

干旱遥感监测技术进展

郭锐 王小平 王玮 王丽娟 胡蝶 沙莎

(中国气象局兰州干旱气象研究所/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 简单回顾了卫星遥感在可见光、热红外、微波、重力卫星、高光谱、叶绿素荧光、无人机以及多源遥感技术和大数据挖掘等领域的干旱监测技术; 对各种指数(模型)应用中存在的问题进行评述; 指出卫星遥感干旱面临的主要技术问题, 并结合国家和气象行业需求提出研究对策及学科建议。

关键词: 干旱, 卫星, 遥感, 干旱指数, 对策建议

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.003

Review of Drought Monitoring Based on Remote Sensing Technology

Guo Ni, Wang Xiaoping, Wang Wei, Wang Lijuan, Hu Die, Sha Sha

(Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration/ Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: In this paper, we reviewed and summarized the drought monitoring technology of satellite remote sensing in the fields of visible light, thermal infrared, microwave, hyperspectral, chlorophyll fluorescence, UAV, and multi-source remote sensing technology and big data mining; evaluated and discussed the various problems existing in remote sensing drought indices and models; indicated the main technical problems of satellite remote sensing drought monitoring and the future development opportunities, and put forward the main problems to be solved and the development direction in view of the current situation of China's satellite remote sensing drought application.

Keywords: drought, satellite, remote sensing, drought index, suggestions

0 前言

干旱是全球各地普遍发生的、对人类社会影响最大、给社会造成的经济损失十分严重的一种自然灾害^[1]。随着全球气候变化, 干旱灾害也呈进一步加强趋势, 发生频率和范围进一步增大, 严重威胁着全球的粮食安全和社会稳定^[2-3]。因此, 科学有效的干旱监测与预警不仅是科学界致力解决的重大科学问题^[4-5], 也是人类社会应对气候变化亟待解决的技术难题。

国内外根据干旱过程发生的顺序和影响将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。

基于地面气象和水文观测数据以及农业气象墒情观测建立的多种干旱指标是干旱监测的主要工具。近40年来迅速发展的全球对地观测技术为从空中进行大范围、动态、无缝隙监测干旱提供了有效的数据源。利用地面观测、卫星遥感及数值模式同化技术, 国内外建立了多个干旱监测与预警业务系统, 基本实现了大范围干旱的定量监测^[6-9]。

本文围绕不同的遥感干旱监测方法及多源遥感技术和大数据挖掘在干旱监测方面的进展进行评价, 在此基础上结合国家和行业需求提出研究对策及学科发展展望。

1 遥感干旱监测方法

遥感监测干旱主要是侧重于农业干旱监测。农业干旱受到降水、土壤含水量、作物需水等因素的影响, 土壤含水量变化是影响农作物长势的主要因子^[10]。遥感图像表现为不同的光谱特征, 干旱发生会引起作物体内生理生化参数的变化, 光谱会相应变化, 故以此来监测农业干旱。根据遥感数据源的差别

收稿日期: 2019年9月15日; 修回日期: 2020年4月30日
第一作者: 郭锐(1963—), Email: guoni0531@126.com
通信作者: 王小平(1975—) Email: xiaopinwang@163.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-5); 甘肃省气象局气象科研项目(ZcZd2020-21); 风云三号(02)批气象卫星地面应用系统工程应用示范项目(FY-3(02)-UDS-1.5.2); 风云四号科研试验卫星地面应用系统工程应用项目

可将遥感监测方法分为光学遥感监测法（包含了可见光—近红外遥感监测法、热红外监测法、可见光近红外—热红外遥感监测法），高光谱遥感监测法，微波遥感监测法及多源数据综合干旱监测方法等。

1.1 可见光、近红外及段波红外监测法

干旱会引起土壤含水量、作物生理的变化，可见光—近红外遥感主要利用植被指数来监测植被生长状态和土壤水分含量。从作物在不同干旱状况下的光谱曲线中可以发现，干旱明显导致作物在可见光波段（红光波段最明显）反射率上升以及近红外波段反射率下降，干旱程度越重这种变化幅度越大^[11]。基于植被的这种特性，构建了归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI），该指数能够反映植被对水分条件的响应，是最早应用于干旱监测的指数，也是构建其他基于植被指数的干旱指数的基础，应用十分广泛^[9, 12-13]。由于NDVI会受到大气状况、双向反射辐射、土壤和叶冠背景的影响，且存在高生物量区发生饱和的问题，因此增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）^[14]、土壤调节植被指数（Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI）^[15]等指数被提出，后期大量研究将其用于干旱监测^[9]。

由于植被与当地地理气候和植被分布及生长规律密切相关，在空间上不具备可比性。因此，基于长时间序列植被指数，距平植被指数（Anomaly Vegetation Index, AVI）^[16]、植被状态指数（Vegetation Condition Index, VCI）^[17]等被提出进行干旱监测研究，AVI和VCI较NDVI有更好的时空可比性，在大范围的干旱监测中得到广泛的应用^[18-21]。这类指数的特点是计算简单，但由于植被指数对缺水响应的滞后导致它们具有一定的时间滞后性。

1.2 热红外遥感监测法

植被在缺水时，除了植被指数会发生变化之外，叶片温度会因为缺水而迅速升高，这种变化要比植被指数变化出现的早且敏感。基于植被的这种生理特性，陆地表面温度（Land Surface Temperature, LST）被用于干旱监测中。基于LST构建的干旱指数主要包括热惯量法、温度状态指数等。

土壤热惯量是描述土壤热惰性大小的物理量，是土壤阻止其自身温度变化能力的大小表征，与土壤水分的关系密切。对于同一类土壤而言，含水量越高其热惯量就越大。基于这一物理过程，多种热惯量模型^[22-26]被建立起来，但在实际中，表现热惯量（Apparent Thermal Inertia, ATI）应用的最为广泛，但该指数仅适用于裸地和低植被覆盖区的土壤，具有

较大的局限性。

与VCI指数类似，通过引入LST的历史信息，Kogan构建了温度状态指数（Temperature Condition Index, TCI）^[27]，弥补了VCI滞后性较强的缺点。但受到诸如下垫面状况、海拔高度、卫星过境时间差异以及地表热平流等因素的影响，TCI监测干旱存在不确定性。

1.3 可见光近红外—热红外遥感监测法

由于单独使用植被指数或者地表温度的诸多局限，研究者将植被指数和地表温度结合起来应用于干旱监测研究。这类指数主要包括植被健康指数（Vegetation Health Index, VHI）、植被供水指数（Vegetation Supply Water Index, VSWI）、温度植被干旱指数（Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI）等。

VHI^[27]是最早被提出的，它由植被状态指数和温度状态指数加权得到，计算简单，可用于大范围区域干旱监测^[28-30]，目前VHI仍是美国NOAA STAR（NOAA Center for Satellite Applications and Research）与美国国家干旱减灾中心（National Drought Mitigation Center, NDMC）的重要干旱监测产品。

