

文章编号: 1672 3031(2009) 02 0105 07

# 国内外干旱遥感监测技术发展动态综述

路京选, 曲 伟, 付俊娥

(中国水利水电科学研究院 遥感技术应用中心, 北京 100048)

**摘要:** 干旱是我国影响范围最广和造成经济社会损失最为严重的一种自然灾害, 干旱缺水已成为制约我国可持续发展的一个瓶颈。及时发现干旱并准确预报旱情发展动态, 对抗旱减灾至关重要。本文在简述国内外遥感技术总体发展态势基础上, 从干旱监测的遥感数据源开始, 系统地总结了目前国内外干旱遥感监测的主要方法以及发展状况, 包括土壤含水量的遥感反演法、热惯量法、冠层温度法、植被指数法、微波遥感法等。提出了加强我国干旱遥感监测技术研究的建议, 以期推动我国干旱遥感监测的全面应用。

**关键词:** 干旱; 遥感; 监测; 土壤水分

中图分类号: S423; TP79

文献标识码: A

受特定的自然地理与气候条件所决定, 我国是世界上各种自然灾害频发且非常严重的国家之一, 其中以旱灾损失和影响最为严重。近些年来, 随着我国人口的不断增长和经济社会的快速发展, 干旱灾害日趋严重, 干旱发生的频率不断增强, 受旱的范围不断扩大, 局地性或区域性的干旱灾害几乎每年都会出现。干旱灾害已不只发生在贫水区, 丰水区的干旱灾害事件也频繁发生, 影响的范围也不仅仅是农业和农村, 城市和生态也日益受到干旱灾害的困扰, 城乡居民饮用水安全、粮食安全和生态环境安全受到严重威胁。

干旱现象相对于其他气象灾害更为复杂, 具有发展缓慢但影响范围广大的特点, 有气象干旱、水文干旱和农业干旱之分, 及时准确掌握干旱发生的程度与范围成为有效应对干旱灾害的前提。因此, 加强干旱灾害的监测与预测预报, 是增强抗旱工作主动性和提高防灾减灾能力的一个重要环节。遥感技术以其独有的宏观、快速、大范围、经济等优势, 从一开始就被应用于干旱监测中。近年来, 国内外在利用遥感手段监测大范围干旱灾害方面取得长足进展, 并相继实现了不同程度的业务化运行。本文在简单概述国内外遥感技术总体发展态势基础上, 从干旱监测的遥感数据源开始, 较为系统地总结了目前国内外干旱遥感监测的主要方法, 以期推动我国干旱遥感监测的全面应用。

## 1 国内外遥感技术总体发展态势

自上世纪初莱特兄弟发明人类历史上第一架飞机起, 航空遥感就开始了它在军事上的应用, 此后在地质、工程建设、地图制图、农业土地调查等方面得到了广泛应用。人造卫星把遥感技术推向了全面发展和广泛应用的崭新阶段, 从1972年第一颗地球资源卫星发射升空以来, 美国、法国、俄罗斯、欧空局、日本、印度、中国等国家和地区都相继发射了众多对地观测卫星。随着传感器技术、航空航天技术和数据通讯技术的不断发展, 现代遥感技术已经进入一个能动态、快速、多平台、多时相、高分辨率地提供对地观测数据的新阶段。光学传感器的发展进一步体现为高光谱分辨率和高空间分辨率特点, 光谱分辨率已达纳米级, 波段数已达数十甚至数百个, 目前的商用卫星空间分辨率已达分米级。为协调时间分辨率和空间分辨率这对矛盾, 各种小卫星群计划正在成为现代遥感的另一发展趋势, 例如可用6颗小卫星在2~3d内完成一次对地重复观测, 可获得优于1m的高分辨率影像。除此之外, 机载和车载遥感平台,

