

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[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18, [GUO Ni, WANG Xiaoping. Advances and Developing Opportunities in Remote Sensing of Drought[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 1-18], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0001

## 遥感干旱应用技术进展及面临的 技术问题与发展机遇

郭 锐, 王小平

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

**摘 要:** 干旱是全球各地区普遍存在的一种气候现象, 也是对人类社会影响最为严重的一种自然灾害。全球气候变化和社会发展加剧了干旱的影响程度, 增强了干旱灾害的风险, 给全球农业、水资源、生态环境安全以及社会可持续发展造成巨大威胁, 提高干旱监测和早期预警技术水平是应对、管理干旱和减轻干旱脆弱性的基础。近 30 a 来随着全球对地观测技术的迅速发展, 卫星遥感监测干旱技术取得很大进步, 在全球干旱监测和早期预警中发挥着不可替代的作用。但是, 干旱是多学科交叉的复杂问题, 其发展过程缓慢、时间和空间表现特征差异很大, 遥感监测干旱技术在应用中还存在许多技术问题, 对抗旱防灾提供支撑的力度仍不够。本文在简要总结卫星遥感监测干旱应用技术的基础上, 对各种指数(模型)应用中存在的问题进行评述, 指出卫星遥感干旱监测面临的主要技术问题和未来发展机遇; 针对我国卫星遥感干旱应用现状, 提出了亟待解决的主要问题和应该努力的方向。

**关键词:** 干旱; 卫星; 遥感; 干旱指数; 进展

**文章编号:** 1006-7639(2015)-01-0001-18 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0001

**中图分类号:** P407

**文献标识码:** A

### 引 言

干旱是全球各地区普遍存在的一种气候现象, 也是对人类社会造成损失和影响最为严重的一种自然灾害<sup>[1]</sup>。干旱不仅能造成大范围粮食和水资源短缺、生态环境恶化, 而且会引发经济失调、饥荒、社会动荡、战争乃至政府的更迭<sup>[2]</sup>。干旱涉及的问题不仅是科学技术问题, 也是社会问题, 因此一直受到各国政府和国际社会的高度关注。2013 年联合国召开的“国家干旱政策高级别会议”宣言指出<sup>[3]</sup>: 干旱给世界各国, 特别是发展中国家和最不发达国家造成粮食安全、贫困、资源匮乏、生态环境恶化、社会动荡等方面的严峻挑战。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、强度和持续时间有可能增加。提高干旱监测和早期预警技术水平, 从而更好地应对、管理干旱和减轻干旱脆弱性, 避免

干旱带来的一系列影响, 是国际干旱领域的一项重要内容。

大气环流异常是引发干旱的根本原因。由于大气环流的影响因子众多, 过程异常复杂, 人类对干旱发生机理还不十分清楚。因此, 在目前干旱预测水平还不够理想的状况下, 建立完善的干旱防御和风险管理体制便显得十分重要, 其中干旱的监测和早期预警是干旱防御的重要环节。

传统的干旱监测是利用气象和水文观测站获得的降水、气温、蒸发、径流等气象和水文数据, 以及农业气象观测的墒情, 依据各种干旱指标进行监测<sup>[4]</sup>。由于观测站点空间密度有限, 仅靠常规站点的观测还不能了解干旱发生发展过程的全貌, 特别是在站点稀疏的地区。卫星从太空遥感地球, 大大扩展了人类认识地表的视角、空间尺度, 将传统“点”的测量扩展为“面”的信息, 提供了云、降水、土

收稿日期: 2014-12-18; 改回日期: 2015-01-30

基金项目: 公益性行业(气象)专项“多时间尺度干旱监测与预警、评估技术研究”(GYHY201006023)及国家自然科学基金(41201370)共同资助

作者简介: 郭锐(1963-), 女, 研究员, 主要从事遥感应用研究. E-mail: guoni0531@126.com

壤水分、蒸散量、植被的生理生态状况、地表热状况等多个与干旱发展过程密切的参数,为大范围、快速、动态、精确了解旱情提供了丰富的信息,有效弥补了离散站点监测空间和时间不连续、以点带面之不足。近 30 多 a 来,随着全球对地观测技术的迅速发展,卫星遥感监测干旱技术取得了长足的进步,已经发展出多种遥感干旱(或土壤水分)监测模型,提出了数十个遥感干旱指数,并在各国干旱监测中得到有效应用<sup>[5]</sup>。卫星遥感干旱监测已经成为全球抗旱减灾中不可或缺的手段。

由于干旱是涉及气象、农业、水文、生态、社会经济等多学科和多部门的复杂问题,干旱过程关系到大气降水、土壤储水、植被耗水、江河湖泊蓄水等水循环的全过程,同时干旱又是一种发展缓慢,表现特征时空差异很大的过程<sup>[2,6]</sup>。目前,无论地面干旱监测技术还是卫星遥感干旱监测技术均未达到用统一指标对干旱的发生和结束、发生区域和强度进行客观定量监测的水平,干旱监测技术仍面临很大挑战。

卫星遥感监测干旱是通过建立遥感获得的植被状况、地表温度、热惯量等参数与地面干旱监测指标(如土壤湿度)的关系来间接监测干旱。然而,由于干旱问题的复杂性和卫星遥感技术的不确定性,遥感监测干旱在监测指标的普适性、可比性、实用性等方面还存在许多问题。就我国而言,虽然卫星遥感干旱研究和应用工作已经取得很大成就,发表了相当多数量论文,研发了多个遥感监测干旱系统,很多部门均在发布干旱遥感监测业务产品,但是这些监测结果普遍存在时空可比性、实用性等问题。在干旱来临时还不能像遥感台风、洪涝、森林草原火灾等自然灾害那样,及时拿出很有说服力且具有时空可比性的干旱遥感产品,准确描述干旱发生时间、范围和强度,为抗旱提供科学有力支撑。卫星遥感干旱技术的发展似乎遇到了瓶颈。

在简要评述近 30 a 国际国内主要干旱遥感监测应用技术的基础上,指出了各种监测指标应用时存在的问题和注意事项,分析了遥感干旱监测技术面临的主要技术问题,并结合未来科学技术进步对干旱监测技术发展前景做了展望;针对我国卫星遥感干旱监测现状和需求,提出我国亟待解决的技术问题和建议,旨在为读者有效应用卫星遥感干旱监测技术、科学防御干旱灾害提供借鉴。

## 1 卫星遥感干旱监测应用技术研究进展

20 世纪 70 年代末,美国国家大气海洋局 NOAA

(National Oceanic and Atmospheric Administration) 第三代极轨业务卫星开始运行。这代卫星搭载的 AVHRR 探测器,为全球提供了覆盖范围广(覆盖全球)、周期短(每日昼夜 2 次观测同一地区)、空间分辨率适宜(星下点分辨率约为 1.1 km,适合干旱范围大的特点)、探测波段多(5 个探测波段分别位于可见光、近红外、短波红外和热红外波段)的遥感监测。由于 AVHRR 数据免费获取(只要建立接收站即可获得数据),该数据是 1980 年代以来各国进行卫星干旱监测的最主要的数据源,为全球卫星遥感干旱应用技术的发展 and 遥感干旱监测业务的建立立下了汗马功劳。与此同时,美国 NASA 陆地卫星计划(Landsat)第五颗卫星于 1984 年成功发射。Landsat-5 搭载的 TM 传感器波段多(7 个波段分别位于蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外和热红外)、分辨率高(除热红外波段为 120 m 外,其它为 30 m)和超长的服役期(运行了近 30 a),虽然其回访周期长(16 d)、数据收费,但 TM 数据 30 m 的空间分辨率具有开展卫星—地面遥感同步观测试验的优势,在遥感干旱监测的基础研究和模型建立方面发挥了重要作用。

20 世纪 90 年代以后,随着 MODIS、AMSR-E、TRMM、GRACE 等国际新一代传感器的升空以及我国风云、资源等卫星的业务运行,卫星对地观测能力大大提高。卫星传感器探测波段从可见光、近红外、短波红外、热红外扩展到微波以及地球重力场;微波探测方式则由被动扩展到主动;地面分辨率从 250 m 到百余公里等多种尺度。卫星遥感几乎可以获得地球水循环的各个分量以及地表植被生理生态、蒸散、热状况、土壤水分等多种与干旱密切联系的信息,并具有全天时、全天候的观测能力。近十几年来,NASA 通过互联网免费发布 MODIS、AMSR-E、TRMM 等多种可用于干旱监测的遥感产品,进一步推动了全球遥感干旱应用研究的进步和技术的普及。

干旱过程是一个由大气降水减少导致进入土壤的水量降低,植被因供水不足造成生长受挫而减产、江河湖泊因蓄水不足而面积萎缩(或水位下降),进而对经济、社会产生影响的复杂过程,其涉及范围非常广,不能用单一或几个变量表征。遥感监测技术均是针对干旱过程中某一环节或要素应用于干旱指数或模型进行监测。本文着重于根据卫星探测波长的不同对主要遥感干旱指标进行评述。

### 1.1 基于地物反射光谱的干旱监测

#### 1.1.1 可见光—近红外波段

可见光—近红外遥感记录的是地球表面对太阳辐射能的反射辐射能,是利用地物对太阳短波辐射

的反射强度信息来判别地物的类型<sup>[7]</sup>。由于绿色植物在这段光谱区间具有独特的光谱反射特点,是最易被识别的地类。人们根据植被的光谱特征,通过对可见光和近红外波段的组合,构建出了多种植被指数(Vegetation Index,以下简称VI)。当土壤供水不足导致植被发生水分胁迫时,植被在生理上会出现叶绿素含量下降、光合作用速率降低、植被叶面积和覆盖度减少的现象,这些变化均可导致卫星遥感植被指数下降。图1是春小麦在不同干旱状况下的光谱曲线,可以看到干旱明显导致春小麦可见光波段(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。基于VI的干旱指数主要有以下几种。

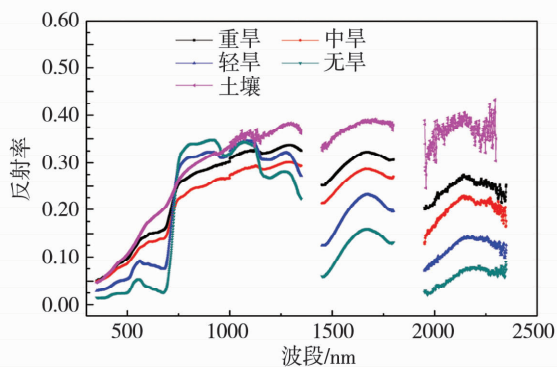


图1 不同干旱状况下春小麦光谱曲线(光谱曲线由中国气象局定西野外试验基地实地观测获得。无旱、轻旱、中旱和重旱分别表示土壤相对湿度 $>60\%$ 、 $50\% < \text{土壤相对湿度} < 60\%$ 、 $40\% < \text{土壤相对湿度} < 50\%$ 和土壤相对湿度 $< 40\%$ )