VSWI^[31-32]基于NDVI和LST的比值构建而成，该指数在监测应用中更适合地形平坦、植被覆盖度较高的地区与时段，且统计模型受时空尺度的限制，监测结果不具有时空可比性。

研究表明，以植被指数—地表温度构成的特征空间与土壤水分状况关系密切：LST与NDVI的斜率与作物水分指数、土壤水分呈负相关，且LST/NDVI随干旱强度增强而增大^[33-35]。LST与NDVI的斜率与土壤水分的负相关关系是特征空间中的重要统计特征，基于这种特征，Sandholt等^[36]构建了TVDI指数和VTCI指数^[37]，二者的关系为 $TVDI = 1 - VTCI$ 。由于物理意义明确，这类指数在干旱监测领域得到了广泛的研究和应用^[38-40]。但这类指数是在一种理想的特征空间中且LST与NDVI的斜率与土壤水分的负相关关系下提出的，在实际中很难获取适合大小的研究区域以满足理想特征空间的要求，因此在实际应用中这类方法也存在诸多不确定性。由于NDVI的局限性及海拔等因素等对LST的影响，对这类指数的改进主要包括：利用EVI、比值植被指数（Ratio Vegetation Index, RVI）等其他植被指数替换NDVI构建特征空间以克服NDVI在高植被覆盖区指示干旱较差的情况^[41-42]；利用海拔高度对LST进行订正后构建特征空间以消除对高海拔地区旱情估计偏低的假象^[43]；利用多时次遥感数据构

建特征空间以提高TVDI指数的时间可比性^[44]。

基于植被受到干旱胁迫时植被在可见光和近红外特征空间中的特性，一些新的干旱指数，如垂直干旱指数（Perpendicular Drought Index, PDI），修正垂直干旱指数（Modified Perpendicular Drought Index, MPDI）^[45]得到了较多应用，PDI适于裸地或者低植被覆盖区域的干旱监测。为了提高PDI在高植被覆盖区域的监测精度，Ghulam等^[46]引入植被覆盖度，对PDI进行了改进，提出了MPDI。相关研究表明，在裸地或稀疏植被地表PDI和MPDI的干旱监测精度相当，而高植被覆盖时，MPDI的监测结果远好于PDI^[47]。

1.4 综合干旱指数

基于单一的遥感干旱指数往往难以达到干旱监测的精度要求，因此许多学者将各种干旱指数进行综合，构建了新的干旱指数。Zhang等^[48]应用PDI和VSWI构建的基于MODIS数据修正干旱指数（Modified MODIS-based Index, MMI），根据作物生育期建立了MMI与站点土壤湿度的回归模型，结果表明建立的MMI与土壤湿度观测的相关关系非常好，是一种非常适合研究区精确反演土壤湿度信息的遥感方法。Amani等^[49]基于由LST、垂直植被指数（Perpendicular Vegetation Index, PVI）、土壤湿度构成的三维特征空间，构建了温度植被土壤干旱指数（Temperature-Vegetation-soil Moisture Dryness Index, TVMDI），TVMDI与土壤温度、NDVI、SM均显著相关，其中与SM的相关性相对较差，相较PDI、MPDI、MPDI1、TVDI等指数，TVMDI指数的反演精度更高。

1.5 遥感蒸散干旱监测

蒸散是蒸发和蒸腾的总和，作为水热交换的重要参数，参与地表水分循环和能量平衡过程，是土壤—植被—大气系统相互作用的关键因子。由于地表水分条件的限制，实际蒸散与蒸散潜力之间存在偏差，所以，往往可以利用这种偏差来表征区域的土壤水分状况，遥感蒸散干旱监测亦是基于这种思想进行研究^[50]。蒸散遥感反演的方法是以能量平衡和水平衡方程为出发点，主要有经验模型、单层模型、双层模型和多层模型。

经验模型简单、易实现，但具有一定的经验性，在普适性方面受到限制。单层模型未区分植被和土壤，将地表假设为一叶，对土壤—植被间的相互作用进行高度简化，致使模型输入参数较少，计算简单、快捷，从而在蒸散遥感反演中应用广泛^[51]。与经验模型相比，单层模型具有更加明确的物理意义。双层模型考虑土壤—植被的相互作用，将蒸散区分为植

被冠层蒸散、土壤蒸发^[52]。与单层模型，双层模型分离了土壤和植被，分别考虑土壤和植被冠层，以及两者之间的水热交换过程，将土壤—植被—大气之间的水热交换机制描述得更为详尽。基于双层模型得到的地表、冠层胁迫指数能够分别反映气象、农业干旱状况，是目前美国全境干旱监测产品生产的基础^[53]。与双层模型相比，多层模型将植被冠层描述得更为详尽，但由于模型输入参数较多和不易获取性，导致多层模型应用受到限制。

随着我国第二代静止轨道气象卫星——FY-4系列静止卫星的成功发射，双层模型对卫星资料高时间频次的需求得到满足。FY-3号03批业务星将形成由晨昏星、上下午星和降水星组成的星座体系，并首次搭载主动微波传感器（风场测量雷达（Wind RAD）和降水雷达（PR）），可提供高精度的降水和土壤水分产品数据，为双层模型中土壤水分平衡参数化方案的优化提供依据。FY-3和FY-4的联合观测将为我国使用双层模型生产高精度、实时蒸散干旱监测产品奠定基础。

1.6 微波遥感干旱监测

相比光学遥感存在云的影响问题而言，微波遥感最大的优势就是对云、雨、大气有较强的穿透能力，具有全天时、全天候的监测特点。随着越来越多星载微波传感器的发射，微波遥感可在全球尺度上精确监测地球系统中诸多要素，具备研究干旱等气候灾害的能力。

1.6.1 微波遥感降水监测方法

目前，卫星遥感技术是测量全球尺度降水率分布的唯一可行方法^[54-56]。热带降雨测量卫星（Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM）提供的长时间序列多卫星降水分析产品（Multi-satellite Precipitation Analysis, TMPA）为开展区域尺度干旱监测研究提供重要数据，其中，第7版本的TMPA产品精度在干旱区及高原地区有所提高^[57]。非实时的3B42V7产品与地面站点观测数据在月尺度上具有相当精度^[58-60]。因此，该产品在干旱监测中应用广泛。Naumann等^[61]和Sahoo等^[62]利用TRMM数据监测非洲、美国和欧洲等地区的干旱状况，并用标准化降水指数（SPI）进行验证，表明TRMM降水产品能够在时间和空间上准确识别干旱，其监测具有更高的空间精度。冯海涛等^[63]和陈诚等^[64]利用TRMM降水产品构建Z指数分别对云南省和中国黄淮海地区的干旱时空演化特征进行监测，结果表明，Z指数在云南省监测的15年旱情及早灾实例时空特征与实情相符；利用Pa指数对Z指数干旱等级