收稿日期: 2009-04-10

作者简介: 路京选(1961-), 男, 陕西人, 教授级高级工程师, 主要从事3S技术在水利上的应用研究。E-mail: lujx@iwhr.com

以及超低空无人机等多平台的遥感技术与卫星遥感相结合,使遥感应应用更加多样。

遥感技术与空间科学、电子科学、地球科学、计算机科学以及其他边缘学科交叉渗透、相互融合,已逐渐发展成为一门新型的地球空间信息科学。按遥感仪器所选用的波谱性质,遥感可分为电磁波遥感技术、声纳遥感技术、物理场(如重力和磁力场)遥感技术。电磁波遥感技术是利用各种物体/物质反射或发射出不同特性的电磁波进行遥感的,可分为可见光、红外、微波等遥感技术。按照感测目标的能源来源不同,遥感又可分为主动遥感技术和被动遥感技术两种。按照记录信息的表现形式,遥感还可分为图像方式和非图像方式两种。按照遥感器使用平台的不同,遥感一般又可分为航天、航空与地面遥感技术。按照遥感应应用领域的不同,遥感也可分为资源、环境、气象、海洋遥感技术等。

遥感技术已经在陆地水资源、土地资源、植被资源、地质、城市、海洋、测绘、考古、环境调查监测和规划管理等方面得到广泛应用。由于卫星遥感对自然界环境动态监测远较常规方法全面、仔细、精确,且能获得全球自然环境动态变化的大量数据与图像,对于研究区域性的水文过程,乃至全球性的水循环、水量平衡等重大水文课题更具有无可比拟的优越性。卫星遥感技术能提供长期的动态情报,帮助预报旱情、融雪径流和暴雨洪水,监测洪水动向,调查洪水泛滥范围以及受涝面积和受灾程度等。

地理信息系统和遥感是一对不可分割的姐妹技术。遥感一方面是地理信息系统中重要的信息源,另一方面遥感调查中需要利用地理信息系统中的数据(包括各种地图、地面实测数据、统计资料等)来改善遥感数据的分类精度和制图精度。地理信息系统是以地理空间数据库为基础,对与空间相关的数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示。以3S技术、数字流域技术、水信息学技术等为核心的现代信息技术已经成为水利现代化的重要标志和发展趋势,正在迅速而深远地影响和改变着相关专业人员的思维方式和模式,水利工作已经离不开这些现代信息技术的支持。

## 2 干旱遥感监测的主要卫星数据及其特点

旱情监测遥感数据源的选择主要是根据实用、经济和需求精度等因素而定。国内外应用最广的是NOAA卫星,目前在轨有3颗,空间分辨率大概在1km左右,地面重复观测周期为0.5d。该数据具有周期短、时间序列长、覆盖范围宽、时效性强、数据量小、后处理方便以及成本低等优点,缺点是空间分辨率与波谱分辨率低,而且受云层覆盖的影响较大。

EOS是美国新一代地球观测卫星,扫描宽度达2300km,已投入业务运行的Terra和Aqua两颗卫星分别于1999年底和2002年中发射。星上所搭载的中等分辨率成像光谱仪(MODIS)是其最有特色的仪器之一,其免费接收的数据获取政策更使人们能够容易得到空间分辨率250~1000m、时间分辨率0.5d和包括36个光谱通道的高光谱分辨率的卫星资料。基于MODIS资料,国内外许多科学家进行了干旱监测技术研究,并已取得大量成果。

主动微波遥感是利用合成孔径雷达(SAR)数据来反演土壤水分,在国内外越来越受到重视,所面临的主要问题是如何在模型中去除表面粗糙度的影响和在不同植被覆盖条件下建立土壤水分反演模型。被动微波遥感监测陆地表面土壤水分含量的算法相对来说历史更长,技术更为成熟。除了和主动微波遥感一样具有全天候和全天时的优势之外,被动微波遥感也不需要专门的能源装置,具有仪器比较简单、可运行在较高卫星轨道、受地表粗糙度和地形影响相对要小、重返周期短和适合大面积实时动态监测等优点。

