>
蒸发气压指数 (ESI)	植被	<i>Sat, PET</i>
归一化植被指数 (NDVI)	植被	<i>Sat</i>
温度条件指数 (TCI)	植被	<i>Sat</i>
植被条件指数 (VCI)	植被	<i>Sat</i>
植被干旱响应指数 (VegDri)	植被	<i>Sat, P, T, AWC, LC, ER</i>
植被健康指数 (VHI)	植被	<i>Sat</i>
水需求满足指数 (WRSI和Geo WRSI)	植被	<i>Sat, Mod, CC</i>
加权异常标准化降水 (WASP)	降水和温度	<i>P, T</i>
干旱指数 (AI)	降水和温度	<i>P, T</i>
中国Z指数 (CZI)	降水和温度	<i>P</i>
作物水分指数 (CMI)	降水和温度	<i>P, T</i>
干旱面积指数 (DAI)	降水和温度	<i>P</i>
干旱监测指数 (DRI)	降水和温度	<i>P, T</i>
有效干旱指数 (EDI)	降水和温度	<i>P</i>
NOAA干旱指数 (NDI)	降水和温度	<i>P</i>
帕尔默干旱严重性指数 (PDSI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
帕尔默Z指数 (PzI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
降雨异常指数 (RAI)	降水和温度	<i>P</i>
自校准Palmer干旱严重性指数 (sc-PDSI)	降水和温度	<i>P, T, AWC</i>
标准化异常指数 (SAI)	降水和温度	<i>P</i>
标准化降水蒸发指数 (SPEI)	降水和温度	<i>P, T</i>
帕尔默水文干旱严重性指数 (PHDI)	水文	<i>P, T, AWC</i>
标准化水流指数 (SSFI)	水文	<i>SF</i>
标准水位指数 (SWI)	水文	<i>GW</i>
流域干旱指数 (SDI)	水文	<i>SF</i>
地表水供应指数 (SWSI)	水文	<i>P, RD, SF, S</i>
土壤水分异常 (SMA)	土壤水分	<i>P, T, AWC</i>
干旱农业参考指标 (ARID)	降水和温度	<i>P, T, Mod</i>
作物特异性干旱指数 (CSDI)	降水和温度	<i>P, T, T_d, W, Rad, AWC, Mod</i>
校正干旱指数 (RDI)	降水和温度	<i>P, T, S, RD, SF</i>
总干度指数 (ADI)	水文	<i>P, ET, SF, RD, AWC, S</i>
标准融雪和降雨指数 (SMRI)	水文	<i>P, T, SF, Mod</i>
蒸散发亏缺指数 (ETDI)	土壤水分	<i>Mod</i>
土壤水分亏缺指数 (SMDI)	土壤水分	<i>Mod</i>
土壤水分储存 (SWS)	土壤水分	<i>AWC, RD, ST, SWD</i>
土壤调整植被指数 (SAVI)	植被	<i>Sat</i>
归一化差分水指数 (NDWI)	植被	<i>Sat</i>

注: *P*为降水数据; *T*为温度数据; *Mod*为建模数据; *Sat*为卫星数据; *Multiple*为多重指标应用; *AWC*为有效水分含量; *SF*为径流数据; *GW*为地下水数据; *RD*为水库数据; *S*为积雪场数据; *ET*为蒸发皿蒸发数据; *PET*为潜在蒸发皿蒸发数据; *T_d*为露点温度数据; *W*为风速数据; *Rad*为太阳辐射数据; *LC*为土地覆盖类型数据; *ER*为生态区数据; *CC*为产量系数数据