Fig. 1 The spectral curve of spring wheat under different water stress levels

### (1) 归一化植被指数 NDVI

归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 是应用最广的一种植被指数,其定义见表1。研究表明 NDVI 与植被覆盖度、叶面积、生物量、叶绿素等植被生理参数具有强烈的相关性,可作为定量度量植被状况的指标,是最早应用于干旱监测的指数,也是构建其它基于植被指数的干旱指数的基础。Tucker 等应用 NDVI 监测非洲撒哈拉的干旱过程<sup>[8-9]</sup>,郭锐等发现 1995 年西北东部特大干旱时期 NDVI 的变化与干旱范围和强度有很好的 consistency<sup>[10]</sup>。许多研究发现,NDVI 的变化在半干旱地区对干旱发生的指示性更好。

### (2) 距平植被指数 AVI

由于 NDVI 与当地地理气候和植被分布及生长

规律密切相关,单时次 NDVI 仅能反映植被分布状况并不能指示干旱状况。陈维英等<sup>[11]</sup>参考气象学中的距平概念,提出了距平植被指数 AVI (Anomaly Vegetation Index)。该指数利用某年某时段 NDVI 与历史平均状况的偏差来监测干旱(表1)。距平植被指数应用较广,Anyamba 等<sup>[12]</sup>发现 1984 年撒哈拉地区植被生长季 NDVI 的异常减小可以指示大范围的干旱,利用 NDVI 负距平可以确定干旱对植被影响的空间范围<sup>[12]</sup>;严建武、江东等分别应用距平指数监测云南和中国北方地区干旱<sup>[13-14]</sup>。

应用距平植被指数需要建立较长时间的 NDVI 序列,对于 NDVI 很低的地区(如荒漠),由于分母很小,会产生很大的距平值,在这些地方应用时需要注意。

### (3) 植被状况指数 VCI

随着长时间序列 NDVI 数据的积累,Kogan 等<sup>[15]</sup>于 1993 年提出植被状态指数 VCI (Vegetation Condition Index, VCI),其定义见表1。VCI 确定了监测目标的 NDVI 在历史序列中的地位,将有利和不利的状况隐含在其中,利用比值增强了 NDVI 信号在时间上的相对变化,并消除了因地理位置、气候背景和生态类型不同而产生的 NDVI 区域差异使 VCI 具有时、空可比性。

VCI 在全球得到广泛应用。冯强等<sup>[16]</sup>建立了不同月份 VCI 与全国农业气象站土壤湿度的统计模型,并用来监测土壤水分进而进行干旱监测。研究和应用表明,VCI 在农作物生长旺盛期监测干旱较有效,在作物播种和收割时,监测效果较差<sup>[17]</sup>。在区域适应性上,管晓丹等<sup>[18]</sup>发现,VCI 在半干旱、半湿润地区应用较好,在灌溉区和高寒阴湿地区不适用。同时发现在植被覆盖度很小的荒漠和沙漠地区,VCI 有虚高现象,郭锐等<sup>[19]</sup>针对这一现象对 VCI 进行了修正。

### (4) 增强植被指数 EVI

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,Liu 等<sup>[20]</sup>引入一个反馈项来同时对二者进行订正,提出了增强的植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index),它利用背景调节参数 L 和大气修正参数 C1、C2 同时减少背景和大气的作用。EVI 具有在高植被盖度区不会发生饱和,并可以消除土壤背景和大气影响的优势。NASA MODIS VI 产品同时提供了全球 NDVI 和 EVI 数据,随着 MODIS 和其它类似传感器资料的积累,EVI 在干旱监测中的优势将显现出来。

表 1 几种常用遥感干旱指数

Tab. 1 The common drought monitoring indexes of remote sensing

名称	公式	备注
1 归一化植被指数 NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	
2 距平植被指数 AVI	$AVI = NDVI_i - \overline{NDVI}$	
3 植被状况指数 VCI	$VCI = 100 * \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	
4 增强的植被指数 EVI	$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{Red} - C_2 \rho_{Blue} + L} (1 + L)$	
5 归一化水分指数 NDWI	$NDWI = (\rho_{0.86} - \rho_{1.24}) / (\rho_{0.86} + \rho_{1.24})$	
6 垂直含水量指数 PDI	$PDI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (\rho_{Red} + M \rho_{NIR})$	
7 修正的垂直干旱指数	$MPDI = \frac{\rho_{Red} + M \rho_{NIR} - f_v (\rho_{v, Red} + M \rho_{v, NIR})}{(1 - f_v) \sqrt{M^2 + 1}}$	
8 半干旱区水分指数 SAWI	$SAWI1 = \rho_{780} / \rho_{1750}$ $SAWI2 = (\rho_{780} - \rho_{1750}) / (\rho_{780} + \rho_{1750})$	
9 表观热惯量	$P = (1 - A) / \Delta T$	真实热惯量计算复杂, 请查阅原文。
10 温度状况指数	$TCI = 100 * \frac{BT_i - BT_{min}}{BT_{max} - BT_{min}}$	
11 植被健康指数	$VHI = a * VCI + (1 - a) * TCI$	
12 植被供水指数	$VSWI = T_s / NDVI$	
13 温度植被干旱指数	$TVDI = 100 * \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}$	
14 条件植被温度指数	$VTCI = 100 * \frac{LST_{NDVI_{max}} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_{max}} - LST_{NDVI_{min}}}$	
15 作物缺水指数	$CWSI = 1 - E/E_p$	
16 植被干旱响应指数	VegDRI, 一种融合传统气候干旱指标和其它生物物理信息的干旱综合监测工具	详见文献[110]
17 微波集成干旱指数 (MIDI)	$MIDI = \alpha * PCI + \beta * SMCI + (1 - \alpha - \beta) * TCI$ $PCI = (TRMM_i - TRMM_{min}) / (TRMM_{max} - TRMM_{min})$ $SMCI = (SM_i - SM_{min}) / (SM_{max} - SM_{min})$ $TCI = (LST_i - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min})$	

注:  $\rho$  指光谱波段所对应的反射率;  $\rho_{Red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{Blue}$  分别为红光波段、近红外波段、蓝光波段的反射率;  $\overline{NDVI}$  为植被指数 NDVI 的平均值;  $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$  为 NDVI 同期多年的最大值、最小值; EVI 中  $L$  为土壤背景调节参数,  $C_1$ 、 $C_2$  分别为大气修正参数;  $PDI$ 、 $MPDI$  中的  $M$  为土壤线的斜率,  $f_v$  为植被覆盖度;  $\rho_{v, Red}$ 、 $\rho_{v, NIR}$  分别为植被在红光、近红外波段的反射率;  $A$ 、 $\Delta T$  分别为反照率和昼夜地表温差;  $BT_{max}$ 、 $BT_{min}$  为亮温  $BT_i$  同期多年的最大值、最小值;  $E$ 、 $E_p$  分别为实际蒸散和潜在蒸散;  $LST$  是地表温度;  $MIDI$  中  $\alpha$ 、 $\beta$  是权重系数,  $PCI$  是 TRMM 降水状态指数,  $SMCI$  是土壤水分状态指数。

这类基于植被指数的干旱遥感指数在一定程度上指示了植被受旱后叶面积指数的减少和叶绿素的下降。从干旱发生过程来看,植被在干旱胁迫积累一定程度之后才会出现形态及绿度的变化,因此这类指数对水分胁迫的指示有一定的滞后性。应用这类指数时需要注意的是:(1)需要建立较长时间序列的连续、稳定、高质量的遥感数据集;(2)要排除洪涝、病虫害、土地利用和种植结构变化造成的植被指数的变化;(3)NDVI在浓密植被区出现饱和的问题,在热带森林、北半球阔叶林和青藏高原东北部表现十分突出<sup>[21-22]</sup>;(4)在潮湿的生态系统中水分不是植被生长的制约因素,利用NDVI进行干旱监测会受到限制<sup>[23]</sup>;(5)在半干旱地区,稀疏植被和土壤背景会对冠层光谱和植被指数的计算产生显著影响<sup>[24]</sup>,可能使监测结果产生误差。

#### (5)垂直干旱指数 PDI

Ghulam 等<sup>[25]</sup>在研究可见光和近红外特征空间的基础上,提出了 PDI (Perpendicular Drought Index)。朱琳等<sup>[26]</sup>应用 FY-3A/MERSI 和 PDI 对 2009 年夏季内蒙古自治区中东部地区干旱进行了监测,表明 PDI 与土壤水分有较好的负相关。Ghulam 等<sup>[27]</sup>利用植被覆盖度改进了 PDI,构建了改进的垂直干旱指数 MPDI,在宁夏干旱监测应用结果表明<sup>[28]</sup>,在裸地或稀疏植被地表 PDI 和 MPDI 的干旱监测精度相当,高植被覆盖时,MPDI 的监测结果远好于 PDI。

#### 1.1.2 近红外—短波红外

在近红外和短波红外有 5 个叶片水分吸收带,分别位于 970、1 200、1 450 和 2 500 nm。利用这一特性,通过监测植被含水量来监测干旱。

#### (1)归一化水分指数 NDWI

Gao<sup>[29]</sup>利用 0.86  $\mu\text{m}$  和 1.24  $\mu\text{m}$  植被液态水对光谱吸收的差异提出归一化植被水分指数 NDWI (Normalized Difference Water Index),Gu 等<sup>[30]</sup>利用 5 a MODIS NDVI 和 NDWI 评估了美国大平原草地干旱,表明 NDWI 较 NDVI 对干旱响应得更快。张文江等<sup>[31]</sup>发现 NDWI 对 2006 年四川东部特大干旱的时空指示非常明显,能准确反映旱情的发生发展和消退历程,并捕获了地面难以观测到的旱情详细空间分布。

#### (2)去除土壤背景影响的植被水分指数

张佳华等<sup>[32]</sup>针对土壤背景对植被指数的影响,利用对水分比较敏感的短波红外波段代替可见光波段,将近红外与短波红外波段组合,构建了一系列去除土壤背景影响的植被水分指数,结果表明这些指

数与植被水分信息 FMC (Fuel moisture content) 之间的相关系数几乎都高于原植被指数与 FMC 之间的相关系数,可以在一定程度上改善提取植被水分的精度。

#### (3)半干旱区水分指数

王小平等<sup>[33]</sup>针对半干旱区作物特点,在多年地面光谱观测试验的基础上,利用近红外和短波红外波段的 0.75  $\mu\text{m}$  和 1.75  $\mu\text{m}$  构建了 SAWI (semi-arid water index) 指数,结果表明该指数与冠层含水量的相关性在春小麦不同生育期与不同年份均高于 NDVI、NDWI、PRI 等传统指数,能更好地监测该地区作物的水分胁迫状态,可改进传统植被指数在半干旱区作物水分的监测效果。