划分进行修正后, 该指数在黄淮海地区的干旱监测同SPI的相关系数达 $R^2 > 0.75$, 进一步证明了TRMM数据对于干旱监测的有效性和可靠性。胡蝶等^[65]基于TRMM月降水产品构建了降水距平百分率(Pa_{TRMM})和降水状态指数(PCI_{TRMM})对我国西北地区的甘肃省干旱情况进行监测, 结果表明这两个干旱指标均能有效、直观地反映干旱时空分布及变化特征。同时, TRMM遥感降水数据还可弥补我国西北地区实测站点空间分布不均及插值数据存在较大误差的问题。

TRMM卫星已于2015年4月停止业务运行, 全球降水观测GPM(Global Precipitation Mission)是TRMM的后续卫星。GPM是由一个核心卫星和多颗微波小卫星组成的国际卫星观测网提供覆盖全球的降水观测, 能够提供更高精度的3D云微物理结构, 提供全球范围基于微波的3 h以内和基于微波红外的0.5 h的雨雪数据产品。具有更高精度、更大覆盖范围和更高时空分辨率的GPM降水产品对全球天气预报将有划时代的影响, 可进一步提高对洪水、泥石流和干旱等预报预警技术。

1.6.2 微波遥感土壤水分监测方法

微波波段是电磁波谱中唯一能够真实量化估算地表土壤水分的电磁波谱频段, 微波遥感反演地表土壤水分的方法主要有两种, 一是基于微波辐射计的被动反演法, 二是基于雷达或散射计的主动微波反演法。

被动微波反演土壤水分: 被动微波是通过亮度温度来估算土壤水分, 亮度温度主要由发射率和地表有效辐射温度决定, 而发射率与土壤复介电常数紧密相关, 通过土壤复介电常数与土壤水分之间的物理关系即可根据亮度温度反演土壤水分。

常用的被动微波辐射计有SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)、Aqua卫星搭载的高级微波辐射计AMSR-E和FY-3卫星搭载的微波成像仪MWRI。AMSR-E传感器积累了2002年6月—2011年10月全球25 km空间分辨率的土壤水分数据产品, 由于天线旋转故障, 于2011年10月停止工作。GCOM-W1卫星搭载的第二代先进微波辐射计AMSR2于2012年5月发射成功。AMSR2增设了频率为7.3 GHz的两个通道, 降低了无线电射频干扰的影响, 可得到更精确的土壤湿度分布^[66-67]。但低频波段C、X和Ku波段对植被的穿透深度有限, 仅适用于裸土和低矮植被地区。SMOS是首颗利用干涉测量方法测量地球表面发射L波段的被动微波辐射计, 由欧空局在2009年11月发射。由于L波段对植被具有更好的穿透性和对土壤水分更敏感,

可进行多角度观测, 是目前能够提供可靠性和精度更高的传感器^[68-69]。

针对以上产品, 不少学者在全球不同地区开展了精度检验和反演算法改进等研究^[70-72]。李哲等^[73]采用修正的单通道算法(SCA)模型, 应用AMSR-E土壤表层亮温数据, 建立了高原地区土壤湿度反演模型反演青藏高原夏季土壤湿度, 结果表明修正SCA模型反演的土壤湿度精度更高。陆峥等^[74]利用实测土壤水分数据集, 检验了AMSR2两个算法土壤水分产品在黑河流域的精度, 结果表明JAXA和LPRM土壤水分产品的均方根误差均超过 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。庄媛等^[75]以自动土壤水分观测站土壤湿度作为验证数据, 对2012年中国区域ASCAT、WINDSAT、FY-3B、SMOS共4种微波遥感土壤湿度产品按省份进行了评估研究。结果表明: ASCAT质量最优, 在中国大部地区与观测数据相关系数较高; WINDSAT其次, 质量优于FY-3B; 而SMOS在中国大部分地区质量差, 受无线电频率干扰严重。

被动微波具有高时间分辨率, 对土壤水分更为敏感性和数据处理简单等优势。但目前受限于空间分辨率和观测波段, 很大程度上影响到数据的验证和有效利用。

主动微波反演土壤水分: 主动微波通过地表后向散射系数来反演土壤水分。地表后向散射系数主要受地表复介电常数、地表粗糙度和植被性质的影响, 而复介电常数主要由土壤水分决定, 因此可以用于土壤水分的反演。

主动微波传感器主要包括合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和散射计2种。应用于土壤水分反演研究的SAR主要有ERS-1/2、Radarsat、JERS-1、ENVISAT和Sentinel-1A。Pathe等^[76]应用ENVISAT ASAR数据反演美国俄克拉何马州地区的土壤水分发现该数据具有捕获空间细节时间变化的能力。Holah等^[77]和Zribi等^[78]利用ASAR数据分别对裸露农田土壤地表参数和非洲北部半干旱区土壤水分进行反演并检验, 均取得较好结果。田辉等^[79]利用ASAR影像估算了玛曲地区夏季土壤水分空间分布。胡蝶等^[80-81]利用Radarsat-2 SAR数据反演半干旱地区裸露地表土壤水分, 应用交叉极化组合模型较好反演了10~20 cm土壤含水量信息; 进一步结合MODIS数据应用水云模型校正植被的影响反演黄土高原地区植被覆盖下土壤水分, 取得较好结果。何连等^[82]结合基于变化检测的Alpha近似模型, 利用Sentinel-1卫星获取的多时相C波段SAR数据, 实现了农田地表土壤水分的反演。

主动微波数据具有米级高精度分辨率，在精细化土壤水分监测中提供有效监测手段。但存在重访周期长，费用高、数据处理复杂，反演模型的适用性有限等不足。目前主要用于科学研究，还未能广泛应用于全球地表土壤水分监测业务。

1.6.3 重力卫星监测干旱

地球重力场是一个反映地球表层和内部物质分布、变化及其运动状态的基本物理场，地球重力场指示的地球物理环境及其变化信息，为人类认识和解决自然资源、环境及灾害等问题提供基础数据。

美国宇航局（NASA）和德国航天局（DLR）共同研制了重力反演与气候实验卫星GRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment），并于2002年3月成功发射。GRACE不仅为研究地球深层结构和跟踪地球表面质量变化提供了新技术，而且为反演陆地水储量及其变化提供了新手段。

多国学者应用GRACE反演的水储量信息进行不同区域的干旱特征的监测研究。Yirdaw等^[83]利用GRACE反演的水储量数据提出了总水储量亏损系数（TSDI），用来监测加拿大草原的干旱情况。Seoane等^[84]应用GRACE水储量数据、结合地面站点和水文模拟数据，分析了21世纪初澳大利亚东南部的干旱状况。Chen等^[85]应用GRACE反演的水储量结合气候模式，研究了2005年干旱期间亚马孙流域水储量的变化。李琼等^[86]研究表明2009年秋至2010年春中国西南云南、贵州、四川三省干旱事件发生期间的GRACE反演的西南地区水储量明显减少。曹艳萍等^[87]利用GRACE水储量变化数据确定了区域旱涝指标—相对水储量指数，应用该指数对新疆2002—2013年的干旱情况进行分析，结果与实际干旱灾害状况一致。