1.3.1 主动微波遥感

土壤含水量不同,其雷达回波信号也不同,据此可建立土壤水分与后向散射系数的关系。目前大多数研究多采用统计方法,通过实验数据的相关分析建立土壤水分与后向散射系数之间的经验函数关系^[21],其中以线性关系的应用最为普遍。国内李杏朝^[58]利用这种方法,在植被较少、地形较平坦的区域用X波段散射计测量了土壤后向散射系数,并与同步获取的X波段、HH极化的机载SAR影像反演出的土壤水分相比较,得出两种方法所测出的土壤水分精度相似。田国良等^[59]利用11月中旬在河南取得的波段机载合成孔径雷达影像进行小麦区土壤水分监测,将测量的结果分成8个不同水分等级。曾旭静等^[60]以哨兵1号双极化合成孔径雷达遥感影像为基础,结合同时段光学遥感数据Landsat 8,对北安—黑河高速沿线地区不同植被覆盖程度下复杂地表土壤水分进行反演研究,探讨不同极化组合方式在不同土地利用方式下的土壤水分含量反演结果。结果表明:VH等极化方式反演的整体效果不佳,VV极化和双极化VV/VH组合在裸地和低植被覆盖区的效果更好,而VV与辅助变量NDVI组合方式在中等植被覆盖地区土壤含水量反演精度最高,同时也说明了哨兵1号C波段合成孔径雷达在土壤水分研究中的高效性和精确性。李新武^[61]等提出了一个针对重复轨道SIR-C数据的极化干涉SAR植被覆盖地表土壤水分反演方法,同时,探讨和分析了极化干涉SAR最大似然反演分解模型在植被覆盖区土壤水分反演中的潜力和有效性。试验结果表明:基于极化干涉SAR最大似然反演分解模型的植被覆盖区土壤水分反演方法得到的结果具有足够高的反演精度。

1.3.2 被动微波遥感

随着土壤水分的变化,由辐射计观测到的亮温也在随之变化。针对裸露的土壤表面而言,土壤水分的增加将会导致亮度温度减小。国内外专家围绕两者的关系做了大量的野外试验和理论研究,与主动微波遥感相比,被动微波遥感土壤水分研究开展较早,技术和算法相对也更加成熟一些。20世纪70年代,Schmugge等^[62]对试验数据进行了分析,发现亮度温度与土壤水分具有较好的线性相关。在植被覆盖的地区,由于植被中含有水分,使得同一地区土壤水分的反演出现了较大误差,因此需建立土壤水分与植被之间的联系^[63-64]。Christian等通过对大麦5个波段的微波亮度进行野外测量,得出了被动微波辐射信息包含土壤水分和植被含水量信息,并且植被水分对低频波段产生了强烈的反应,而作物生育过程对高频波段的发展变化更加敏感。毛克彪等^[65]总结出针对于裸

露无植被覆盖的地表而言,典型的微波模型有几何光学模型(GOM)、物理光学模型(POM)、积分模型(IEM)、改进的积分模型(AIEM)、小扰动模型(SPM)、Q/H及Q/P模型;若地表有植被覆盖,代表模型有水云模型、农作物模型、MMICS模型。其中,由于被动微波受植被水分的影响很大^[66],因此裸露地表的辐射信号相对简单,所以针对其的模型也更成熟。

1.3.3 主被动微波结合遥感

主被动微波遥感结合对在反演土壤水分可以提高土壤水分的反演精度,而且相对于单一使用主动或被动微波遥感,可提高空间分辨率^[67-68]。当前的方法主要分为两类:一是将二者融合,共同反演土壤水分;二是先采用高分辨率的主动微波遥感测定植被和粗糙度参数,然后辅助以低分辨率被动微波遥感测定的亮温值来估算土壤湿度或者以高分辨率的主动微波下推被动法获得的土壤湿度^[69-71]。李震等^[72]为消除植被覆盖的影响,建立了一个半经验公式模型,用来计算体散射项,综合时间序列的主被动微波遥感数据,进而监测地表土壤水分的变化状况。赵天杰等^[73]针对ALOS/PALSAR数据,通过对大量后向散射模拟数据的分析,建立裸露地表粗糙度计算模型;利用模拟数据分析地表辐射亮温随土壤水分和粗糙度的变化规律,在此基础上构建NN模型结合粗糙度计算结果和辐射计飞行数据反演研究区域的土壤水分。卫炜^[74]利用主被动微波遥感的特点,提出了基于PALS系统的主被动微波遥感联合监测土壤水分方法,使得不用大量获取植被含水量和地表温度等辅助数据就可以实现对农田土壤水分的反演以及动态变化监测。孙亚勇^[75]开展C波段主动微波雷达数据和L波段被动微波辐射计亮温数据协同反演表层土壤水分研究。