由于能够方便获取提供短波红外的传感器(如 MODIS、MERSI 等)的数据时间不够长,短波红外类的指数提出和应用时间均较短,需要在更长时间和更大范围上应用这类指数,检验其干旱监测能力。

#### 1.2 fAPAR 监测干旱

植物吸收性光合有效辐射分量 fAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) 是植物主要的生理参数之一,也是作物生长模型、生态模型等多种模型中的重要参数,同时可以作为监测干旱的指标。NASA 和欧洲航空局 ESA (European Space Agency) 分别通过互联网提供由 MODIS 和 ENVISAT/MERIS 数据反演的 fAPAR 产品。欧洲干旱观测台 (European Drought Observatory, EDO) 研发了干旱监测、预测和信息交换平台,不定期发布包括标准化降水指数 SPI (Standardized Precipitation Index)、土壤湿度、fAPAR 异常等信息的干旱监测公报 (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>)。

Rossi 等<sup>[34]</sup>研究了 fAPAR 与不同时间尺度(分别为 1、3、6、12 月)SPI 的相关性,发现 fAPAR 与不同时间尺度的 SPI 均呈正相关,与 3 个月的 SPI 相关比短期(1 个月)和长期(6 个月以上)的 SPI 更好,说明 fAPAR 主要指示几周至数月的农业干旱;分析还发现 fAPAR 对降水具有滞后性。与基于波段线性组合的 NDVI 相比,fAPAR 更具有生物物理意义,对降水的敏感性 fAPAR 较 NDVI 高;fAPAR 异常在不同植被类型和地形特征下对干旱的敏感性均较 NDVI 高。应用 fAPAR 时还需要注意,fAPAR 在高海拔地区监测干旱时会受到限制;不同传感器的 fAPAR 产品对干旱的监测结果也有差异<sup>[35]</sup>。

#### 1.3 热红外遥感干旱

波长在 8~14  $\mu\text{m}$  区间的电磁波段为热红外波段,NOAA/AVHRR、LANDSAT/TM/ETM+、TERRA/

MODIS、AQUA /MODIS、FY-1/VIRR、FY-3/VIRR 和 FY-3/MERSI 等传感器均具有红外波段。应用红外波段数据可以反演地表温度、热惯量等与土壤水分等相关联参数。

### 1.3.1 热惯量遥感土壤水分

土壤热惯量是度量土壤热惰性大小的物理量,表征了土壤阻止其自身温度变化能力的大小,其定义为  $P = (k\rho c)^{\frac{1}{2}}$ ,其中  $P$  为热惯量, $k$  为土壤热传导系数, $\rho$  为土壤密度, $c$  为土壤定压比热。热惯量与土壤水分有密切关系,对于同一类土壤而言,含水量越高其热惯量就越大。卫星遥感能够获取区域地表温度,进而能够通过热惯量来间接反演区域土壤水分。Watson 等<sup>[36]</sup>首次提出利用地表温度日较差来推算热惯量的简单模式,随后,Price<sup>[37]</sup>提出表观热惯量 ATI(Apparent Thermal Inertia)的概念,并简化了热惯量的计算方法(表 1)。虽然表观热惯量计算简单,但与真实热惯量还有一定差距。真实热惯量模型是在土壤热传导方程基础上建立的,马蔼乃<sup>[38]</sup>对土壤热传导方程进行傅立叶变换,推导出真实热惯量;余涛等<sup>[39]</sup>发展了一种基于地表能量平衡方程的真实热惯量简化计算方法;张仁华<sup>[40]</sup>在表观热惯量模型基础上,提出了微分热惯量的概念,建立了既不需要土壤类型又不需要非遥感参数的地表热通量遥感模型;刘振华等<sup>[41]</sup>提出了一个只涉及到地表最高温度,不需求算地表昼夜温差,并考虑植被覆盖的新的遥感热惯量模型,使“遥感热惯量法反演的表层土壤水”的适用范围从裸地扩展到植被覆盖区。尽管已经有很多成果,但热惯量模型研究仍然是遥感领域中的难题,真实热惯量遥感反演模型通常用于科学研究,干旱监测业务中仍以计算简单的表观热惯量为主,但由于其仅考虑了地表温差和地表反射率,未考虑土壤质地及地表能量收支过程等复杂影响,反演的土壤水分精度不高<sup>[42]</sup>。

热惯量模型应用时存在的主要问题有:(1)适用于裸地和低植被覆盖的土壤,在植被覆盖条件下,利用土壤热惯量法进行土壤水分状况的评价存在很大的限制;(2)卫星过境时间与地表温度最高和最低值出现的时间不一致,导致由卫星获得的昼夜温差并不是真正的“昼夜温差”,进而影响监测精度;(3)利用相邻几天温度合成的方法获得的昼夜温差,由于卫星过境时间的差异,会将误差带入合成数据中,影响监测结果;(4)以统计学方法建立热惯量与土壤水分的模型,存在时间和空间的局限性,普适性差。虽然我国许多业务部门应用热惯量方法进行

干旱监测,但是监测结果不稳定,应用效果并不理想。

### 1.3.2 温度状况指数

由红外遥感反演的地表温度( $T_s$ )是大气—土壤—植被系统能量和水分交换中的重要参数,可以部分表征地表蒸散和植被水分胁迫状况,进而用于干旱监测。当植被发生水分胁迫时,植被叶片气孔会关闭以减少蒸腾所造成的水分损失,进而使得植被冠层潜热通量下降而感热通量增加,导致植被观测温度上升。根据这一原理 Kogan 等<sup>[43]</sup>提出温度状态指数 TCI(Temperature Condition Index, TCI)。

植被冠层温度升高是植被受到水分胁迫的最早表现,这一现象在干旱发生的初期植被形态尚未发生变化时就会出现,因此,应用冠层温度可以较植被指数更早监测到干旱的发生。应用表明,TCI 不受植被生长季限制,在作物播种和收获时也可以应用,弥补了 VCI 的缺点。但是,由于影响地表温度的因素很多,如下垫面状况、卫星过境时间的差异、海拔高度以及地表热平流等,这些因素均会对 TCI 监测产生影响,增加 TCI 监测干旱的不确定性。

### 1.4 植被指数(VI)与地表温度 $T_s$ 组合的指数

如上所述,植被指数和地表温度不仅是描述地表特征的 2 个重要参数,也是监测干旱的指标。将 2 种数据组合可以获得更多土壤和植被水分信息,进而可以更有效地监测干旱。

#### 1.4.1 植被健康指数

Kogan<sup>[44-45]</sup>根据 VCI 和 TCI 监测干旱过程的时空上的差异和各自优缺点,将 2 个指数进行组合,提出植被健康指数 VHI(Vegetation Health Index)(表 1)。VHI 兼容了 VCI 和 TCI 各自的优势,在北美和全球不同区域干旱监测中广泛应用<sup>[46]</sup>,是美国国家干旱减灾中心和 NOAA STAR(NOAA Center for Satellite Applications and Research)干旱监测产品,目前美国 NOAA 仍然在发布全球 VHI 产品(<http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/>)。VHI 中  $\alpha$ 、 $\beta$  2 个系数应该视地区和时间不同而变化,但实际应用中很难实现,均取 0.5。

#### 1.4.2 植被供水指数

Carlson 等<sup>[47]</sup>提出植被供水指数 VSWI(Vegetation Supply Water Index), $VSWI = T_s/NDVI$ ,式中, $T_s$  是地表温度。该指数也是基于干旱发生时植被叶片气孔关闭致使冠层温度升高,同时 NDVI 随着光合作用降低而减少建立的。VSWI 计算简单,一般通过建立 VSWI 与土壤湿度的统计模型来监测干旱,在我国应用比较广泛<sup>[48-51]</sup>。该指数适合地形平坦、植被覆盖度较高的地区和季节,统计模型受时

间、地域的限制,监测结果不具有时空可比性。

#### 1.4.3 植被指数—地表温度特征空间

研究表明,以植被指数—地表温度构成的特征空间与地表植被覆盖、土壤水分状况和冠层温度状况关系密切,可用于估算地表蒸散量、反演地表热通量、估算表层水分状况等参量。由植被指数—地表温度特征空间衍生出多个遥感干旱指数,这些指数较单一植被指数或温度模型更好地反映干旱发生。应用较多的这类指数有如下2种。

##### (1) 温度植被干旱指数(Temperature - Vegetation Dryness Index, TVDI)

Sandholt 等<sup>[52]</sup>基于 NDVI -  $T_s$  三角形特征空间提出温度植被干旱指数,其定义见表1。实际应用时先由遥感数据获得 TVDI 指数之后,再通过对 TVDI 指数的数值进行分级或与地面观测土壤湿度建立统计模型,进行干旱监测。TVDI 分级标准人为性很大,从目前发表文献中可以看到不同研究中 TVDI 的分级标准不尽相同<sup>[53]</sup>,这会造成干旱监测结果的混乱。因此,综合考虑各地状况,建立适宜的 TVDI 干旱指数分级标准很有必要。齐述华等<sup>[54]</sup>利用由 NOAA/AVHRR 资料获得的 NDVI 和  $T_s$  计算了 TVDI,并进行全国旱情监测。由于海拔高度对地表温度有影响,冉琼等<sup>[55]</sup>利用 DEM 数据对温度植被干旱指数 TVDI 进行订正,提高了土壤湿度的监测精度。

##### (2) 条件植被温度指数 VTCI ((Vegetation Temperature Condition Index)

王鹏新等<sup>[56]</sup>基于 NDVI -  $T_s$  特征空间,提出了条件植被温度指数 VTCI ((Vegetation Temperature Condition Index) 模型(表1)。如何确定冷边界和热边界是计算 VTCI 的关键,一般利用单时次或多时次合成最大 NDVI 和  $T_s$  确定,具有人为性。孙威等<sup>[57]</sup>应用多年旬 NDVI 最大值合成产品和  $T_s$  最大—最小值产品来确定多年共同冷边,对 VTCI 冷边界的确定方法进行了完善。于敏等<sup>[58]</sup>利用多年同期卫星观测数据合成某时段各年通用的  $T_s$  - NDVI 特征空间来近似理想状态下的理论特征空间,增强了  $T_s$  - NDVI 特征空间的稳定性,比改进前特征空间能更准确地反映地表干湿状态。由于 EVI 能够克服 NDVI 饱和以及受土壤背景和大气影响的弱点,由  $T_s$  - EVI 特征空间获得的 TVDI 监测土壤水分的精度高于  $T_s$  - NDVI<sup>[59]</sup>。与 TVDI 指数类似, VTCI 指数同样存在指数分级人为性的问题。

VHI、VSWI、TVDI 和 VTCI 综合了 VI 和  $T_s$  监测干旱的优势,物理意义明确,得到了广泛的应用。但应用时需要注意:(1)这类指数主要依赖 VI 和  $T_s$  两