AMSR-E是由日本国家空间发展局(NASDA)开发,于2002年5月4日由美国宇航局Aqua卫星搭载发射的。该传感器测量6.9~89GHz范围内6个频率的亮温,用微波辐射传递模型将地表地球物理变量和观测到的亮温联系起来,实现土壤水分的反演。AMSR-E以56km的空间分辨率观测土壤水分,提供25km格网的重采样产品,从2002年6月18日至今积累了大量的日观测数据。欧洲航天局计划于近期发射土壤湿度和海洋盐度卫星(SMOS),其有效载荷MIRAS将是历史上首次发射的星载综合孔径微波成像辐射计,采用干涉式成像技术,可实现土壤湿度的被动成像探测,地面(海面)分辨率达到30~50km,其L波段穿透植被的能力比以前的传感器更强,在反演植被覆盖地区的土壤水分方面具有更大的潜力。

光学遥感的图像覆盖范围相对较广,价格也较低,但是容易受到天气条件影响。微波遥感具有全天时和全天候的工作特征,但图像价格较高。此外,传感器的重访周期对农业旱灾的遥感监测应用也十分重要,较长的重访周期在一定程度上影响了农业旱灾监测中遥感数据源的选择。由于每天可以至少获得研究区上空的2次图像,NOAA-AVHRR和MODIS是当前最适合于农业旱灾遥感监测的卫星传感器。采用光学和微波遥感相结合以提高土壤水分反演精度和效率将是未来旱灾遥感监测的重要发展方向。

### 3 土壤含水量的遥感反演方法

土壤含水量的变化不仅导致土壤光谱反射特性的变化,同时导致植被出现不同程度的生理适应反应,从而使植被光谱特性发生变化。土壤含水量又是一个集成了很多地表水文气象特征的环境指标,是固体地表与大气之间的界面,它不仅能够在尺度上影响地气之间的相互作用,更能够在中小尺度上起重要作用,因此不仅成为干旱遥感监测的重要指标,也是气象学、水文学、土壤学、生态学等研究所关注的重要内容。

国外利用遥感技术监测土壤水分始于20世纪60年代末,先后开展了土壤水分与光谱反射率的关系以及微波土壤水分反演方法的研究。70年代以后,土壤水分遥感反演监测技术迅速发展,出现了地面、航空、航天等多平台以及可见光、近中远红外、热红外和微波等多波段相结合的局面。进入80年代后,遥感监测土壤水分与干旱的研究工作得到了全面而迅速的发展,监测方法包括热惯量模式、土壤水分光谱法、能量平衡法和微波遥感等。

与国外相比,我国对土壤水分遥感反演技术的研究起步相对较晚。从20世纪80年代中期开始,国内有学者首先从土壤水分对土壤反射光谱的影响开始进行了土壤水分遥感研究的前期工作。90年代以后,我国土壤水分遥感反演的理论和应用迅速发展,热惯量、地表温度、植被指数、后向散射系数、亮度温度等被用来作为指示因子建立了众多的土壤水分遥感反演模型<sup>[1,2]</sup>。

光学遥感反演土壤水分包括Gamma射线技术、可见光和近红外技术、热红外技术3种。Gamma射线技术的基础是利用潮湿地区和干旱地区天然陆地Gamma辐射量存在的差异,而可见光和近红外技术主要是通过测量地面对太阳辐射的反射来估计土壤含水量,在应用过程中都不是特别有效。热红外技术和微波技术比较常用,前者的基础是测量日温变化,后者的基础是测量土壤介电特性变化<sup>[3]</sup>,进而建立这些变化与土壤含水量的关系。

常见的热红外土壤水分反演方法包括热红外法、热惯量法以及温度植被指数法3种。热红外法利用昼夜或白天不同时间下垫面温度变化可间接反应土壤水分的原理,但只适用于裸土或者植被覆盖度低的地方。热惯量法目前比较常用,它认为土壤热惯量是土壤温度变化的一种内在因素,控制着土壤的温度日较差,可通过土壤温度日较差的遥感获取来反演土壤水分含量。

微波数据由于穿透能力强,可以在有植被遮蔽的地方进行测量,也可以在多云天气条件下进行测量,在监测土壤水分方面的应用广泛。研究表明,利用微波方法探测其波长1/4厚度的土壤含水量时效果比较好,波长越长,穿透能力越强,受植被覆盖度的影响也越小。波长21cm被认为是最适宜监测土壤水分的波段<sup>[4]</sup>。