红外—近红外遥感、热红外遥感和微波遥感这几种不同波段反演土壤水分的优缺点归纳如表2。

表2 不同遥感波段反演土壤水分的优缺点归纳
Table 2 Advantages and limitations of different spectral bands in monitoring the soil moisture

遥感波段	优势性	局限性
近红外—红外遥感	空间、时间分辨率高,数据来源广泛,技术较为成熟	受大气和植被的影响大,对地物穿透能力差,适用于无植被或植被覆盖较少的农田
热红外遥感	空间、时间分辨率高,数据来源广泛,技术较为成熟	受大气和植被的影响大,对地物穿透能力差
微波遥感	受大气影响小,对地物穿透能力较好	受植被和土壤表面粗糙度影响大

2 农田地表土壤水分主要反演方法

2.1 变化检测法

变化监测法是通过建立两景不同时期影像的土

壤水分与后向散射系数差值间的简单关系模型来进行土壤水分的反演。张祥等^[76]基于改进的变化检测模型,利用不同时期Sentinel-1A数据反演农田土壤水分变化信息。首先利用积分方程模型(Integral Equation Model, IEM)模拟数据分析雷达后向散射系数变化与土壤水分变化之间的关系,在作物生育期内,土壤表面粗糙度没有发生变化的情况下,以上两者具有极高关联性,验证了IEM模型用于反演土壤水分变化的合理性。在此基础上,利用研究区时序Sentinel-1A合成孔径雷达数据和研究区实测数据构建土壤水分变化检测模型,从而利用雷达后向散射系数变化估算土壤水分变化信息。由此验证了时序Sentinel-1A数据用于监测农田土壤水分变化的实用性。

何连等^[77]基于变化检测法的Alpha近似模型,结合哨兵1号卫星C波段SAR数据,实现了农田地表土壤水分的反演。首先利用微波辐射传输模型验证了Alpha近似模型(1)在土壤水分反演中的可行性。验证结果发现,对于土壤散射起主要作用的实验区域,Alpha近似模型可以有效地消除地表粗糙度和植被对雷达后向散射系数的影响。

$$\frac{\sigma_{o,PP}^{T_2}}{\sigma_{o,PP}^{T_1}} \approx \left| \frac{\alpha_{PP}^{T_2}(\theta, \varepsilon_s)}{\alpha_{PP}^{T_1}(\theta, \varepsilon_s)} \right|^2, \quad (1)$$

式中 σ_o 表示雷达后向散射系数; θ 为雷达入射角度; ε_s 为土壤相对介电常数; T_1 和 T_2 表示雷达数据获取的时间; α_{PP} 为极化幅度,是雷达入射角度和土壤介电常数的函数;PP表示极化方式,为HH或者VV^[77]。

在此基础上,结合研究区多个时间段内哨兵1号合成孔径雷达数据,利用Alpha近似模型构建了农田植被覆盖较多时土壤水分观测方程组,最终得到了农田地表土壤水分并且反演精度较好。

2.2 植被指数法

植被指数法是植被反射波段的红外和近红外两种波段的组合^[78]。苏永荣等^[79]基于能量平衡方程和TVDI,提出一种定量干湿边选取方法和改进的TVDI模型——定量温度植被指数(Temperature Vegetation Quantitative Index, TVQI),以MODIS遥感数据为基础,实现了陕西省关中平原中6个县的真实土壤水分的遥感估算。汪倩倩等^[80]利用GF-3和Landsat8等遥感数据在土壤水分监测中的优势,通过水云模型消除植被对雷达后向散射系数的影响,获取土壤直接后散射系数,然后结合入射角、PDI等指数共同作为模型输入参数分别建立了HH和HV不同极化方式下的土壤水分反演模型,实现了大范围农田土壤水分的反演,证实建立一种耦合微波和光学遥感数据的土壤水分反演方法具有实际应用价值。

2.3 热惯量法

土壤的热惯量与土壤水分有密切的关系,同时也控制着土壤温度日较差的大小^[81],由于土壤温度日较差可以由遥感影像资料进行获取,由此可间接得到土壤水分的含量大小。土壤热惯量的函数是土壤对其热容量变化的响应,其模型如下:

$$p = (k\rho c)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中, p 为热惯量, k 为土壤热导率, ρ 为土壤密度, c 为土壤的比热容。