者之间的负相关,当 VI 和  $T_s$  是正相关时,这类指数不适合干旱监测。研究发现<sup>[60]</sup>,当水分是植被生长的限定因子时,VI 和  $T_s$  是负相关。然而,当能量是植被生长的限定因子时,如在高纬度和高海拔地区,尤其在植被生长初期,二者呈现正相关,表明此时太阳辐射是驱动 VI 和  $T_s$  相关的主要因素,其他生物物理变量起次要作用;(2)VI 和  $T_s$  间负相关不是固定不变的,而是随区域、季节和植被类型而变化的。理想状况  $T_s$  - NDVI 特征空间湿边应该近似水平,但实际应用模型中很多都是正相关,说明在这种状况下水分不是植被生长的限定因素,获得的指数不适宜监测干旱;(3)TVDI 和 VTCI 是在理想 VI -  $T_s$  特征空间状态下提出的,要求研究区的植被覆盖度和土壤水分变化范围较大,植被覆盖从裸地到全覆盖,土壤表层含水量从凋萎系数到田间持水量的变化,这种条件在实际应用中很难满足,进而影响干旱监测结果;(4)VSWI、TVDI、VTCI 的应用区域和时段也有明显的限制,所选区域要适中,区域太大会造成太阳辐射差异,会对  $T_s$  和 NDVI 有很大影响;区域太小,植被盖度和土壤水分变化不足以满足建模的要求。应用时段应避免选取植被生长初期和中后期;(5)海拔高度是影响  $T_s$  的重要因素,从许多发表的论文监测结果中可以看到,常存在高海拔地区旱情偏低的假象;(6)干边、湿边提取和指数的分级标准均具有人为性。

目前,植被指数与地表温度组合类的干旱指数是我国各地干旱监测中主要应用的指数。在许多应用中,不对指数的适用性做任何分析便建立干旱监测模型,因此会产生监测结果与实际干旱状况不符的现象。我国地域辽阔、地形复杂,气候类型、土地类型和植被类型、农业种植多样,水利条件差别也很大。因此,针对不同的地区和季节,结合土地类型、植被类型和地形状况,细致研究不同气候背景和气候年景下特征空间的变化及其时空差异,认识其物理实质以及对干旱的指示意义,对合理应用这类指数有效监测干旱很有必要。

#### 1.5 基于蒸散的干旱监测

蒸散(包括土壤蒸发和植被蒸腾)是地表水分平衡和热量平衡的重要组成部分,也是与植被生理活动以及生物量形成密切相关的量。研究表明,区域实际蒸散量( $E$ )和潜在蒸散量( $E_p$ )的比值( $E/E_p$ )与土壤水分密切相关,当土壤水分小于理想供水状况下的土壤水分含量(即实际蒸散量小于潜在蒸散量)时,表征区域缺水;反之,表征区域不缺水。Jackson 等<sup>[61]</sup>基于这种现象提出作物缺水指数 CW-

$SI = 1 - E/E_p$ , 用来监测作物水分胁迫。因此, 利用蒸散监测干旱的关键问题是如何精确估算区域蒸散量<sup>[62-63]</sup>。

传统的地表蒸散是由观测或模式计算获得。蒸散的观测方法当前主要有涡动相关方法、空气动力学法及波恩比—能量平衡法等, 也可利用蒸渗计直接测量<sup>[64]</sup>。模型计算是利用常规气象资料如太阳辐射、风、气温、水汽压等和蒸散模型如 Penman、FAO-Penman、FAO-Penman-Monteith、Priestley-Taylor、FAO-Radiation 等进行。由于下垫面的非均匀性, 将上述由“点”观测或计算的蒸散值向“面”上推广时会产生很大的不确定性。卫星遥感能够获取面上的地表特征参数(如地表反射率、植被盖度、地表温度等), 通过蒸散模型估算区域蒸散量, 在一定程度上克服了微气象学法的上述局限性, 近几十年来得到快速发展。

遥感蒸散多是以地表能量平衡方程为基础, 利用遥感所得地表反照率、植被指数和地表温度, 借助微气象学基本原理建立的单层模型、双层模型和多层模型来估算蒸散量。单层模型(也称“大叶”模型)是将植被覆盖的地表假设为一均匀的大叶, 所有地—气间能量、物质的交换都用发生在这样一个简单、均一的介质上的过程来描述。常用的有 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)模型<sup>[65]</sup>和 SEBS(Surface Energy Balance System)模型<sup>[66]</sup>等。单层模型是一种对陆面过程进行高度简化的模型, 由于物理意义明确, 需要的输入参数少、计算简捷, 得到广泛的应用。

双层模型是将地表蒸散分离为土壤蒸发和冠层蒸散, 并考虑了二者的耦合效应(也叫 Series Model), 由 Shuttleworth 和 Wallace 在 1985<sup>[67]</sup>年首先提出。Norman 等<sup>[68]</sup>对该模型进行了简化, 提出了“平行”模型(Parallel Model)。后者假设土壤与冠层之间的能量通量相互平行, 二者各自独立地与上层空气进行湍流交换, 不存在耦合效应。如应用较多的 TSEB(Two Source Energy Balance)模型, 将地气能量交换过程按土地利用比例区分为土壤和植被的各自贡献, 进而利用定向辐射温度的分解, 或通过 Priestley-Taylor 近似公式估算地表未受水分胁迫条件下的热通量初始值和组分温度, 建立能量平衡方程, 联立方程组求解各组的潜热通量。

基于“系列”阻抗理论和能量平衡原理的经典双层模型 TSEB, Anderson 改进和发展了 ALEXI(Atmosphere Land-Exchange Inverse)模型<sup>[69-70]</sup>。

ALEXI 模型物理机制明确, 数据处理较为简便, 可快速模拟较大区域范围的地表能量收支状况。研究表明由该模型得到的地表实际蒸散( $E$ )和潜在蒸散( $E_p$ )及蒸散胁迫指数( $ESI, ESI = 1 - E/E_p$ ), 与帕尔默干旱指数具有很好的时空一致性; 应用该模型得到地表胁迫指数(ESIS, Evaporative Stress Index for Soil)和冠层胁迫指数(ESIC, Evaporative Stress Index for Canopy), 可以很好地分别指示气象干旱和农业干旱。ALEXI 模型在美国已经过大量外场试验检验, 目前实现美国全境的日地表蒸散的实时反演, 并基于该模型生产出美国干旱监测产品<sup>[71-72]</sup>。我国 FY-2 系列静止卫星已经稳定地业务运行多年, 利用 ALEXI 模型和 FY-2 卫星数据开展我国地表日蒸散的实时反演, 对我国干旱的实时、有效监测具有重要意义。

与单层模型相比, 双层模型分解了作物蒸腾和土壤蒸发的作用, 分别考虑冠层和土壤的水热吸收转化过程以及二者之间的相互作用, 可以更好地描述土壤、植被与大气之间的能量交换机制, 尤其在稀疏植被覆盖条件下, 其优越性更为显著。但双层模型定义了较为复杂的阻抗系统, 这些阻抗受植被结构、生理特征及土壤水分状况影响较大, 难以直接利用遥感数据获取, 成为双层模型精确反演区域蒸散的主要难点<sup>[73-74]</sup>。陈云浩等<sup>[75]</sup>应用 NOAA/AVHRR 资料, 基于 Shuttleworth 等有关不同覆盖条件下空气动力学阻抗的方法, 估算了非均匀下垫面地表蒸散的双层模型; 宋小宁等<sup>[76]</sup>从地表能量平衡原理入手, 同时考虑冠层的水平输送过程, 结合地面同步实测数据和气象数据, 建立了基于亚象元的区域双层模型; 刘振华等<sup>[77]</sup>也在亚象元区域双层模型的基础上引入遗传算法对混合象元进行分解, 获取地表温度的组分参量, 从而提高了模型的估算精度。

遥感蒸散存在的主要问题是: (1) 各种蒸散遥感模型的验证均存在以单点的观测值验证像元尺度反演值的问题。通过非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测遥感试验, 可以揭示地表蒸散发的空间异质性, 实现非均匀下垫面地表蒸散发的尺度扩展, 为发展和验证蒸散发模型提供基础数据<sup>[78]</sup>。其中, 大孔径闪烁仪(LAS)在地表通量验证中能发挥重要作用<sup>[79]</sup>; (2) 地表通量遥感的核心是地表温度, 正确评估地表比辐射率是更精确反演地表温度的关键; (3) 空气动力学参数以及地表粗糙度等参数, 空间异质性大, 这些非遥感参数空间化问题也是影响蒸散发反演精度的重要因素; (4) 应用极轨卫星遥感获得的瞬时观测蒸散均是通过公式转换为日蒸散量,



静止卫星遥感数据可以在精确获得日蒸散量方面有很好的应用前景。

### 1.6 微波监测干旱

光学遥感存在的最大问题是云的影响。国际通常采用一段时期合成的方法来生成遥感产品以消除云的影响。但是,由于每日卫星过境时间不一致以及大气状况的差异,会在对太阳辐射和大气状况敏感的物理参数,如反照率、地表温度等合成产品中产生误差。在多云的地区和时段也很难完全消除云的影响。

微波遥感具有全天时、全天候的监测能力,以及对云、雨、大气较强的穿透能力;并且微波传感器对于植被特性的变化、地表土壤水分等参数十分敏感,已被广泛应用于地表土壤水分等地表参数的反演之中。在过去 10 a,随着多种星载微波传感器的发射,微波遥感已经具有在全球尺度上精确监测整个地球系统中许多要素的能力<sup>[80]</sup>,其中微波反演降水和土壤湿度可以直接用来监测干旱。

下面从雷达卫星反演降水、主动和被动微波反演土壤湿度来介绍微波数据在干旱监测中的应用。

#### 1.6.1 微波反演降水产品监测干旱

热带降水测量计划 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)是由美国国家航空航天局 NASA 和日本国家空间发展局 NASDA 联合开展的一项用于测量热带和亚热带降水及能量交换的科学计划<sup>[81]</sup>。TRMM 卫星于 1997 年 11 月成功发射,搭载了世界上第一台星载降雨雷达 (Precipitation Radar, PR)。NASA 已经通过互联网 [<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>]发布一系列高分辨率、准全球、近实时的 TRMM 产品供全球各研究团体使用。由于 TRMM 数据的空间分布均匀,分辨率远高于站点数据,全球不同地区 TRMM 降水产品与地面降水对比研究表明,其精度已基本接近气象站点观测的雨量数据,很好地弥补了站点降水数据空间分布密度低且不均匀之不足,在降水监测和预报、暴雨研究以及降水资料同化等多方面得到广泛应用<sup>[82-87]</sup>。在干旱监测方面,Naumann 等<sup>[88]</sup>利用 TRMM 数据监测非洲地区的干旱状况,并用 SPI 指数进行检验,表明 TRMM 的干旱监测,具有更高的空间精度。李景刚<sup>[89-90]</sup>将 TRMM 降水数据用于区域气象干旱监测并进行流域旱涝特征的分析;杜灵通等<sup>[91]</sup>利用 TRMM 卫星降水反演产品,参照气象 Z 干旱指数的构建方法,建立了 TRMM-Z 干旱指数,并与同期标准化降水指数 (SPI)比较,发现 TRMM 降水数据可很好地监测出降水亏缺而引起的区域干旱过程。TRMM 数据从