近年来,随着遥感技术发展的不断深入,国内外开始利用高光谱遥感技术研究土壤水分和光谱间的规律以及寻找水分敏感波段,对于土壤光谱做了大量的研究,但在大面积土壤水分遥感反演应用上仍处于探索阶段。随着高光谱遥感理论技术的不断成熟,高光谱卫星系列计划的实现和应用的推广普及,高光谱土壤水分遥感反演技术的巨大应用潜力将会得到进一步的体现。

### 4 土壤水分遥感反演的热惯量法

热惯量是物质对温度变化热反应的一种量度,反映了物质与周围环境能量交换的能力。由于水的热惯量比土壤高,因此含水量较高的土壤昼夜温差较小。热惯量模型在遥感监测区域干旱中也得到了

广泛的应用,但一般只适用于裸土或植被覆盖度比较低的地区,所以有必要将热惯量和植被指数结合起来监测干旱,利用表观热惯量(ATI)和归一化植被指数(NDVI)建立NDVI-ATI空间,计算表观热惯量植被干旱指数(AVDI)。齐述华等人利用MODIS数据建立的温度植被干旱指数(TVDI)在应用于大区域干旱监测中取得了很好的效果,并建立了温差植被干旱指数(DTVDI)<sup>[5]</sup>。

Watson等人最早应用了土壤热惯量模型<sup>[6]</sup>,但模型参数难以直接利用遥感手段获取,Price根据地表热量平衡方程和热传导方程对模式进行了改进,简化了潜热通量蒸发形式,并引入了一个综合描述土壤辐射率与比湿及温度等气象要素的地表参量,同时还根据能量平衡方程提出了表观热惯量法<sup>[7]</sup>。目前,热惯量法研究中常用表观热惯量代替热惯量,研究重点包括热惯量模式的解析表达式、热惯量与土壤水分的统计模型以及温度植被指数法。

## 5 干旱遥感监测的冠层温度法

以冠层温度为基础建立作物缺水指标的研究始于20世纪70年代初。蒸散作用与能量和土壤水分含量关系密切,能量较高和土壤水分供给充足时蒸散作用也较强,冠层温度则处于较低状态。Idso等人以能量平衡原理为基础,提出用作物缺水指数(CWSI)来反映植物蒸腾与最大可能蒸腾的比值<sup>[8]</sup>。在较均一的环境下可以把CWSI与平均日蒸发量相关联,作为植物根层土壤水分状况的估算指标。蒸发蒸腾越小,CWSI越大,供水能力越差,土壤越干旱。用NOAA/AVHRR可得到热红外温度 $T_s$ ,它与日蒸散量有简单的线性关系。而用热红外温度又可以计算出日平均温度,并进而计算出蒸散发能力 $E_{T0}$ ,从而作出旱情分级。针对CWSI仅适合于植被覆盖度高地区的不足,Jackson等人用冠层能量平衡的单层模型,将植被与土壤看为一个整体,对Idso提出的冠层气温差上限方程和下限方程进行了理论解释,并基于能量平衡的阻抗模式提出了涉及诸多气象因素的理论模式<sup>[9]</sup>。David提出农田蒸散的双层模型,把地表覆盖分为植被层和土壤层,在能量和温度上有所区分,引入植被覆盖度变量,实现了对部分植被覆盖地区旱情的监测<sup>[10]</sup>。Moran等人对双层模型法加以改进,提出植被指数温度梯形理论(VIT)<sup>[11]</sup>。Su等人根据以上原理,考虑变化因子是植被根区的相对蒸发量,提出DSI指数,实验结果表明与降水量的多少一致<sup>[12]</sup>。在作物生长季节,DSI越高说明降水越不足,植被根区的相对含水量也越少。