3 总结与展望

1) 红外—近红外遥感虽然空间或时间分辨率较高,数据来源也较广,但因为其受天气的影响较为严重,而且难以穿透覆盖在地表上的植被,适用于无植被或植被覆盖较少的农田土壤水分测量。在现阶段的微波遥感技术下,无植被覆盖或者植被覆盖较少的农田地表土壤水分的监测大多以微波遥感数据为基础,引入函数模型反演出研究区域的土壤含水量值。

2) 变化监测法在一般情况下获取的是两个不同时期影像之间的土壤水分相对值,不是一定值,另外这种方法对于时段内土壤粗糙度或者植被覆盖度发生明显变化的区域并不适用。植被指数法是结合植被的水量信息来监测土壤的含水量,不足之处在于植被含水量信息一般都难以实时取得,利用当地多年、多平均的EVI或者其他植被指数值,可代表当时的状况。热惯量法只适合裸地或者作物出苗期,结合植被和土壤表面热信息的方法在植被覆盖较低时效果不错^[82],此外,由于土壤属性对于作物干旱灾害反演结果影响较大,尤其土壤保持水分的能力是重要的影响因子,Fang等^[83]重新定义和遥感反演了土壤持水力指数,可以很好反映不同属性土壤的持水力差异,因此加强改进模型方法研究是遥感反演土壤水分方面一个有益的探索。

3) 目前在反演农田土壤水分时,多以无植被或者植被覆盖较少的区域做野外实验研究,但在作物生长季后期植被覆盖率将会提高,主被动微波遥感的结合对于进一步消除植被的影响起到了很大的作用,而农田地表土壤水分的反演利用遥感数据进行空间高分辨率与时间高分辨率的相互结合,不仅使得作物区的土壤水分信息在空间分布上达到精确,更能快速掌握土壤墒情,为各项农耕活动做好充分的准备,这也是今后土壤水分数据研究的重点和难点。

参考文献

- [1] 张滢,丁建丽,周鹏.干旱区土壤水分微波遥感反演算法综述.干旱区地理,2011,34(4):671-678.
- [2] 杨涛,官辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测研究进展.生态学报,2010,30(22):6264-6277.