1998 年 1 月起至今已积累了 16 a 的降水产品资料,随着数据长度的积累,其在干旱等气候现象监测中的作用将更加突出。

全球降水计划 GPM (Global Precipitation Mission)是 NASA 继 TRMM 计划之后的后续计划 [<http://pmm.nasa.gov/>]。GPM 计划是在 TRMM 计划的基础上,利用由一个核心卫星与多颗微波小卫星组成的国际的卫星观测网提供下一代覆盖全球的降水观测,增强人类对地球的水和能量循环的认识,提高导致多种自然灾害的极端天气气候事件预测的准确性,增强使用降水信息的实时性和准确性的能力。GPM 卫星能穿透云层,提供更高精度的 3D 云微物理结构,不仅将有助于全球降水反演的重大突破,也对全球天气预报将有划时代的影响,同时将对水灾和泥石流预测预警、干旱预警等技术的提高有很大的帮助。GPM 的主卫星已经于 2014 年 2 月发射成功。

#### 1.6.2 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。被动微波遥感土壤水分是最成熟的技术手段,因为土壤介电常数与土壤水分的关系更直接。与主动微波相比,被动微波遥感反演土壤水分的研究历史更长,算法更为成熟。

目前在轨运行的常用被动微波辐射计包括 SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)、地球观测系统 (EOS) 的 Aqua 卫星所搭载的高级微波辐射计 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System Sensor) 和我国 2008 年发射 FY-3 号卫星搭载的微波成像仪 (MWRI) 以及 2009 年欧空局发射的 L 波段 SMOS 卫星。被动微波传感器每天过境 2 次,具有高时间分辨率,但是受限于微波天线尺寸和较弱的地表微波辐射能量,其空间分辨率较粗 (约 25 km),获得的微波亮温数据可用来估算大范围土壤水分。

在干旱监测中应用最多的是 AMSR-E 数据。美国国家冰雪中心 (NSIDC) 网站 [<http://nsidc.org/data/>]提供了 2002 年 6 月至 2011 年 10 月空间分辨率为 25 km 的全球土壤水分反演数据。由于 AMSR-E 传感器天线旋转故障,从 2011 年 10 月以后无法得到 AMSR-E 土壤水分数据。国内外许多学者开展了 AMSR-E 土壤水分产品的应用研究,如陈洁等<sup>[92]</sup>通过对比我国西北 AMSR-E 土壤湿度产品

与降水、地面实测土壤湿度以及 NCEP/NCAR 再分析土壤湿度的关系来验证 AMSR - E 产品的精度,表明 AMSR - E 土壤湿度产品具有很高的可信度;史小康等<sup>[93]</sup>将 AMSR - E 亮度温度数据应用于高原东北部的土壤湿度模拟中,由垂直和水平极化 2 个辐射亮温的差异定义极化指数 MPDI 来估算土壤湿度,结果表明比实测值和 NCEP 土壤湿度数值小,但较 NCEP 资料更好地体现土壤湿度随降水事件的变化。

FY - 3 搭载的微波成像仪 (MWRI) 是我国第一个星载微波遥感仪器,其中低频 10.65 GHz 通道主要用来全天候获取全球海面温度、风速、陆表温度和土壤水分含量等地球物理参数。国家卫星气象中心通过风云卫星遥感数据服务网[<http://satellite.cma.gov.cn/portalsite/default.aspx>]免费提供 MWRI 地表土壤水分日产品。彭丽春等<sup>[94]</sup>利用 FY - 3A/MWRI 的亮温资料,根据陆表和大气辐射传输模式模拟植被覆盖地表微波亮温和土壤湿度的关系,建立土壤湿度的对数三次多项式反演算法,反演了半干旱区农田和草地的土壤湿度。扈培信<sup>[95]</sup>采用星星对比方法以 AMSR - E 微波辐射计数据作为对比数据,开展了针对 FY - 3B 数据处理和亮温质量评价的研究工作。武胜利等<sup>[96]</sup>在对 FY - 3A/MWRI 应用状况分析中表明, FY - 3A/MWRI 数据能够达到目前国际同类被动微波辐射计的数据水平,在雪灾、干旱和极区海冰监测等方面已经开始发挥重要作用。

AMSR - E 和 MWRI 采用的是 C、X 波段等微波波段,该波段传感器对植被的穿透深度有限,适用于裸土和低矮植被地区土壤湿度的反演。土壤湿度反演算法中地表粗糙度与实际有很大差距,对反演精度有较大影响。另外被动微波反演土壤湿度深度有限,仅穿透 5 cm 左右的土壤。SMOS 采用对植被具有更好穿透性和对土壤湿度更为敏感的 L 波段进行多角度测量,是比 AMSR - E 更可靠和精度更高的传感器。随着 SMOS 数据的积累,其在全球土壤水分和干旱监测研究和应用中的作用将显现出来。被动微波遥感分辨率较粗,利用单点观测土壤水分验证微波土壤湿度产品存在很大的误差,很大程度上影响到数据的验证和有效利用。

### 1.6.3 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含合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 和散射计 2 种。SAR 具有较高的空间分辨率 (10 ~ 30 m), 重访周期达 16 ~ 25 d。应用于土壤水分反演研究的 SAR 主要包括 ERS - 1 (European Remote Sensing Satellite)、ERS - 2、Radarsat、JERS - 1 和 ENVISAT。Pathe 等<sup>[97]</sup>利用 ENVISAT ASAR 全球模式数据对美国俄克拉荷马州地区的土壤水分进行反演,结果表明该数据反演的土壤水分具有捕获空间细节和大范围时间变化的能力;Holah<sup>[98]</sup>和 Zribi<sup>[99]</sup>等利用 ASAR 数据分别对裸露农田土壤地表参数和非洲北部半干旱地区土壤水分进行反演并检验,均取得满意的结果;田辉等<sup>[100]</sup>利用 ASAR 的 VV 极化主动微波资料,估算了夏季黄河上游玛曲地区土壤水分空间分布;王树果等<sup>[101]</sup>使用 AIEM 正向模型,利用 3 景时序接近的 ENVISAT - ASAR 影像对黑河中游临泽草地试验区地表参数进行了多通道反演,获得了像元尺度上的粗糙度分布状况,土壤水分反演均方根误差小于 6%;胡蝶等<sup>[102]</sup>利用 Radarsat - 2 SAR 数据反演定西地区裸露地表土壤水分,结果表明水平和垂直同极化后向散射系数均与 10 ~ 20 cm 实测土壤水分相关性较高,交叉极化组合模型反演的土壤水分较好反映了 10 ~ 20 cm 土壤含水量信息。

由于主动微波数据重访周期长、费用高,目前主要用于科学研究,尚不能广泛地应用于全球地表土壤水分监测业务。同时由于 SAR 对地表粗糙度、地形和植被覆盖非常敏感,数据处理复杂,反演模型的适用性有限。

### 1.6.4 光学—微波遥感联合反演土壤水分

不同传感器获取的不同特征的遥感信息存在一定互补性。在植被覆盖地区,光学遥感数据对植被覆盖信息敏感,但受天气影响较大。微波遥感对土壤水分变化非常敏感,具有一定表面穿透性和全天候、全天候的观测特点,因此,联合光学与微波遥感数据估算植被覆盖下地表土壤水分具有很好的研究和应用前景。考虑到主动微波和被动光学遥感数据反映地表土壤水分的各自优势, Hutchinson<sup>[103]</sup>和 Mattar<sup>[104]</sup>等结合光学和微波遥感数据对植被覆盖地区土壤水分进行反演;余凡等<sup>[105]</sup>提出一种 ASAR 数据和 TM 数据协同反演植被覆盖下土壤水分的半经验耦合模型,将光学模型反演的植被参数作为微波模型的输入来协同反演土壤水分,以提高土壤水分的反演精度;鲍艳松等<sup>[106]</sup>利用冠层后向散射模型 MIMICS (Michigan microwave canopy scattering) 在分析冬小麦后向散射特征基础上,基于 ASAR 和 TM

数据建立冬小麦覆盖下的土壤湿度反演模型,实现了冬小麦覆盖下土壤湿度的反演;张友静等<sup>[107]</sup>利用 ASAR - APP 影像数据和光学影像数据,结合水云模型并联立裸露地表土壤湿度反演模型,建立了基于多源遥感数据的土壤含水量反演模型和参数统一求解方案,反演土壤含水量和准同步实测数据的相关系数为 0.9,均方根误差为 3.83%。

### 1.7 干旱监测综合模型

由于干旱在时间和空间上表现出的多样性和复杂性,目前还没有一个单独的指标或指数可以完全捕捉到不同时空尺度和不同影响程度的干旱特征,多元干旱监测信息综合技术集成是目前最好的方法。美国国家干旱减灾中心在美国以及北美干旱综合监测的成功实例可供各国借鉴,该中心近年开发的植被干旱响应指数 VegDRI (Vegetation Drought Response Index) 是其亮点之一。

VegDRI 是美国地质勘探局和干旱减灾中心等单位近年来共同开发的干旱监测指数<sup>[108]</sup>,在北美干旱业务中得到很好地应用。VegDRI 是一种融合传统气候干旱指标和其它生物物理信息的干旱综合监测工具,它利用历史长时间序列的 NDVI、帕尔默干旱强度指数 (PDSI) 和标准降水指数 (SPI) 的气候数据,结合土地覆盖/土地利用类型、土壤特性、生态环境卫星观测等其它生物物理信息,采用新的数据挖掘技术来识别历史上与干旱相关的气候—植被之间的关系,建立历史气候与植被的关系确定干旱状况;应用气候资料、土地利用等其他信息,剔除洪水、病虫害、火灾等其他环境因素对 NDVI 信息的影响,并与气候干旱监测建立定量关系模型,所生成的 VegDRI 地图提供连续的、地理覆盖范围大、1 km 分辨率的干旱监测图,比其他常用的干旱指标具有更好的空间分辨率。该监测手段在美国得到了很好的应用,美国干旱减灾中心每 2 周发布一次 VegDRI 干旱监测图 [ <http://www.droughtmonitor.unl.edu/> ]。