需要注意的是GRACE卫星空间分辨率为166 km，仅适用于大范围干旱的监测。GRACE继任卫星（GRACE Follow On）于2018年5月发射。GRACE Follow On重力卫星除搭载微波测距系统外，还搭载了观测精度达到纳米量级的激光测距系统，比微波测距的精度提升三个数量级。这有望进一步提高重力卫星的观测精度和空间分辨率，提升重力卫星对干旱的监测能力。

1.7 高光谱遥感农业干旱监测

1.7.1 高光谱遥感技术在农业干旱监测中的应用

近几十年来，高光谱遥感技术因其高光谱分辨率得到了快速发展，并成为一门新兴遥感技术^[88-89]。高光谱不仅融合了光谱与成像技术，而且能同时获取地物的光谱和空间信息，近年来高光谱遥感技术在精准

农业中得到了广泛的应用。

高光谱的光谱分辨率可达到纳米级，其独到的优势已经在定量遥感中发挥了重大作用，其应用领域也达到了前所未有的广度。在干旱胁迫的监测应用方面，也具备传统多光谱遥感没有的优势，能够捕捉到细微的干旱响应信号，在干旱监测中能更早地监测到植被的早期干旱^[90-92]。

植被光谱对水分和干旱胁迫信号的响应特征，是高光谱遥感进行植被含水量和干旱反演的基础^[93]。前期研究利用光谱的水分吸收特征进行植被含水量反演的结果证明，叶片含水量的光谱反演对于干旱监测具有重要指示意义^[94]。

对水分敏感的波段，前期有很多研究，主要集中在近红外和短波红外波段，比如970、1200、1450和1950 nm附近^[95-96]。利用这些特征，构建的水分指数有WI^[97]，SWIR^[98]，NDWI^[99]等。此外，因干旱胁迫导致植被生理生态改变，在光谱的响应方面也有很多新的尝试，如利用光能利用率PRI指数对水分胁迫的监测^[100-101]，利用水分吸收峰的深度和面积及光谱反射率差值或利用近红外与短波红外的组合进行水分含量的反演^[102-104]。

利用辐射传输模型分析光谱敏感性是非常重要的方法，应用较广的是PROSPECT和SAIL模型^[105]，PROSAIL冠层叶片耦合模型可以实现冠层光谱的前向模拟和生理参数的后向反演。结合PROSAIL模型可以分析不同生理参数对光谱的敏感波段，有利于开展不同干旱胁迫条件下作物生理参数的响应特征^[106-109]及敏感光谱波段和监测指数的机理性分析^[110-111]。

高光谱遥感技术在农业干旱监测中的应用，主要是通过直接或间接反演因干旱导致的生理生态参数进行。基于冠层辐射传输模型或光谱植被指数定期获取并反演干旱发生过程中的作物生长状况，间接反演干旱是目前常用的方法^[112]。

1.7.2 国内高光谱干旱监测存在的问题

高光谱遥感技术经过近30年的发展，不论是高光谱成像系统，还是基于“星—空—地”的多源遥感都取得了显著的进展，但是从应用角度看，我国在利用高光谱遥感监测与诊断作物水分胁迫方面，尚存在如下问题。

1) 常规的航空、航天高光谱遥感数据，由于受成本高、空间分辨率低、数据获取权限、研究区天气状况等众多因素的影响，在我国的应用仅局限于部分研究机构，在农作物水分状况监测领域的相关研究还十分有限。

2) 缺乏开展近地表、航空和航天高光谱遥感的综合研究,难以进行作物水分胁迫状况的空间制图与动态监测。利用多源高光谱遥感数据,构建“星—空—地”一体化农业遥感信息获取技术体系,对准确及时获取农作物水分胁迫信息,指导农田节水灌溉和精准农业的发展具有实际应用价值。

因此,在地面观测研究中,应充分考虑地面传统作物水分监测方法与卫星遥感反演中的空间尺度不匹配的问题,建立能够贯穿作物生长全程的水分信息获取、校正、融合方法和决策模型,重点关注“星—空—地”多源高光谱数据间的尺度关联性^[113-115],改进卫星遥感数据反演作物冠层水分胁迫模型的精度,实现较大面积农田作物水分胁迫状况的精准制图与动态监测,对充分发挥高光谱遥感技术在精准农业研究中的作用具有实际应用价值。

1.8 基于低空无人机遥感平台干旱监测

1.8.1 基于低空无人机遥感平台的作物生长及水分胁迫状况精准制图

与普通的航空高光谱遥感探测平台相比,基于小型无人机的高光谱成像系统对起飞环境要求简单,成本低,因此无人机载高光谱成像技术受到国内外学者的极大关注,并在农业遥感应用方面有了快速发展。其中利用机载成像高光谱遥感监测与诊断农作物水分胁迫就是主要研究方向之一^[116]。

国外在基于UAV技术的植被水分胁迫高光谱遥感研究方面,主要取得如下一些初步研究成果。

1) 在植被叶片及冠层水平上,发现一些对植被水分含量高度敏感的基于光谱位置的特征参数、基于光谱面积的特征参数和基于波段组合的高光谱遥感监测指标。例如,提出对植被叶片水分含量、植被表面冠层结构非常敏感的窄带绿度指数(如改进红边归一化植被指数等),发现可度量植被在光合作用中对入射光利用效率的光利用率指数(如光化学植被指数、结构不敏感色素指数、红绿比值指数),构建可估算植被水分亏缺的指数(如作物水分胁迫指数等指标)。

2) 基于多元统计分析方法和辐射传输理论,构建部分作物水分含量的高光谱遥感反演模型,在部分地区开展作物水分胁迫程度的时空动态模拟与制图研究。通过模型耦合或模型与植被指数结合方法,建立的光谱模型(如Suits、SAIL和PROSPECT等),恰当模拟叶片结构、植被冠层和生化组分等^[117]。由于水分含量在很大程度上决定着作物的产量和品质,因此,在作物水分含量的高光谱研究方面,国外研究较为深

入,相关研究报道较多^[118-119]。

我国在基于植被冠层及叶片水分敏感光谱波段的提取和组合,对比光谱指数与植被水分含量之间的关系,修正现有水分估算模型的参数等方面也取得了一些初步的研究成果^[120-124]。与国外相关研究比较,我国在该领域的研究水平整体处于跟跑或者并跑状态,并未取得可用于指导生产实践的成熟研究成果。