- [3] 王明霞, 毋兆鹏. 遥感监测土壤湿度综述. 干旱环境监测, 2013, (4): 163-168.
- [4] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [5] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 灌溉农田土壤湿度的时空变化特征. 中国农业气象, 2010, 31(3): 423-426.
- [6] 房世波, 阳晶晶, 周广胜. 30年来我国农业气象灾害变化趋势和分布特征. 自然灾害学报, 2011, 20(5): 69-73.
- [7] 张红梅, 沙晋明. 遥感监测土壤湿度的方法综述. 中国农学通报, 2005, 21(2): 307-307.
- [8] 高学睿, 魏素洁, 李悦, 等. 区域尺度农田土壤湿度研究方法综述与展望. 人民长江, 2013(z1).
- [9] Chen S L, Liu Y B, Wen Z M. Satellite retrieval of soil moisture: an overview. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [10] 王振龙, 高建峰. 实用土壤墒情监测预报技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [11] 刘思春, 高亚军, 王永一, 等. 土壤水势测定方法的选择及准确性研究. 干旱地区农业研究, 2011, (4): 189-192.
- [12] 田昌玉, 孙文彦, 林治安, 等. 中子仪测定土壤水分方法的研究进展. 中国农学通报, 2011, (18): 7-11.
- [13] 吴月茹, 王维真, 晋锐, 等. TDR测定土壤含水量的标定研究. 冰川冻土, 2009, (2): 262-267.
- [14] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR系统在土壤水分连续动态监测中的应用. 干旱区研究, 2003, (4): 247-251.
- [15] 高峰, 李建平, 王黎黎, 等. 土壤水运动理论研究综述. 湖北农业科学, 2009, (4): 982-986.
- [16] 李明星, 马柱国, 杜继稳. 区域土壤湿度模拟检验和趋势分析——以陕西省为例. 中国科学(地球科学), 2010, (3): 363-379.
- [17] Fasinmirin J T, Olufayo A A, Oguntunde P G. Calibration and validation of a soil water simulation model for field grown *Amaranthus cruentus*. *International Journal of Plant Production*, 2008, 2(11): 269-278.
- [18] 王润冬, 陆垂裕, 孙文怀, 等. 基于MODCYCLE模型的农田降水入渗补给研究. 人民黄河, 2011, (4): 51-53.
- [19] 刘志明, 张柏, 晏明, 等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-583.
- [20] Bowers S A, Hunks R J. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 1965, 100(2): 130-138.
- [21] Chanzy A. Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 1993, 7(3-4): 303-319.
- [22] Henricksen B L. Reflections on drought: Ethiopia 1983-1984. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 5.
- [23] 张智韬, 陈俊英, 刘俊民, 等. TM6对遥感主成分分析监测土壤含水率的影响. 节水灌溉, 2010, (4): 16-19.
- [24] 徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特性研究及其应用. 土壤学进展, 1987, 15(1): 3-11.
- [25] 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究. 遥感学报, 1991, 6(1): 61-71.
- [26] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. 土壤, 2000, 32(6): 281-287.
- [27] 郭广猛, 赵冰茹. 使用MODIS数据监测土壤湿度. 土壤, 2004, 36(2): 219-221.
- [28] Yu Xianping, He Hongshi. *The Study of Ecology and Environment by Remote Sensing*. Beijing: Science Press, 1990.
- [29] 姚坤, 师庆东, 逢淑女, 等. 遥感反演土壤湿度综述. 楚雄师范学院学报, 2008, 23(6): 89-92.
- [30] Myers V I, Heilman H D. Thermal IR for soil temperature studies. *Photogram metric Engineering and Remote Sensing*, 1969, 35: 1024-1032.
- [31] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, (3): 2017-2041.
- [32] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- [33] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [34] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, et al. Normalizing the stress degree day for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24: 45-55.
- [35] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 15.
- [36] 章立玲, 朱俊. 土壤含水量对温度变化规律的实验研究. 科协论坛, 2012(7): 132-133.
- [37] Luo X L, Xue Q, Zhang C H, et al. Drought monitoring using NOAA-AVHRR data in Sichuan province. *Met eological Monthly*, 1996, 22(5): 35-38.