Zhang 等<sup>[109]</sup>利用微波遥感全天候工作的优势,集成应用降水 TRMM 反演降水和 AMSR - E 反演的土壤湿度和地表温度数据,参考 Kogan 构建植被状况指数的方法,分别构建了微波降水状况指数、微波土壤湿度指数、微波温度状况指数,并参照植被健康指数方法,将上述 3 个指数以一定的权重进行组合,提出微波集成干旱指数及其指标体系 (MIDI, Microwave Integrated Drought Index)。MIDI 在我国内蒙草地和农田区域应用结果表明:MIDI 较好地消除了单一干旱指数在不同区域、不同时段干旱监测中的

差异,其获得的气象干旱时间变化、空间分布及演变特征,与 SPI 有很好的—致性,为区域干旱的遥感定量研究提供了基础<sup>[109]</sup>。杜灵通<sup>[110]</sup>利用 TRMM 卫星降水产品构建了 TRMM - Z 降水亏缺指数,应用 MODIS 植被指数产品和地表温度产品构建了植被异常和温度异常指数,在此基础上利用空间数据挖掘技术并结合土地利用、田间有效持水量等地理信息,构建了山东省综合干旱指数。周磊等<sup>[111]</sup>建立了考虑降水、植被状况、地表热状况,并结合地表覆盖、灌溉、海拔、土壤属性等方面信息,建立了我国黄淮海地区干旱集成的综合模型。这些成果为我国开展多源数据监测干旱工作奠定了基础。由于这些模型均是在局部区域和有限时段上建立起来的,需要经过较大范围和较长时间的应用检验才具有应用价值。

### 1.8 重力卫星监测干旱

地球重力场是地球科学中的基本物理场,反映了地球表层及内部的物质分布变化及其运动状态。它不仅为人类提供了地球物理环境及其变化的重要信息,也为解决自然资源、环境及灾害等问题提供基础数据。近 10 a 来,卫星重力测量技术具备了高精度全球重力场观测的能力。与传统重力观测技术不同,重力卫星具有全天候、高精度、大范围的优势,可获取全球覆盖均匀的地球重力场信号,尤其是卫星重力获得的全球性重力时间变化信息,能在大尺度上定量揭示全球环境变化(海平面与环流变化、冰川消融、陆地水量变化、强地震及极端气候等)导致的地表质量分布与迁移,为定量探测和研究地球物理环境及全球环境变化提供了独特的、不可替代的手段<sup>[112]</sup>。

2002 年 3 月,由美国宇航局 NASA 和德国航天局 DLR (the German Aerospace Center) 合作研制的重力反演与气候实验卫星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 发射。GRACE 卫星提供的时变重力场首次实现对陆地水储量变化的检测,其分辨率在月时间尺度上达到 1 cm 等效水高,极大地弥补了遥感卫星只能反演地表几个厘米厚度的土壤湿度、地面陆地水观测台站只能观测个别地点水储量的变化、以及地表观测台站稀少等不足,为定量研究陆地水的储量变化提供了前所未有的机遇。利用 GRACE 卫星数据监测地下水储量、蒸散和干旱等研究表明,由 GRACE 获得的地下水储量、蒸散和土壤湿度等参量与实测数据有较好的一致性,很好地补充了地面观测之不足<sup>[113-117]</sup>。目前,美国 NASA 每周发布基于 GRACE 的地下水

水分的干旱指数业务产品,该产品由 GRACE 观测的陆地水储量与其他观测数据集成,并使用一个复杂的陆面水和能量过程的数值模型获得(<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/NASAGRACEData-Assimilation.aspx>)。

GRACE 卫星空间分辨率为 166 km,空间分辨率很粗,适用于大范围干旱的监测。2009 年 3 月,欧空局发射欧洲首颗利用高精度和高空间分辨率技术提供全球重力场模型的卫星 Goce,空间分辨率 80 km,目前该卫星已经成功完成其探测使命。美国 NASA 计划 2016 年发射 GRACE - on,空间分辨率比 GRACE 有很大提高,达 66 km,对干旱的监测能力将大大提高。

## 2 存在的技术问题及面临的机遇

### 2.1 存在的技术问题

虽然,近 30 a 来卫星遥感干旱监测技术取得很大进步,但是,由于干旱问题的复杂性和遥感科学技术的现状,如何利用遥感技术及时、定量、有效地监测和预警干旱的发生发展,客观、准确地评估干旱影响程度,仍然是遥感基础研究和应用技术领域的前沿问题,遥感干旱监测技术还存在很多技术问题,面临很大挑战。

(1) 卫星遥感干旱监测技术的困难首先来自干旱问题的复杂性

如前面所述,干旱过程涉及到地球水循环的全过程。干旱问题即是多学科和多部门的复杂问题,又是一个社会服务需求很强的领域<sup>[118]</sup>,目前国际上还没有任何方法能够对干旱过程实现及时和准确地监测,尚缺少一个统一、有效的标准来描述整个干旱过程。而且,在干旱监测中,由于不同学科和部门关注的重点不同,监测的目标不尽相同,监测结果也有一定差距。这些问题均给遥感干旱监测技术带来困难。

卫星遥感干旱监测技术大多是利用遥感获得的植被和地表温度状况、热惯量等信息与地面监测指标建立定量或半定量的模型来间接监测干旱。遥感干旱监测模型的监测精度在很大程度上依赖地面干旱监测技术的进步,而地面干旱监测技术仍面临很大的挑战<sup>[2]</sup>。

(2) 遥感干旱监测定量化程度有待提高

目前遥感干旱监测技术是以半定量和经验方法为主,定量化程度不高。定量遥感是遥感研究与应用的前沿问题,是一门需要借助物理学的基础、数学的方法、计算机的手段以及地学、生物学的分析,去

解决对地遥感的科学理论和实际问题的综合性科学<sup>[119]</sup>。我们迫切需要加强遥感基础理论研究,以发展出更高精度、更定量的遥感模型应用于干旱监测。

(3) 卫星遥感数据问题

卫星遥感干旱应用技术离不开长期的、精确的、实时的遥感数据的支持,对数据质量和实时性要求很高。与地面站点数据管理和质量控制相比,卫星遥感数据管理不仅要海量数据储存、查询、调用等进行基础管理,在卫星数据质量控制方面(如高精度的定标和定位,坏数据剔除和丢失数据的插补)面临的问题更为复杂、技术要求更高,生成遥感干旱所需中间产品(如植被指数、地表温度、地表发射率等)还需要考虑大气状况、双向反射和卫星过境时间等因素的影响。进行干旱监测需要长时间序列气候遥感数据,NOAA/AVHRR 数据已经积累了 30 多 a 的数据能够满足气候研究时间长度的需求。但是,由于 AVHRR 传感器衰减、轨道漂移等问题严重,由 AVHRR 原始数据处理成长时间序列气候数据的过程复杂,工作量非常大。美国已经建立起覆盖北美的长时间序列 1 km 分辨率的 NOAA/AVHRR 气候遥感数据,在北美干旱监测研究和业务中发挥着重要作用。但是由于历史数据存储的问题,全球其他地区仅有 8 km 分辨率的数据,且不能实时更新,仅能用于科学研究。我国 1980 年代中期至 1990 年代初期,全国多部门在各地陆续建立了数十个 NOAA 卫星接收站,存储了大量 AVHRR 原始数据,需要对这些数据进行加工处理以生成覆盖中国的 AVHRR 气候数据集。中国科学院建立了 1991~2003 年中国陆地 1 km AVHRR 数据集<sup>[120]</sup>,国家卫星气象中心建立了中国 1 km 1989~2008 年 AVHRR 分辨率长时间序列数据,但在数据质量和业务应用方面还需开展大量的工作才满足气候研究和应用的需求<sup>[121]</sup>。

(4) 尺度问题

多时空尺度对地观测技术在为人类提供海量的、不同时空尺度遥感观测数据的同时,尺度问题也愈发突出。尺度问题不仅是制约遥感科学技术发展的关键核心问题,也是地学界普遍存在的关键科学问题<sup>[122]</sup>。遥感干旱监测技术面临的尺度问题主要表现在:1)不同时间和空间分辨率卫星遥感数据间的尺度问题。不同卫星传感器提供不同时间、空间和光谱尺度的数据,综合应用这些数据进行干旱监测时均存在尺度问题;2)卫星遥感与地面观测数据间的尺度问题。主要包括应用遥感数据建模和遥感

模型真实性检验时均涉及到尺度问题;遥感监测干旱与传统气象、农业、水文等点监测间的尺度问题;3)地表的空质异性增加了尺度问题的复杂性,如何解决复杂下垫面下卫星遥感的尺度问题。

#### (5) 多源干旱监测数据融合问题

干旱过程既然是一个由大气—土壤—植被—水文—经济社会不断传递和发展的过程,就需要对整个干旱过程进行综合、动态地监测,这涉及到如何将气象、农业、水文、卫星遥感干旱监测这些不同时、空尺度信息进行客观、定量地融合的问题。多源干旱监测数据融合不仅需要数学理论、计算机技术的支持,还需加入对干旱过程有深刻理解、经验丰富的专家的智慧,才能发展出有应用价值的技术。

### 2.2 面临的发展机遇

尽管卫星遥感干旱监测技术仍存在许多技术问题,但人类社会对干旱防灾减灾的需求和科学技术的进步也为遥感干旱监测技术的进步带来空前发展机遇。

#### (1) 国际社会对干旱的关注程度日益提高

在气候变化和人类社会迅速发展的背景下,干旱对全球经济、社会和环境可持续发展造成的威胁日益增大,已经引起国际社会的高度关注。近年来国际社会召开一系列干旱会议、建立多个应对干旱的组织、制定了多个干旱监测计划,正在努力推动建立集成遥感监测的全球干旱监测预警信息系统,以便积极应对可能发生的干旱,减轻干旱对国家社会经济的影响。这些举措为全球遥感干旱技术的发展创造良机<sup>[3,123]</sup>。

#### (2) 全球对地观测技术的发展

未来 10 a 全球对地观测技术将以前所未有的速度发展<sup>[124]</sup>,计划至 2030 全球将有 200 余颗对地观测卫星发射。这些卫星中既有能获取全球环境变化关键参数,为解决全球环境变化重大科学问题提供空间数据支持的全球变化科学卫星,也有由气象、资源、海洋、环境卫星等组成,实现对地球系统全天候、立体、连续的观测业务卫星。这些卫星观测将为解决遥感干旱监测技术中的关键参数反演问题提供数据支持,同时也为干旱遥感监测业务提供稳定的、实时的数据源,为防御干旱提供有力的科技支撑。

如 NASA 启动了将主、被动传感器相结合的 SMAP(Soil Moisture Active Passive, SMAP)计划。该项目拟利用 L 波段微波传感器对地表土壤水分和冻融状况进行有效监测,解决因土壤水分反演所需参数估算精度问题,在提高土壤水分反演精度的同时,提高土壤水分监测的空间分辨率。第一颗携带