1.8.2 无人机技术与成像光谱的农业干旱监测发展趋势

1) 利用近年来广泛应用的无人机(UAV)技术和航空高光谱成像设备,充分发挥图谱合一的优势,更加灵活机动地获取作物冠层的高光谱遥感数据,为探索多时空尺度作物水分含量的研究,以及为改进卫星遥感反演作物水分含量模型的精度提供了更加丰富的数据源与技术支撑,是航空高光谱遥感未来发展的趋势之一。

2) 采用星载、机载和近地面高光谱数据相结合的方式,综合研究作物冠层水分含量的光谱特征,探索作物冠层水分亏缺的高光谱遥感敏感指数、诊断方法及其监测模型,实现较大时空范围作物水分胁迫状况的精准制图与动态监测,对指导未来精准农业的发展具有实际应用价值。

1.9 叶绿素荧光遥感干旱监测

叶绿素荧光与植物的光合作用密切相关,主要位于650~800 nm的红光和远红光区域^[125-126]。大量研究已表明,植被光合作用过程中的荧光特性对植物的环境胁迫响应非常敏感^[127-128]。

受到干旱胁迫后,植物的叶绿素含量一般会降低^[129-132],反射光谱和荧光测量都可以捕捉到这些信号,特别是荧光信号一般比叶绿素的下降更早体现出来,因此更容易监测早期干旱胁迫的发生^[133],这是叶绿素荧光遥感监测干旱的基础。

在水分胁迫监测中,还经常用到激光诱导荧光技术。利用激光荧光雷达和调制荧光探测不同作物如玉米、甘蔗、高粱的叶绿素荧光产量结果表明,荧光探测水分胁迫与辐射强度和作物种类有关^[134]。基于荧光成像技术探测叶片光合能力的结果表明,利用蓝/红光波段的峰值比可以反演植物的水分状况,正常和受胁迫叶片的差异明显^[135]。利用激光激发诱导荧光光谱的结果表明,活力指数(Rfd)和胁迫适应指数(Ap)可以较好地指示植物胁迫信号^[136]。

以上不同荧光遥感技术的应用,进一步扩大了遥感监测的范围,特别是荧光成像技术,能够更准确地指示植物的早期胁迫信息。随着荧光探测器的出现,可以更好地和光谱、植被生理生化指标结合,应用

于植被光合^[137]、营养诊断^[138-139]、环境胁迫和干旱监测^[140-141]中。

存在问题：叶绿素荧光信号解释光合作用机理性强，在植被生理监测中具有反应灵敏，测定速度快，无损监测的特点，得到了广泛应用。但是其缺点也很明显，比如在测量过程中需要经过暗适应，不易在冠层水平实施，在室外观测中受外界环境的影响很大，目前主要在室内开展研究。激光诱导荧光适合进行宏观测量，但要考虑激发能量和植被的接受程度，还不适合空间应用^[142]。此外，日光诱导荧光技术虽然能够揭示植被光合作用与环境的关系，且FLD法有可能实现空间遥感应用，但还处在探索阶段，很多问题如大气校正、环境条件与荧光的定量关系等，仍依赖于将来定量遥感技术与理论的发展与大量地面试验数据验证。相信随着高光谱遥感技术和定量遥感模型的发展将进一步促进荧光遥感技术在植被干旱监测中发挥更多作用。

1.10 基于大数据和多源遥感技术的综合干旱监测

由于农业干旱监测涉及到大气—土壤—植被等多种过程，同时涉及的作物类型多样，干旱致灾的机理不同，作物的干旱敏感期差异较大，农业干旱监测不再是一个单一指标能完成的，而在大数据发展到一定程度的今天，干旱监测问题也成为一个大数据问题^[143]，同时干旱监测也需要多源遥感数据共同完成^[144-145]，才有可能完成精准和精细化的监测预警服务，基于大数据的综合干旱监测方法与模型将成为未来农业干旱监测的主要发展趋势。

2 中国遥感干旱监测的需求分析和存在的问题

2.1 国家需求

干旱是对全球经济和社会影响最严重的一种气象灾害。我国每年因旱灾造成的损失占各种自然灾害总和的15%以上。在全球气候变化和人类活动增加的背景下，干旱的发生频率、强度和持续时间均有可能增加。由于引发干旱的大气环流异常的原因十分复杂，在未来相当长时间内，人类还很难对干旱的发生进行准确预测。因此，加强干旱监测技术的研究，提高干旱监测和早期预警的水平，不仅是国际干旱科学领域的一项重要内容，也是我国政府抗旱防灾中致力解决的首要问题。

国家迫切需要对不同区域和不同类型干旱出现时间、范围、强度以及发生、发展和消退干旱过程进行准确监测和早期预警，提升我国干旱防灾减灾能力，减少干旱造成的经济损失，为我国干旱防灾减灾、保

障粮食安全以及生态安全、水安全乃至国家安全提供科技支撑。

2.2 行业需求

综合运用气象观测信息和现代预测、预报、预警技术，实时、准确地发布监测干旱信息是气象部门主要业务。目前各级气象部门分别通过气象干旱指数（CI）、降水距平百分率（Pa）、标准化降水指数（SPI）等指数进行气象干旱监测，应用降水距平百分率、不同深度的土壤相对湿度开展农业气象干旱监测，应用卫星遥感数据开展遥感干旱监测。这些指标分别从不同角度来描述干旱过程，相互之间既有联系又存在差异，单一指数仅反映干旱过程某一状况。如何从时间和空间上建立这些指数间的联系，客观定量地融合这些信息，建立综合监测模型，对全面了解干旱过程是非常必要和迫切需求的。

因此，研究由气象干旱—农业干旱—水文干旱间的干旱传递过程和相互间的联系，综合应用气象、农业气象、卫星遥感观测信息以及大数据技术，改进和发展干旱监测模型，研发多源信息综合监测技术，并能针对不同目标提供更客观、定量和精细的干旱信息，提高干旱监测和早期预警水平，为国家抗旱决策提供有力的科技支撑，是气象部门迫切需要解决的科学和技术问题。

2.3 科研中存在的问题

1) 对气象干旱—土壤干旱—农业干旱发展过程中，不同遥感参数（包括大气降水、云、大气温湿度等大气参数），植被参数（植被指数、盖度、叶面积、fPAR），地表参数（地表反射率、地表温度、蒸散发、土壤水分、土壤热通量）的特征、作用及相互联系认识不够，没有掌握干旱发生、发展和传播的过程中各参数变化规律和对干旱作用的实质。

2) 由于干旱时空特征差异很大，现有的遥感监测指标远不能满足我国不同区域和不同时间段的干旱监测的需求，亟待建立不同时空尺度遥感监测指标体系。

3) 如何建立从紫外—微波的多源遥感数据综合监测干旱技术？如何解决时空尺度转化问题？如何进行多源数据融合？这些问题还需要深入探讨和研究。

3 对策建议和研究计划

3.1 对策建议

虽然干旱是全球普遍发生的自然灾害，但因其影响因子复杂，其发生发展规律和造成的危害具有鲜明的地域和时间特征，人类对干旱的认识尚在探索中。

尽管科学界已经提出了100多个基于地面站点观测的干旱指数和数十个基于卫星遥感的干旱指数，但仍然没有哪个指数可以对全球不同地区的干旱发生时间、范围和强度进行有效的监测。