- [38] Li X C, Dong W M. Methods research on monitoring drought by using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Technology and Application*, 1996, 11(3): 7-15.
- [39] WMO/GWP Integrated Drought Management Programme (IDMP). *Handbook of Drought Indicators and Indices*. WMO-No. 1173. Geneva/Stockholm: WMO/GWP, 2016.
- [40] Njoku E G, Kong J A. Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture. *J Geophys Res*, 1977, 82(3): 108-3118.
- [41] Shu N. *Principles of Microwave Remote Sensing*. Wuhan: Wuhan University Press, 2001: 67-69.
- [42] Zhong R F, Guo H D, Wang W M. Overview of soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 49-55.
- [43] 张俊荣, 王丽巍, 张德海. 植被和土壤的微波介电常数. 遥感技术与应用, 1995, 10(3): 40-50.
- [44] Chanzy A. Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing. *Remote Sensing Review*, 1993, 7: 303-320.
- [45] 李俐, 王荻, 王鹏新, 等. 合成孔径雷达土壤水分反演研究进展. 资源科学, 2015, 37(10): 1929-1940.
- [46] Shoshany M, Svoray T, Curran P J, et al. The relationship between ERS-2 SAR backscatter and soil moisture: generalization from a humid to semi-arid transection. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(11): 2337-2343.
- [47] Srivastava H S, Patel P, Manchanda M L, et al. Use of multiincidence angle RADARSAT-1 SAR data to incorporate the effect of surface roughness in soil moisture estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1638-1640.
- [48] Shi J C, Wang J, Hsu A Y. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254-1266.
- [49] De Roo R D, Du Y, Ulaby F T, et al. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy with soil moisture inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872.
- [50] Lakhankar T, Ghedira H, Khanbilvardi R. Soil Moisture Retrieval from RADARSAT data: a neuro-fuzzy approach. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006.
- [51] Notarnicola C, Angiulli M, Posa F. Soil moisture retrieval from remotely sensed data: Neural network approach versus Bayesian method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 547-557.
- [52] Paloscia S, Santi E, Pettinato S, et al. The use of COSMO-SkyMed images for retrieving snow depth and soil moisture in mountainous areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2014.
- [53] Pierdicca N, Pulvirenti L, Bignami C. Soil moisture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 440-448.
- [54] Rahman M M, Moran M S, Thoma D P, et al. A derivation of roughness correlation length for parameterizing radar backscatter models. *Remote Sensing*, 2007, 28(18): 3995-4012.
- [55] Merzouki A, McNairn H, Pacheco A. Mapping soil moisture using RADARSAT-2 data and local autocorrelation statistics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 128-137.
- [56] Rodionova N V. A combined use of decomposition and empirical model for soil moisture estimation in vegetated areas from polarimetric SAR data. *Friedrichshafen: Synthetic Aperture Radar(EUSAR)*, 2008.
- [57] Hajnsek I, Jagdhuber T. Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of polSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 442-454.