一台辐射计和一台 L 频段合成孔径雷达的 SMAP 土壤湿度主被动卫星已经于 2015 年 1 月 31 日成功发射。

针对现有卫星传感器分辨率低、缺乏地表遥感反演所需关键环境参数的协同探测能力等问题,中国科学院研发的我国全球水循环观测(Water Cycle Observation Mission, WCOM)卫星已进入样机试验阶段。WCOM 计划通过对全球水循环系统开展多波段、多极化、主被动联合的高精度观测,实现对于水循环关键要素包括土壤水分、雪水当量、地表冻融、大气水汽和降雨等综合观测,在防洪抗旱、农业生产和水资源管理等领域提供重要科学依据,将解决我国遥感干旱技术中的许多关键技术问题。

我国新一代静止卫星 FY-4 号计划在 2016 年发射。FY-4 传感器通道达到 14 个,覆盖了可见光、近红外、短波红外、中红外和热红外,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 15 min,将在干旱监测中发挥重要作用。

#### (3) 计算机信息技术的进步

近 30 a 对地观测技术的迅猛发展很大程度上得益于计算机信息技术的进步。随着数字地球、云存储和云计算等技术的快速发展,将有效推进多源、多变量和多尺度遥感干旱数据的汇聚、管理、运算和决策分析,并在面向干旱过程和对社会经济影响过程的模型构建与定量分析中发挥重要作用。

## 3 我国卫星遥感干旱应用技术亟待加强的主要工作

我国开展卫星遥感干旱技术的研究和应用已经有近 30 a 的历史,中国科学院、各高校、气象局、农业部、水利部以及国土资源等多部门均开展干旱或与干旱相关联的工作,拥有一支庞大的遥感研究和应用队伍。但是与美国等发达国家相比,我国在卫星遥感干旱技术的实用性、普适性、可比性等方面还存在许多问题,在干旱监测和早期预警中发挥的作用有限。亟待加强的主要工作有以下几点。

(1) 建立干旱遥感长时间序列卫星遥感干旱气候数据库和干旱环境基础地理信息数据库

高质量的数据是开展干旱科学研究,进行干旱监测、预报预警和风险管理业务服务的前提条件。美国、欧洲等发达国家建立了完善的数据管理共享服务体系,极大地促进了干旱研究和应用服务的发展。美国干旱减灾的成就令世界瞩目,其中美国干旱减灾中心与美国农业部、美国商务部、美国大气和

海洋管理局(NOAA)、美国地质调查局共享的包括气象、水文、农业、卫星遥感、生态环境等多方面数据服务系统为干旱减灾工作提供了强有力的数据支撑。虽然中国科学院、中国气象局、农业部、水利部等多部门均开展卫星遥感干旱的研究和业务应用工作,各部门均根据各自的需求建立了卫星遥感干旱数据库,但在数据共享、数据质量和满足实时业务需求方面存在许多问题。我国亟待建立覆盖全国的、逐旬的多系列卫星长时间序列数据集,包括1 km分辨率的AVHRR、MODIS、FY VIRR和FY MERSI地表反射率、地表温度、植被指数、积雪、云等干旱相关产品,以及25 km分辨率的AMSR-E和MWRI土壤湿度产品。产品经过各种校正和真实性验证,并能进行实时追加,以满足干旱研究和实时业务应用的需求。同时建立包括土地利用、植被类型、农作物类型、数字高程(DEM)、土壤类型、灌溉状况等空间地理信息数据以及人口分布、干旱灾情、社会经济状况等数据的干旱环境信息数据库,为精确监测干旱提供基础信息。

#### (2) 制定卫星遥感干旱监测标准,规范干旱监测

我国各地遥感干旱监测研究和业务大都是通过建立卫星遥感干旱指数与地面观测数据(如土壤湿度)间统计模型进行,监测结果缺乏时空可比性,干旱等级的划分人为性也很大,缺少规范。这就会产生同一干旱过程不同单位监测结果不同;同一单位对不同的干旱过程监测因标准不同而无法进行比较等问题。因此,需要在对我国各地干旱特点进行深入研究的基础上,提出1~2个较适宜全国各地的遥感干旱指数,制定干旱监测标准。这不仅对规范干旱业务服务,而且对认识气候变化背景下我国干旱发生规律的科学研究均有重要意义。

同时,考虑到干旱发生的特征时空差异性,为满足区域干旱监测的需求,需要针对各地干旱特点,提出适合不同地区、不同时段遥感干旱监测方案,制定标准,并解决局地监测与全国监测有效的统一问题。

## 4 结 语

干旱是地球上的一种自然现象,人类从诞生起就受到干旱的困扰,防御干旱灾害是人类社会永恒的主题。由于干旱灾害给人类社会造成巨大的损失和影响,近百年来国际社会和科学界均在不断寻求有效防御干旱的途径。由于干旱的成因异常复杂,人类已经认识到从根本上弄清干旱发生的物理机

理,准确地预测干旱的发生在相当长的时间内是非常困难和不现实的,提高干旱监测和早期预警技术水平,进行科学有效的干旱风险管理才是有效地防御干旱的出路。

经过百余年的发展,以气象干旱监测为主的地面干旱监测技术相对比较成熟。卫星遥感为我们提供了时空间连续的对地观测数据,是对地面观测的有效补充。但卫星遥感干旱监测技术的发展仅有不到30 a的历程,仍属于正在发展的新兴技术,尚未发展成熟。对于干旱这种气候现象,卫星遥感数据积累的年代偏短,还不能完全满足气候研究的需要。目前,我们一方面需要针对遥感干旱技术的关键科学技术问题开展基础性和应用基础性研究,发展具有理论性更高、量化程度更好、普适性更好的监测模型;另一方面,应该针对国家、部门和社会防御干旱的需求,在现有基础上开发业务实用性好的干旱监测技术,为不同部门防御干旱提供有实用价值的监测产品。美国国家干旱减灾中心在干旱监测中的成功经验值得我们借鉴。

干旱的根源是降水减少,但仅用降水去评估干旱过程及其影响是远远不够的。干旱过程是一个由气象干旱向农业干旱等其他干旱不断传递和发展的过程,干旱是否能发展成干旱灾害不仅与气象状况有关,还与农作物生长阶段、灌溉状况等环境因素相关。因此,一个有效的干旱监测和早期预警技术必须考虑降水、土壤、植被、农业、水文、生态、经济和社会等多指标,并且这些指标要便于业务应用,其中卫星遥感和地理信息系统所起的作用非常重要。

致谢:感谢沙莎、胡蝶、王丽娟、王玮在文章成文过程中给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] WMO. Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management. Proceedings of an Expert Group Meeting. Lisbon, Portugal. 2000. 1-8.
- [2] 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[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- [3] Mannava V K Sivakumar, Robert Stefanski, Mohamed Bazza. High Level Meeting on National Drought Policy: Summary and Major Outcomes[J]. Weather and Climate Extremes, 2014(3): 126-132.
- [4] 王劲松,李耀辉,王润元,等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.
- [5] Brian D Wardlow, Martha C Anderson, James P Verdin. Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches[M]. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [6] 钱正安,吴统文,宋敏红. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究

- 进展及问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 28-38.
- [7] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] Tucker C J, Justice C O, Prince S D. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7: 1571-1581.
- [9] Tucker C J, Newcomb W W, Los S O, et al. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for Sahel 1981-1989[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12: 1133-1135.
- [10] 郭锐, 李栋梁, 蔡晓军, 等. 1995年中国西北东部特大干旱的气候诊断与卫星监测[J]. *干旱区地理*, 1997, 20(3): 69-74.
- [11] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平指数在1992年特大干旱监测中的应用[J]. *环境遥感*, 1994, 9(2): 106-112.
- [12] Anyamba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63: 596-614.
- [13] 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[J]. *遥感学报*, 2012, 16(4): 720-737.
- [14] 江东, 付晶莹, 庄大方. 2008-2009年中国北方干旱遥感动态监测[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3): 92-101.
- [15] Kogan F, Sullivan. Development of global drought watch system using NOAA/AVHRR data[J]. *Advances in Space Research*, 1993, 13: 219-222.
- [16] 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[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 81-88.
- [17] 闫娜娜. 基于多源数据的农田旱情遥感监测模型研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2012.
- [18] 管晓丹, 郭锐, 黄建平. 植被状态指数监测西北干旱的适用性分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(5): 1046-1053.
- [19] 郭锐, 管晓丹. 植被状况指数的改进及其在西北干旱监测中的应用[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(11): 1160-1168.
- [20] Liu H Q, Huete. A Feedback Based Modification of the NDVI to Minimize Canopy Background and Atmospheric Noise[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1995, 33: 457-465.
- [21] Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, et al. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94: 244-255.
- [22] Guo Ni, Wang Xiaoping. Comparison and Evaluation Between MODIS Vegetation Indices in Northwest China[A]. *IGARSS'2007, IEEE, International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, 2007.
- [23] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35: 161-173.
- [24] Huete A R, Tucker C J. Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12: 1223-1242.
- [25] Abduwasit Ghulam, Qin Qiming, Zhan Zhiming. Designing of the perpendicular drought index[J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [26] 朱琳, 刘健, 张晔萍, 等. FY-3A/MERSI数据在中国北方干旱监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2010, 14(5): 1004-1016.
- [27] Ghulam A, Qin Q, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(2): 150-164.
- [28] 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[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 18-23.
- [29] Gao B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 257-266.
- [30] Gu Y, Brown J F, Verdin J P, et al. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L06407, doi:10.1029/2006GL029127.
- [31] 张文江, 陆其峰, 高志强, 等. 基于水分距平指数的2006年四川盆地东部特大干旱遥感响应分析[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008, 38(2): 251-260.
- [32] Zhang Jinghua, Jiang Luguang, Feng Zhiming, et al. Detecting Effects of the Recent Drought on Vegetation in Southwestern China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 43-49.
- [33] Wang Xiaoping, Zhao Chuanyan, Guo Ni, et al. Determining the Canopy Water Stress for Spring Wheat by Using Canopy Hyperspectral Reflectance Data in Loess Plateau Semi-Arid Regions[J]. *Spectroscopy Letters*, 2015, 48(7): 492-498.
- [34] Rossi S, Weissteiner C, Laguardia G, et al. Potential of MERIS fAPAR for Drought Detection[A]. In *Proceedings of the Second MERIS/(A) ATSR User Workshop*[C]. ESA SP-666, eds. H Lacoste, Ouweh, Frascati. Italy: ESA Communication Production Office, 2008.
- [35] Gobron N, Pinty B, Melin F, et al. The state of vegetation in Europe following the 2003 drought[J]. *International Journal Remote Sensing Letters*, 2005, 26(9): 2013-2020.
- [36] Watson K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images[J]. *Remote Sens Environ*, 1971, 3: 2017-2041.
- [37] John C Price. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18: 59-73.
- [38] 马蔼乃. 遥感信息模型[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.
- [39] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1(1): 24-31.
- [40] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 以微分热惯量为基础的地表蒸散发全遥感信息模型及其在甘肃沙坡头地区的验证[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(12): 1041-1050.
- [41] 刘振华, 赵英时. 遥感热惯量反演表层土壤水的方法研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2006, 36(6): 552-558.
- [42] 张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用[J]. *科学通报*, 1991, 36(12): 924-927.
- [43] Kogan F N. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15: 91-100.
- [44] Kogan F. World Droughts in the New Millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices[J]. *Eos Trans of Amer Geophys*