干旱与当地气候、农业、水文、土壤、人口和社会抗旱能力密切相关，因此，针对各地气候特征，结合农业和植被特点、土地类型等特点，提出适合不同地区、不同时段干旱监测标准和指标体系很有必要。

3.2 研究计划

1) 建立以FY系列卫星估算地表蒸散为基础的干旱监测技术

以FY-3和FY-4产品为基础，利用双层模型分离土壤蒸发和植被蒸腾，分别计算地表胁迫指数和冠层胁迫指数，分别给出地表和冠层的水分监测结果，进而针对不同地域和目标开展监测。

2) 综合微波遥感干旱指数构建、应用与评估

以西北为研究区，在检验微波遥感产品适用性的基础上，利用微波遥感降水、土壤水分和地表温度等数据分别建立单一指标的微波干旱指数；分析这些指数在不同气候区、不同地表类型和不同时段监测干旱能力的差异；基于不同单一指标干旱指数在监测干旱时贡献率不同的分析，综合考虑大气—土壤—地表温度的影响因素，采用专家咨询权重法和因子分析权重法，将单一指标干旱指数按不同权重系数合理组合，进一步构建多种微波集成干旱指数。

将多种微波集成干旱指数应用于西北区域干旱时空变化特征的监测中，应用历史干旱过程检验微波集成干旱指数在西北地区干旱监测中的适用性；同时结合气象站点资料计算的干旱指数（如SPI、K和PDSI等）以及光学遥感数据计算的指数（如NDVI、VCI和TCI等）评估微波集成干旱指数监测干旱的特点和应用能力；根据不同气候区和不同地表类型选择最佳微波集成干旱指数，并分析西北地区近20年的干旱演变特征。

3) 无人机航空—地面结合的高光谱遥感干旱致灾过程机理观测试验研究

根据旱区作物生长发育规律，开展水分胁迫条件下的地面—航空高光谱同步观测试验，研究作物生理生态特征与高光谱遥感特征。

研究作物在水分胁迫条件下的航空高光谱遥感监测特征指标和参数，提出旱区作物水分胁迫的光谱诊断指标体系，建立适用于不同生育期的作物水分胁迫高光谱遥感监测模型。

以地面—航空同步观测资料为基础，逐步升尺度，在较大时空范围验证和改进星载高光谱遥感监测模型的精度；结合HJ-1A和TG-1等高光谱卫星遥感影像，对作物水分胁迫状况进行空间制图与动态监测（图1）。

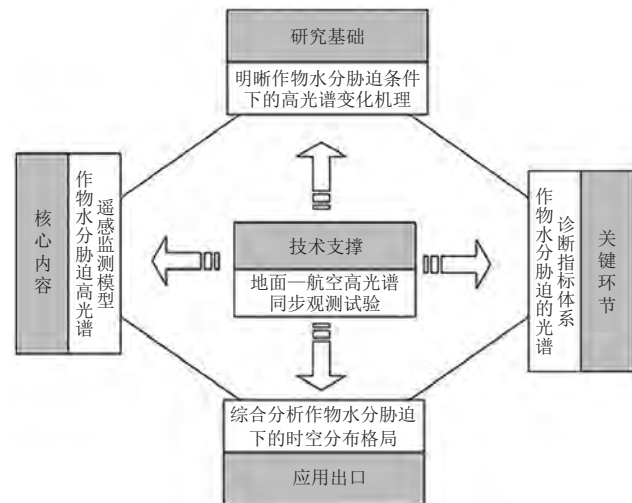


图1 基于UAV技术的作物水分胁迫高光谱遥感监测技术路线图

Fig. 1 Flow chart of crop water stress hyperspectral remote sensing monitoring based on UAV technology

4) 研制综合干旱监测指数

在上述工作的基础上，利用不同的干旱监测指数对历史干旱过程进行监测，对比分析各指数的适用下垫面及监测特征，并基于不同植被覆盖度，通过按不同权重进行指数组合构建出新的综合遥感干旱监测指数，使其适用于非均匀的下垫面。

参考文献

- 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述. 干旱气象, 2012, 30(4): 494-508.
- 马柱国, 符凉斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 2001, 59(6): 737-746.
- 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014(1): 80-91.
- Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. A global assessment, London: Routledge, 2000, 1(1): 3-18.
- 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- Aghakouchak A. Remote sensing of drought: progress and opportunities for improving drought monitoring. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 452-480.
- 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- 周磊, 武建军, 张洁. 以遥感为基础的干旱监测方法研究进展. 地理科学, 2015, 35(5): 630-636.
- 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18.
- 隋学艳, 王汝娟, 姚慧敏, 等. 农业气象灾害遥感监测研究进展. 中国农学通报, 2013, 30(17): 284-288.
- Wang X, Zhao C, Guo N, et al. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in Loess Plateau semiarid regions. Spectroscopy Letters, 2015,