植被蒸腾状态与土壤水分供给之间存在密切关系。Kondoh & Kishi使用修正的土壤调整植被指数(MSAVI)代替归一化植被指数,形成 $T_s$ /MSAVI指数,然后与降水指数(API)比较,发现其在时空分布上有较好的一致性<sup>[13]</sup>。Kogan通过实验得出用植被条件指数(VCI)与温度条件指数(TCI)的比值能更好的监测植被长势和土壤水状况的结论<sup>[14]</sup>。Sandholt & Andersen对上述模型进行了修正,利用温度植被指数(TVDI)监测大范围的土壤水分状况,但对半干旱地区的地表覆被类型不敏感<sup>[15]</sup>。计算中涉及的两个参数在干旱季节需要不断与水文模型进行比较进行修正,同时它还需要考虑云层的影响。Li等人认为对于植被密集地区,传统的TVDI方法过分地夸大了干旱的程度,为此建立蒸发植被干旱指数模型(EVDI)对其进行改进,实验显示监测结果与TVDI比较精度更高<sup>[16]</sup>。

## 6 干旱遥感监测的植被指数法

干旱直接影响到作物生物量的积累、叶面积指数及覆盖度的增长,因此可根据植物的光谱反射特性进行波段组合,求得各种植被指数,由此实现对土壤旱情的监测。常见的有归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、距平植被指数(AMTNDVI)等,其中NDVI应用最广泛,它相对于比值和差值植被指数来说对不同视角及大气条件不敏感。研究表明,NDVI能够相当准确地反映大范围内的土地覆被和宏观监测降水状况。作物缺水指数法利用地面热平衡原理,在植被覆盖度较高的地区应用效果明显,常见的CWSI是基于作物在潜在蒸发条件下冠层温度与空气温度差和空气饱和水汽压差具有线性关系提出来的。

Nagesware指出,遥感数据如果与地面温度、降水量以及作物生长期等相结合,实时监测结果将会更

为理想<sup>[17]</sup>。Kogan 认为,气候状况、土壤类型质地、植被类型分布以及地形条件都会影响 NDVI 值,高海拔地区的 NDVI 值相对较高,考虑地形地貌因素以及气象因子变化会使监测结果更加准确<sup>[14]</sup>。Peters 等人用基于 NDVI 的标准化植被指数(SVI)进行干旱监测,用 12 年的 NOAA 图像得到研究区各个时期的 NDVI 平均值,再用当前图像植被指数与标准植被指数的偏差来建立与干旱状态的关系。

## 7 土壤水分监测的微波遥感法

20 世纪 70 年代初,国外一些学者开始利用地面试验和航空微波遥感资料,研究亮温与土壤水分的关系。目前主要的土壤水分反演方法有基于统计手段的反演算法、基于正向模型的和基于神经网络的反演算法 3 种。Koike 等人提出了土壤湿度指数(ISW)概念<sup>[19]</sup>, Bindlish 在积分模型基础上将实测土壤水分与雷达获取数据的相关系数由 0.84 提高到 0.95<sup>[20]</sup>。Moeremans & Dautrebande 利用卫星雷达监测田间和区域两个不同尺度的土壤含水量,认为裸地或植被稀疏地区的近地表土壤含水量与后向散射系数有很高的相关性<sup>[21]</sup>。Zribi 用 C 波段结合一种新的经验模型进行了研究<sup>[22]</sup>, Frate & Schiavon 利用由微波遥感获得的比辐射率经过两个隐藏层的 BP 神经网络模型的训练得到土壤含水量<sup>[23]</sup>。

主动微波数据因分辨率高而越来越受到重视,但由于受地表粗糙度和植被覆盖影响,研究重点是如何去除地表粗糙度对后向散射的影响。针对这种情况,李震等人提出了一种综合主动和被动微波数据的土壤水分变化监测方法,通过一个半经验公式计算体散射项,综合时间序列的主动和被动微波数据来消除植被覆盖影响,计算结果和实测值一致<sup>[24]</sup>。相比主动微波雷达,被动微波辐射计具有监测面积大、受粗糙度影响小,对土壤水分更为敏感,算法更为成熟的优势,重访周期短,能够进行大面积实时动态监测。