- Union, 2002, 83(48):557-564.
- [45] Kogan F N. Global Drought Watch from Space[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78:621-636.
- [46] KARNIE LI, BAYASGALAN M, BAYARJARGAL Y. Comments on the use of the Vegetation Health Index over Mongolia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 37:2017-2024.
- [47] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sens Rev, 1994, 52:45-59.
- [48] 梁芸, 张峰, 韩涛. 利用 EOS/MODIS 植被供水指数监测庆阳地区的土壤湿度[J]. 干旱气象, 2007, 25(1):44-47.
- [49] 莫伟华, 王振会, 孙涵. 基于植被供水指数的农田干旱遥感监测研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3):396-401.
- [50] 杨秀海, 卓嘎, 罗布. 基于 MODIS 数据的青藏高原旱情监测研究[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2):527-534.
- [51] 孙丽, 王飞, 吴金. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J]. 农业工程学报, 2010(1):243-249.
- [52] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature—vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3):213-224.
- [53] 沙莎, 郭锐, 李耀辉, 等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J]. 干旱气象, 2014, 32(1):128-134.
- [54] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数 (TVDI) 进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7:420-427.
- [55] 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[J]. 中国水土保持科学, 2005, 32(2):32-36.
- [56] 王鹏新, WAN Zheng-ming, 龚健雅. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4):527-533.
- [57] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2):22-26.
- [58] 于敏, 高玉中, 张洪玲. 地表温度-植被指数特征空间干旱监测方法的改进[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):243-250.
- [59] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1205-1216.
- [60] Karnieli A, Agam N, Pinker R T, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations[J]. Journal of climate, 2010, 23:618-633.
- [61] Jackson R D, IDSO S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resource Research, 1981, 17:1133-1138.
- [62] Anderson M, Kustas W. Thermal Remote Sensing of Drought and Evapotranspiration[J]. Eos, 2008, 89(26):233-240.
- [63] 王介民, 刘绍民, 孙敏章, 等. ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象, 2005, 23(2):1-7.
- [64] 张书余. 干旱气象学[M]. 北京:气象出版社, 2008.
- [65] Bastiaanssen W G M, Menti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation[J]. J of Hydrology, 1998, 212-213:198-212.
- [66] Su Z. The Surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1):85-99.
- [67] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory[J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 1985, 111:839-855.
- [68] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature[J]. Agric For Meteorol, 1995, 77:263-293.
- [69] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing[J]. Remote Sens Environ, 1997, 60:195-216.
- [70] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. Effects of vegetation clumping on two-source model estimates of surface energy fluxes from an agricultural landscape during SMACEX[J]. J Hydrometeorol, 2005, 6:892-909.
- [71] 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[J]. Agron J, 2007, 99:240-254.
- [72] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U. S. based in thermal remote sensing: II Surface moisture climatology [J]. J Geophys Res, 2007, doi: 10.1029/2006JD007507.
- [73] 李召良, Stoll M P, 张仁华, 等. 利用 ATSR 数据分解土壤和植被温度的研究[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(增刊):27-38.
- [74] 刘雅妮, 武建军, 夏虹, 等. 地表蒸散遥感反演双层模型的研究方法综述[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1):65-71.
- [75] 陈云浩, 李小兵, 史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型[J]. 气象学报, 2002, 60(4):509-512.
- [76] 宋小宁, 赵英时. 改进的区域缺水遥感监测方法[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(2):188-194.
- [77] 刘振华, 赵英时, 李笑宇, 等. 基于蒸散发模型的定量遥感缺水指数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):114-120.
- [78] 李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5):481-498.
- [79] 刘绍民, 李小文, 施生锦, 等. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用[J]. 地球科学进展, 2010, 25(11):1113-1127.
- [80] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2012, 42(6):814-842.
- [81] Theon J S. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) [J]. Remote Sensing of Earths Surface and Atmosphere, 1993, 14(3):159-165.
- [82] Almazroui M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009[J]. Atmospheric Research, 2011, 99(3-4):400-414.
- [83] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114:2875-2887.
- [84] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM Multi satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Jour-



- nal of Hydrometeorology, 2007, 8(1):38-55.
- [85] Islam M N, Uyeda H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3):264-276.
- [86] Koo M S, Hong S Y, Kim J. An evaluation of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) multi-satellite precipitation analysis (TMPA) data over South Korea Asia-Pacific[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 45(3):265-282.
- [87] 毛江玉, 吴国雄. 基于 TRMM 卫星资料揭示的亚洲季风区夏季降水日变化[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2012, 42(4):564-576.
- [88] Naumann, Barbosa, Carrao, et al. Monitoring Drought Conditions and Their Uncertainties in Africa Using TRMM Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51:1867-1874.
- [89] 李景刚, 阮宏勋, 李纪人, 等. TRMM 降水数据在气象干旱监测中的应用研究[J]. 水文, 2010, 30(4):43-46.
- [90] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6):1103-1110.
- [91] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):121-126.
- [92] 陈洁. AMSR-E 土壤湿度产品在我国西北地区的精度验证[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2010.
- [93] 史小康, 文军, 王磊, 等. AMSR-E 卫星亮度温度数据在高原东北部土壤湿度观测和模拟中的应用[J]. 高原气象, 2010, 29(3):545-553.
- [94] 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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5):797-805.
- [95] 扈培信. FY-3B 微波成像仪数据质量评价与参数反演[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
- [96] 武胜利, 杨虎, 孙瑞静, 等. 风云三号卫星微波成像仪简介及应用状况分析[A]. 第三届微波遥感技术研讨会论文集[C]. 2012.
- [97] Pathe C, Wagner W, Sabel D, et al. Using ENVISAT ASAR Global Mode Data for Surface Soil Moisture Retrieval Over Oklahoma, USA[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2009, 47(2):468-480.
- [98] Holah N, Baghdadi N, Zribi M, et al. Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96:78-86.
- [99] Zribi M, Chahbi A, Shabou M, et al. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1):345-358.
- [100] 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[J]. 水科学进展, 2011, 22(1):59-67.
- [101] 王树果, 李新, 韩旭军, 等. 利用多时相 ASAR 数据反演黑河流域中游地表土壤水分[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5):582-590.
- [102] 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[J]. 干旱气象, 2014, 32(4):553-561.
- [103] Hutchinson J M S. Estimating Near-Surface Soil Moisture Using Active Microwave Satellite Imagery and Optical Sensor Inputs[J]. American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(2):225-236.
- [104] Mattar C, Wigneron J P, Sobrino J A, et al. A combined Optical-Microwave method to retrieve soil moisture over vegetated areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5):1404-1413.
- [105] 余凡, 赵英时. ASAR 和 TM 数据协同反演植被覆盖地表土壤水分的新方法[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2011, 41(4):532-540.
- [106] 鲍艳松, 刘良云, 王纪华. 综合利用光学、微波遥感数据反演土壤湿度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(3):228-233.
- [107] 张友静, 王军战, 鲍艳松. 多源遥感数据反演土壤水分方法[J]. 水科学进展, 2010, 21(3):222-228.
- [108] Jesslyn F Brown, Brian D Wardlow, Tsegaye Tadesse. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A New Integrated Approach for Monitoring Drought Stress in Vegetation[J]. GIScience and Remote Sensing, 2008, 45:16-46.
- [109] Zhang A, Jia G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134:12-23.
- [110] 杜灵通. 基于多源空间信息的干旱监测模型构建[D]. 南京:南京大学博士论文, 2013.
- [111] 周磊. 集成多源数据的干旱综合监测模型研究[D]. 北京:北京师范大学博士论文, 2011.
- [112] 许厚泽, 陆洋, 钟敏, 等. 卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2012, 42(6):843-853.
- [113] Morrow E, Mitrovica J X, Fotopoulos G. Water storage, net precipitation, and evapotranspiration in the Mackenzie River Basin from October 2002 to September 2009 inferred from GRACE satellite gravity data[J]. J Hydrometeorol, 2011, 12:467-473.
- [114] Rieser D, Kuhn M, Pail R, et al. Relation between GRACE-derived surface mass variations and precipitation over Australia[J]. Aust J Earth Sci, 2010, 57:887-900.
- [115] 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[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: B5404. DOI:10.1029/2008JB006056.
- [116] 曹艳萍, 南卓铜, 胡兴林. 利用 GRACE 重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3):680-689.
- [117] 许民, 叶柏生, 赵求东. 基于 GRACE 重力卫星数据的黄河源区实际蒸发量估算[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1):138-147.
- [118] 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[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1):80-91.
- [119] 李小文. 定量遥感的发展与创新[J]. 河南大学学报, 2005, 35(4):49-56.
- [120] 吴炳方, 刘成林, 张磊, 等. 中国陆地 1km AVHRR 数据集[J]. 遥感学报, 2004, 8(6):529-550.

- [121] 沙莎,郭锐,李耀辉,等. 三套 NDVI 长时间序列植被指数的对比——以玛曲为例[J]. 干旱气象,2013,31(4):657-665.
- [122] 李小文,王祎婷. 定量遥感尺度效应刍议[J]. 地理学报,2013,68(9):1163-1169.
- [123] 范锦龙,张明伟,曹广真,等. 全球干旱卫星监测计划[J]. 气象科技进展,2014,4(5):54-57.
- [124] 郭华东,傅文学,李新武,等. 全球变化科学卫星概念研究[J]. 中国科学(地球科学),2014,44(1):49-60.

## Advances and Developing Opportunities in Remote Sensing of Drought

GUO Ni, WANG Xiaoping

*(Institute of Arid Meteorology, CMA; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China)*

**Abstract:** Drought is a natural climate phenomenon occurring throughout the world, which is one of the most severe natural hazards that affects the society and brings the economic losses. In recent years, the global climate change and society development increased the degree of drought influence and risk, which brought a great threat to global agriculture, water resource, ecological environment security and the sustainable development of the society. Thus, to improve the drought monitoring and early warning technology level is the foundation to deal with drought and alleviate the drought vulnerability. Satellite remote sensing technology has made great progress in drought monitoring and plays an irreplaceable role in global drought monitoring and early warning with the development of the earth observation technology in recent thirty years. However, it is not enough to provide support for drought disaster prevention and mitigation, for the drought is a complex problem needed interdisciplinary study, and its spatial and temporal characteristics differences are greatly. In this paper, we reviewed and summarized the drought monitoring technology of satellite remote sensing, 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 direction should effort in view of the current situation of China's satellite remote sensing drought application.

**Key words:** drought; satellite, remote sensing; drought index; advances