- 48(7): 492-498.
- [12] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1133-1135.
- [13] Tucker C J, Justice C O, Prince S D. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1571-1581.
- [14] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [15] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [16] 陈维英, 肖乾广. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用. *遥感学报*, 1994, 36(2): 106-112.
- [17] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1993, 13(5): 219-222.
- [18] Anyamba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(3): 596-614.
- [19] 严建武, 陈报章, 房世峰, 等. 植被指数对旱灾的响应研究—以中国西南地区2009年—2010年特大干旱为例. *遥感学报*, 2012, 16(4): 720-737.
- [20] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的土壤湿度遥感方法研究. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 81-88.
- [21] 郭锐, 管晓丹. 植被状况指数的改进及在西北干旱监测中的应用. *地球科学进展*, 2007, 22(11): 1160-1168.
- [22] Watson K, Rowen L C, Ofield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, 3: 2017-2041.
- [23] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1): 59-73.
- [24] 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.
- [25] 张仁华, 孙晓敏. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证. *中国科学:地球科学*, 2002, 32(12): 1041-1050.
- [26] 刘振华, 赵英时. 遥感热惯量反演表层土壤水的方法研究. *中国科学:地球科学*, 2006, 36(6): 552-558.
- [27] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [28] Kogan F N. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(5): 1038-1038.
- [29] Kogan F. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 83(48): 557-563.
- [30] Bento V A, Gouveia C M, Dacamara C C, et al. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 286-295.
- [31] Toby N C, Robert R G, Eileen M P. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1): 161-173.
- [32] 杨秀海, 卓嘎, 罗布. 基于MODIS数据的青藏高原旱情监测研究. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 527-534.
- [33] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation: preliminary five results from AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1989, 9(7): 239-249.
- [34] Nemani R, Pierce L, Running S, et al. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3): 548-557.
- [35] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71-94.
- [36] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [37] 王鹏新, 龚健雅, 李小文, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527-533.
- [38] 于敏, 高玉中, 张洪珍. 地表温度-植被指数特征空间干旱监测方法的改进. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 243-250.
- [39] Liu L, Liao J, Chen X, et al. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003-2010). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 199: 302-320.
- [40] Liu Y, Yue H. The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) Based on Bi-Parabolic NDVI-T_s Space and Gradient-Based Structural Similarity (GSSIM) for Long-Term Drought Assessment Across Shaanxi Province, China (2000-2016). *Remote Sensing*, 2018, 10: 1-21.
- [41] Shan Y, Gong A, Su Y, et al. Improvement of soil moisture monitoring using EVI as a key parameter based on TVDI in the north China plain. *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*. 2014: 3738-3741.
- [42] 张喆, 丁建丽, 李鑫, 等. TVDI用于干旱区农业旱情监测的适宜性. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 220-227.
- [43] 冉琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的DEM订正. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 32-36.
- [44] Sha S, Guo N, Hu D, et al. Comparison of temperature vegetation dryness indexes through two approaches in drought monitoring: A case of Henan Province. 2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics. *IEEE*, 2017.
- [45] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [46] Ghulam A, Qin Q, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(2): 150-164.
- [47] 张学艺, 李剑萍, 秦其明, 等. 几种干旱监测模型在宁夏的对比应用. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 18-23.
- [48] Zhang D, Meng L, Qu J J, et al. Estimation of surface soil moisture in cornfields using a modified modis-based index and considering corn growth stages. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5618-5631.
- [49] Amani M, Salehi B, Mahdavi S, et al. Temperature-Vegetation-soil Moisture Dryness Index (TVMIDI). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 1-14.
- [50] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17: 1133-1138.
- [51] Tang R L, Li Z L. Evaluation of two end-member-based models for regional land surface evapotranspiration estimation from MODIS data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 202: 69-82.
- [52] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111: 839-855.
- [53] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. Upscaling tower and aircraft fluxes from local to continental scales using thermal remote sensing. *Agronomy Journal*, 2007, 99: 240-254.
- [54] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78: 2539-2558.
- [55] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2010, 47: 123-138.
- [56] 孙逢林, 覃丹宇, 游然. 星载SAR降水反演研究简介. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 111-115.
- [57] Moazami S, Golian S, Kavianpour M R, et al. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 8156-8171.
- [58] Sun R, Yuan H, Liu X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 302-319.

- [59] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区TRMM降水质量评价. 水科学进展, 2016, 27(5): 639-651.
- [60] 唐国强, 李哲, 薛显武, 等. 赣江流域TRMM遥感降水对地面站点观测的可替代性. 水科学进展, 2015, 26(3): 340-346.
- [61] Naumann G, Barbosa P, Carrao H, et al. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(10): 1867-1874.
- [62] Sahoo A K, Sheffield J, Pan M, et al. Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 181-193.
- [63] 冯海涛, 于国荣, 杨具瑞. 基于TRMM 3B43 V7数据的云南降水与干旱监测及精度评价. 水资源与水工程学报, 2014, 4: 89-96.
- [64] 陈诚, 赵书河. 基于TRMM降雨数据的中国黄淮海地区干旱监测分析. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 122-129.
- [65] 胡蝶, 郭锐, 王丽娟, 等. TRMM降雨数据在甘肃省干旱监测中的应用. 干旱气象, 2017, 35(3): 374-382.
- [66] 邹晓蕾, 翁富忠, 田小旭. AMSR2仪器上新增设的C波段通道对陆地无线电频率干扰的有效缓解. 气象科技进展, 2015, 5(2): 35-41.
- [67] Imaoka K, Kachi M, Fujii H, et al. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 717-734.
- [68] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展. 中国科学(地球科学), 2012, 42(6): 814-842.
- [69] Su C H, Ryu D, Young R I, et al. Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 1-11.
- [70] Draper C S, Walker J P, Steinle P J, et al. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 113(4): 703-710.
- [71] 彭丽春, 李万彪, 刘辉志. FY-3A/MWRI数据反演半干旱地区土壤湿度的研究. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 797-804.
- [72] Jackson T J, Bindlish R, Cosh M H, et al. Validation of soil moisture and ocean salinity (SMOS) soil moisture over watershed networks in the U.S. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1530-1543.
- [73] 李哲, 王磊, 王林, 等. 基于AMSR-E反演青藏高原夏季表层土壤湿度. 高原气象, 2017, V36(1): 67-78.
- [74] 陆崢, 柴琳娜, 张涛, 等. AMSR2土壤水分产品在黑河流域中上游的验证. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 324-337.
- [75] 庄媛, 师春香, 沈润平, 等. 中国区域多种微波遥感土壤湿度产品质量评估. 气象科学, 2015, 35(3): 289-296.
- [76] Pathe C, Wagner W, Sabel D, et al. Using envisat asar global mode data for surface soil moisture retrieval over oklahoma, USA. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 468-480.
- [77] Holah N, Baghdadi N, Zribi M, et al. Potential of ASRA/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(1): 78-86.
- [78] Zribi M, Chahbi A, Shabou M, et al. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT/ASRA radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011, 15(1): 345-358.
- [79] 田辉, 文军, 史小康, 等. 主动微波遥感黄河上游玛曲地区夏季土壤水分. 水科学进展, 2011, 22(1): 59-66.
- [80] 胡蝶, 郭锐, 沙莎, 等. 基于Radarsat-2/SAR数据反演定西裸露地表土壤水分. 干旱气象, 2014, 32(4): 553-559.
- [81] 胡蝶, 郭锐, 沙莎, 等. Radarsat-2/SAR和MODIS数据联合反演黄土高原地区植被覆盖下土壤水分研究. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 860-867.
- [82] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相Sentinel-1 SAR数据反演农田地土壤水分. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.
- [83] Yirdaw S Z, Snelgrove K R, Agboma C O. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian prairie. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1-2): 84-92.
- [84] Seoane L, Ramillien G, Frappart F, et al. Regional GRACE-based estimates of water mass variations over Australia: validation and interpretation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 10(4): 4925-4939.
- [85] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2005 Drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2009, 114: 1-9.
- [86] 李琼, 罗志才, 钟波, 等. 利用GRACE时变重力场探测2010年中国西南干旱陆地水储量变化. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1843-1849.
- [87] 曹艳萍, 南卓铜, 程国栋. GRACE重力卫星监测新疆干旱特征. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 87-92.
- [88] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 2006. 高光谱遥感原理技术与应用. 北京: 高等教育出版社.
- [89] 童庆禧. 空间遥感信息产业发展. 卫星应用, 2012, (1): 44-48.
- [90] Tong Q X, Xue Y Q, Zhang L F. Progress in hyperspectral remote sensing science and technology in China over the past three decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 70-91.
- [91] Houborg R, Fisher J B, Skidmore A K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 43: 1-6.
- [92] Xue Z, Du P, Li J, et al. Sparse graph regularization for robust crop mapping using hyperspectral remotely sensed imagery with very few in situ data. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 124: 1-15.
- [93] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [94] 张佳华, 李莉, 姚凤梅. 遥感光谱信息提取不同覆盖下植被水分信号的研究进展. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1638-1642.
- [95] Riaño D, Vaughan P, Chuvieco E, et al. Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 819-826.
- [96] Michio S, Tsuyoshi A. Seasonal visible, near infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phylomass. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27(2): 119-127.
- [97] Peñuelas J, Piñol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18: 2869-2875.
- [98] Roberts D A, Green R O, Adams J B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. *Remote Sensing Environment*, 1997, 62: 223-240.
- [99] Gao B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257-266.
- [100] Suárez L, Zarco-Tejada P J, Berni J A, et al. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 730-744.
- [101] Suárez, L. et al. Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 286-298.
- [102] 田庆久, 官鹏, 赵春江. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析. 科学通报, 2000, 45(4): 2645-2650.
- [103] 刘良云, 王纪华, 张永江, 等. 叶片辐射等效水厚度计算与叶片水分定量反演研究. 遥感学报, 2007, 11(3): 289-295.
- [104] Wang X P, Zhao C Y, Guo N, et al. Determining the canopy water stress for spring wheat by using canopy hyperspectral reflectance data in Loess Plateau semi-arid regions. *Spectroscopy Letters*, 2005, 48(7): 492-498.
- [105] Jacquemoud S, et al. PROSPECT+ SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S56-S66.
- [106] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 185-212.
- [107] Gaspar, T. Concepts in plant stress physiology. Application to plant