由于利用微波遥感监测土壤水分的理论基础是土壤和水的介电常数的巨大差异,而测量的土壤含水量是空气、土壤和水 3 种介质相互作用的结果,因此有一些研究将目光集中在介电常数的研究上,建立了不同的混合介电常数算法<sup>[25]</sup>,以线性权重公式较为常见。施建成等人提出一种目标分解技术,利用协方差矩阵的特征值和特征向量将极化雷达后向散射测量值分解为单向散射、双向散射和交叉极化散射 3 个分量,并建立一阶物理离散散射模型,建立了土壤水分估算的方法<sup>[26]</sup>。

## 8 基于遥感的干旱监测运行系统

20 世纪末,美国国家干旱减灾中心、海洋大气局、农业部合作建立了新的干旱监测业务产品。该系统由监测干旱状况及影响的图形和文字组成,是根据相当丰富的信息综合而成的产品,每周进行旱情监测,提供全国旱情信息,并在网上发布。美国国家海洋大气局的国家环境卫星数据和信息中心利用多年积累的全球 NOAA 资料,采用 VCI 和 TCI 方法进行全球性的干旱和预报,并进行作物的估产,为美国农业部和商务部提供信息。

加拿大利用 NOAA/AVHRR 资料的可见光和红外波段获得植被指数,进行正常气候条件下农作物产量与干旱条件下农作物产量的比较评估。英国则利用卫星 SMMR 与 AVHRR 数据比较进行研究,在旱情监测技术上得出了较好的结果,并在撒哈拉地区进行了实验,同时也采用 NOAA/AVHRR 的可见光波段反射率和 SMMR 的极化差方法进行旱情监测。日本为了研究大区域的土壤水分分布状况,利用 NOAA 卫星资料,采用热惯量模式,结合近地层小气候和地面热通量观测,以中国东北部的吉林省为中心进行了区域土壤水分调查,取得了良好的效果。

国际水管理研究所(IWMI)建立了包括印度西部、巴基斯坦和阿富汗在内的南亚干旱遥感监测系统。这个近实时的干旱监测与报告系统最初使用的是 AVHRR 数据,现在改用 MODIS 遥感数据,每 8d 或 16d 发布一次 500m 空间分辨率的监测结果。

## 9 结论及建议

国内外干旱遥感监测技术正在从实验研究逐步走向实用。国内相关单位近年来相继建立了基于遥感的干旱监测业务化运行系统,但面向抗旱减灾业务的遥感干旱监测业务化系统在水利行业尚未真正建立起来。目前,国家气候中心利用降雨资料每 10d 发布一次全国旱情信息,国家卫星气象中心利用气象卫星遥感图像每旬监测一次全国干旱状况,国家气象中心利用地面土壤含水量观测资料每 5d 发布一次旱情状况。中国水科院遥感中心也在黑龙江省建立了全国第一个基于遥感的土壤墒情监测及预报业务化系统。不难看出,我国在这方面也取得了可喜的成果,大大缩短了与国外同类研究的差距。但干旱现象非常复杂,涉及水文、气象生物生理、水资源管理以及经济社会等多方面影响因素,需要综合考虑多种指标,因此建立一个有效的干旱遥感监测与预报系统具有很大的挑战性。为不断提高我国遥感技术应用研究的水平,推动干旱遥感监测的全面业务化,作者建议重点在 4 个方面加强应用研究:(1) 解决技术实用化问题,开发建设面向国家防办抗旱管理的全国旱情遥感监测业务化系统;(2) 积极开展新型遥感数据源在干旱监测中的应用研究,尤其是研究我国环境减灾小卫星数据的应用;(3) 围绕旱情遥感监测与预报,积极开展基于卫星降水数据的应用研究;(4) 继续加强土壤水分的微波遥感反演技术研究,不断推动其从方法研究向实用化过渡。就建立面向全国范围业务化服务的旱情遥感监测与早期预警系统而言,充分利用各种可以方便获得的多源遥感数据并使用多种干旱指标将非常重要,建立在这些数据与指标基础上的时间系列分析将使干旱监测更加有效。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法[J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 89- 99.
- [ 2 ] 隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 220- 224.
- [ 3 ] Schultz G A, Engman E T. Remote sensing in hydrology and water management[M]. Springer, 1 edition, 2000.
- [ 4 ] Schmugge T J, Kustas W P. Remote sensing in hydrology[J]. Advances in Water Resources, 2002, (25): 1367- 1385.
- [ 5 ] 齐述华, 李贵才, 等. 利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 56- 61.
- [ 6 ] Watson K, Rowen L C, Officeld T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images[J]. Remote Sens Environ, 1971, (3): 2017- 2041.
- [ 7 ] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sens Environ, 1985, 18(1): 59.
- [ 8 ] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J, et al. Normalizing the stress degree day for environmental variability[J]. Agricultural Meteorology, 1981, (24): 45- 55.
- [ 9 ] Jackson R D, Kustas W P, et al. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988, (9): 309 - 317.
- [ 10 ] David L B J. Constrained two layer models for estimating evapotranspiration[ ]. 11th Asia conference on Remote sensing, Zhongshan University, Guangzhou, China, 16- 19 Nov 1990.
- [ 11 ] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, Vidal A. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(2): 246- 263.
- [ 12 ] Su Z, Yacob A, Wen J, et al. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China plain[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, (28): 89 - 101.
- [ 13 ] Kondoh A, Kishi S. The use of multi temporal NOAA/ AVHRR data to monitor surface moisture status in the Huaihe River basin, China[J]. Advances in Space Research, 1998, 22(05): 645- 654.
- [ 14 ] Kogan F. Global drought and flood- watch from NOAA polar orbiting satellites[J]. Advances in Space Research, 1998,