- [58] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探. 遥感技术与应用, 1995, 10(4): 1-8.
- [59] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感, 1991(02): 89-98, 161.
- [60] Zeng X J, Xing Y Q, Shan W, et al. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe Expressway. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 118-126.
- [61] 李新武, 郭华东, 李震, 等. 重复轨道SIR-C极化干涉SAR数据植被覆盖区土壤水分反演研究. 遥感学报, 2009, 13(3): 430-436.
- [62] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radio meters. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(2): 317-323.
- [63] Jackson T J, Schmugge T J, Wang J R. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1137-1142.
- [64] Camillo P T, Schmugge T S. Estimating soil moisture storage in the root zone from surface measurements. Soil Science, 1983, 135(4): 245-264.
- [65] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 466-470.
- [66] Zhu Y C, Zheng Y C, Fang S B, et al. Analysis of the brightness temperature features of the lunar surface using 37 GHz channel data from the Chang'E-2 microwave radiometer. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 750-765.
- [67] 郭英, 沈彦俊, 赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1162-1167.
- [68] 余凡, 赵英时. 基于主被动遥感数据融合的土壤水分信息提取. 农业工程学报, 2011, 27(6): 187-192.
- [69] Chauhan N S. Soil moisture estimation under a vegetation cover: combined active passive microwave remote sensing approach. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(5): 1079-1097.
- [70] Lakshmi V, Bolten J, Njoku E, et al. Monitoring of large scale soil moisture from air borne PALS sensor observations during SGP99. ProcInt Geosci Remote Sens Symp, Honolulu, HI, 2000.
- [71] 杨立娟, 武胜利, 张钟军. 利用主被动微波遥感结合反演土壤水分的理论模型分析. 国土资源遥感, 2011, (2): 53-58.
- [72] 李震, 郭华东, 施建成. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化. 遥感学报, 2002(6): 481-484, 539.
- [73] 赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分. 地球科学进展, 2009, 24(7): 769-775.
- [74] 卫炜. 基于主被动微波遥感联合的土壤水分监测研究. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [75] 孙亚勇. 基于C和L波段主被动微波遥感的土壤水分协同反演研究. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [76] 张祥, 陈报章, 赵慧, 等. 基于时序Sentinel-1A数据的农田土壤水分变化检测分析. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 338-345.
- [77] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相Sentinel-1 SAR数据反演农田地表土壤水分. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.
- [78] 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 131-136.
- [79] 苏永荣, 官阿都, 吕潇然, 等. 基于改进温度植被干旱指数的农田土壤水分反演方法. 遥感信息, 2015, (6): 96-101.
- [80] 汪倩倩, 汪权方, 王新生, 等. 地面资料稀缺区域的农田土壤水分微波与光学遥感协同反演方法研究. 中国农学通报, 2018, 34(36): 117-123.
- [81] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-31.
- [82] Song Y, Fang S B, Liang H Y, et al. Comparison and application of agricultural drought indexes based on MODIS data. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(2): 215-220.
- [83] Fang S B, Yu W G, Qi Y. Spectra and vegetation index variations in moss soil crust in different seasons, and in wet and dry conditions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 261-266.
- (上接16页)
- [35] Chen F, Zhang T, Seim A, et al. A.: Juniper tree-ring data from the Kuramenian Mountains (Republic of Tajikistan), reveals changing summer drought signals in western Central Asia. Clim-Past-Discuss, <https://doi.org/10.5194/cp-2018-44>, in review, 2018.
- [36] Chen F. Comparison of drought signals in tree-ring width records of juniper trees from Central and West Asia during the last four centuries. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(4): 1-10.
- [37] Schweingruber F H. Measurement of densitometric properties of wood. In: Hughes M K, Kelly P M, Pilcher J R, Lamarche J V C (eds). Climate from Tree Rings. Cambridge University Press, New York, 1982: 8-11.
- [38] Schinker M G, Hansen N, Spiecher H. High-frequency densitometry: a new method for the rapid evaluation of wood density variations. International Association of Wood Anatomists, 2003, 24(3): 231-239.
- [39] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. The Holocene, 1996, 6(1): 62-68.
- [40] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应. 生态学报, 2011b, 31(22): 6743-6752.
- [41] 陈拓, 秦大河, 李江凤, 等. 新疆昭苏云杉树轮纤维素 $\delta^{13}C$ 的气候意义. 冰川冻土, 2000, (4): 347-352.
- [42] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 等. 西北干旱区树轮气候学研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 2013, (4): 25-35.
- [43] Bakhtiyorov Z, Yu R, Monoldorova A, et al. Tree-Ring-Based summer temperature minimum reconstruction for Taboshar, Sogd Province, Tajikistan, Since AD 1840: Linkages to the Oceans. Preprints 2018, 2018060312, doi: 10.20944/preprints201806.0312.v1.
- [44] 陈峰, 王慧琴, 袁玉江, 等. 树轮最大密度记录的吉尔吉斯斯坦天山山区公元1650年以来的7—8月温度变化. 沙漠与绿洲气象, 2014, (4): 1-7.
- [45] Chen F, Yuan Y, Wei W, et al. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. International Journal of Climatology, 2012, 32(7).
- [46] Zhang T W, Yuan Y J, Hu Y C, et al. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. Quaternary International, 2015, 358: 68-76.
- [47] Zubairov B, Balanzategui D, Heussner K, et al. Reconstruction of precipitation based on Schrenk Spruce Tree-Ring width in the Terskey Alatau, Kazakhstan. Berliner Geographische Arbeiten 121. 2018: 87-98.
- [48] Zhang R, Zhang T, Kelgenbayev N, et al. A 189-year tree-ring record of drought for the Dzungarian Alatau, arid Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 2017.
- [49] Zhang R, Shang H, Yu S, et al. Tree-ring-based precipitation reconstruction in southern Kazakhstan, reveals drought variability since A.D. 1770. International Journal of Climatology, 2016.
- [50] Chen F, Mambetov B, Maisupova B, et al. Drought variations in Almaty (Kazakhstan) since AD 1785 based on spruce tree rings. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016.
- [51] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 树轮记录的吉尔吉斯斯坦东部过去百年干湿变化. 干旱区地理, 2013, 36(4): 691-699.
- [52] Zhang T W, Diushen M, Bakytbek E, et al. Tree ring record of annual runoff for Issyk Lake, Central Asia. Journal of Water and Climate Change, 2018.
- [53] Chen F, Chen F, Zhang R B, et al. A 426-year drought history for Western Tian Shan, Central Asia, inferred from tree rings and linkages to the North Atlantic and Indo-West Pacific Oceans. Research Paper, 2013, 23 (8): 1095-1104.
- [54] Wang H Q, Chen F, et al. Comparison of drought-sensitive tree-ring records from the Tien Shan of Kyrgyzstan and Xinjiang (China) during the last six centuries. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(1): 18-25.
- [55] 张同文, 袁玉江, 陈向军, 等. 利用树轮宽度资料重建东天山木垒地区降水量. 第四纪研究, 2015, 35(5): 1121-1133.