- tissue cultures. *Plant Growth Regulation*, 2002, 37(3): 263-285.
- [108] Jac'ımovic' G, Malešević' M, Ac'in V, et al. Effects of drought on yield of winter wheat in long-term field trial and Vojvodina province. *Research Journal of Agricultural Science*, 2013, 45(3): 30-31.
- [109] Taiz L, Zeiger E. 2010. *Plant physiology*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- [110] Suárez L, Zarco-Tejada P J, Sepulcre-Cantó G, et al. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 560-575.
- [111] Sanches I D A, Souza Filho C R, Kokaly R F. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680 nm absorption feature with continuum removal. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 97: 111-122.
- [112] 吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 585-590.
- [113] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 77-85.
- [114] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 277-293.
- [115] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [116] 赵晓庆, 杨贵军, 刘建刚, 等. 基于无人机载高光谱空间尺度优化的大豆育种产量估算. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 110-116.
- [117] Jin X, Yang G, Li Z, et al. Estimation of water productivity in winter wheat using the AquaCrop model with field hyperspectral data. *Precision Agriculture*, 2016: 1-17.
- [118] Alexander A, Zbyněk M, Julie O, et al. Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 420-436.
- [119] Villamuélas M, Fernández N, Albanell E, et al. The Enhanced Vegetation Index (EVI) as a proxy for diet quality and composition in a mountain ungulate. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 658-666.
- [120] 张良培. 高光谱目标探测的进展与前沿问题. *武汉大学学报信息科学版*, 2014, 39(12): 1387-1394.
- [121] 薛忠财, 高辉远. 反射光谱技术在监测大豆叶片光化学效率和水分状况中的应用. *大豆科学*, 2016(3): 436-441.
- [122] 林毅, 李倩, 王宏博, 等. 干旱条件下春玉米高光谱特征及土壤含水量反演. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1323-1329.
- [123] 李媛媛, 常庆瑞, 刘秀英, 等. 基于高光谱和BP神经网络的玉米叶片SPAD值遥感估算. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 135-142.
- [124] 程志庆, 张劲松, 孟平, 等. 基于高光谱信息的107杨叶片等效水厚度估算模型的研究. *林业科学研究*, 2016, 29(6): 826-833.
- [125] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(1): 313-349.
- [126] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence- a practical guide. *Journal of Experiment Botany*, 2000, 51: 659-668.
- [127] Agati G. Response of the in vivo chlorophyll fluorescence spectrum to environmental factors and laser excitation wavelength. *Pure and Applied Optics*, 1998, 7(4): 797-807.
- [128] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and model simulation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 582-595.
- [129] Lichtenthaler H K, Babani F. Detection of photosynthetic activity and water stress by imaging the red chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2000, 38(11): 889-895.
- [130] Lichtenthaler H K, Miehé J A. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. *Trends in Plant Science*, 1997, 2(8): 316-320.
- [131] Lichtenthaler H K, Lang M, Sowinska M, et al. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 599-612.
- [132] Gitelson A A, Kaufman Y J and Merzlyak M N. Use of the green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [133] Heisel F, Sowinska M, Miehé J A, et al. Detection of nutrient deficiencies of maize by laser induced fluorescence imaging. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 622-631.
- [134] Cerovic Z G, Goulas Y, Gorbunov M, et al. Fluorescence of water stress in plants: Diurnal changes of the mean lifetime and yield of chlorophyll fluorescence, measured simultaneously and at distance with a τ -LIDAR and a modified PAM-fluorimeter, in maize, sugar beet and Kalanchoe. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 311-321.
- [135] Schindler C, Lichtenthaler H K. Photosynthetic CO₂-assimilation, chlorophyll fluorescence and zeaxanthin accumulation in field grown maple trees in the course of a sunny and a cloudy day. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(s3-4): 399-412.
- [136] Subhash N, Mallia J R. Changes in laser induced chlorophyll fluorescence signatures during regeneration of Kacholam and Colocasia plants from water stress. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France*, 2003, 5: 3293-3295.
- [137] Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suárez L, et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(6): 1262-1275.
- [138] Middleton E M, Campbell P K E, McMurtrey J E, et al. Red edge optical properties of corn leaves from different nitrogen regimes. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. *IGARSS' 02. 2002 IEEE International*. IEEE, 2002.
- [139] McMurtrey J E, Daughtry C S T, Devine T E, et al. Spectral detection of crop residues for soil conservation from conventional and large biomass soybean. *Agronomie*, 2005, 25(1): 25-33.
- [140] Evain S, Flexas J, Moya I. A new instrument for passive remote sensing: 2. Measurement of leaf and canopy reflectance changes at 531 nm and their relationship with photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 175-185.
- [141] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [142] Ounis A, Cerovic Z G, Briantais J M, et al. Dual excitation FLIDAR for the estimation of epidermal UV absorption in leaves and canopies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(1): 33-48.
- [143] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [144] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔, 等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望. *中国农业科技导报*, 2013, 15(6): 63-71.
- [145] 刘勃, 毛克彪, 马莹, 等. 农业大数据浅析及与Web GIS结合应用. *遥感信息*, 2016, (1): 124-128.