- 21(03): 477– 480.
- [15] Sandholt I, 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: 213– 224.
- [16] Li H, Lei Y, Li Z, Mao R. Calculating regional drought indices using evapotranspiration(ET) distribution derived from Landsat7 ETM+ data. SPIE Conference on Remote Sensing & Modeling of Ecosystems for Sustainability II, 2– 3 August 2005, San Diego, CA(US).
- [17] Nageswara V J. Satellite remote sensing in disaster management, in *Natural Resource Management*[M]. Karale, R. L. NNRMS Pub., Bangalore, India, 1992.
- [18] Peters A J, et al. Drought monitoring with NDVI based standardized vegetation index[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, (68): 71– 75.
- [19] Koike T, Fujii H, Ohta T, Togashi E. Development and validation of TMI algorithms for soil moisture and snow[J]. *Remote Sensing & Hydrology 2000, Proc. of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000*: 390– 393.
- [20] Bindlish R. Parameterization of vegetation backscatter in radar based, soil moisture estimation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(01): 130– 137.
- [21] Moeremans B, Dautrebande S. Soil moisture evaluation by means of multi temporal ERS SAR PRI images and interferometric coherence[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234: 162– 169.
- [22] Zribi M. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from G band radar data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 84: 42– 52.
- [23] Frate D, Schiavon G. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural networks [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 174– 183.
- [24] 李震, 郭华东, 等. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化[J]. *遥感学报*, 2002, 6(6): 481– 484.
- [25] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, El-Rayes M A. Microwave dielectric behavior of wet soil, dielectric mixing models[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, (GE- 23): 35– 46.
- [26] 施建成, 李震, 李新武, 等. 目标分解技术在植被覆盖条件下土壤水分计算中的应用[J]. *遥感学报*, 2002, 6(6): 412– 413.

## Review on drought monitoring using remote sensing

LU Jing-xuan, QU Wei, FU Jun-e

(China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Drought is one of the major natural disasters which causes very severe impacts on economy and society in China and has become a bottleneck to sustainable development in the country. It is critical important to detect large area drought events timely and provide accurate early warnings for drought relief. Starting with a brief introduction to the general development of remote sensing technology home and abroad, this article provides with an overall summary of the current status on remote sensing for drought monitoring and remote sensing data sources availability. Several main drought monitoring methods under use are discussed, such as thermal inertia method, canopy temperature method, vegetation index method, microwave remote sensing method, etc. Some recommendations on improving drought monitoring using remote sensing are put forward. This review article would be of help to facilitate the real operation of drought monitoring using remote sensing in China.

**Key words:** drought; remote sensing; monitoring; soil water

(责任编辑: 吕斌秀)