

· 技术方法 ·

我国农业干旱遥感监测的现状与展望^{*}

王利民, 刘 佳, 邓 辉, 李丹丹, 张 莉

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要 该文在回顾遥感监测土壤水分研究进展的基础上, 对当前使用较多的旱情监测方法, 如热惯量法、植被供水指数法、距平植被指数法、作物蒸散及微波监测等方法的应用范围进行了比较分析, 并对我国土壤水分遥感监测现状、发展前景、业务化能力等发展趋势进行了分析和展望, 认为数据处理能力、算法精度和结果验证以及旱情评价体系的建立是我国当前旱情监测中急需解决的问题。

关键词 中国 农业干旱 遥感监测 现状与展望

干旱是一定地区近地面生态系统水分不足时的一种自然现象, 普遍地存在于世界各地, 频繁地发生于各个历史时期, 使干旱成为农业生产中最严重的自然灾害。长周期的干旱变化在全球形成了不同类型的干旱区, 短周期干旱变化往往给现有农业生态系统带来突发性灾难, 大规模的干旱往往可以使大范围的农业长期绝收, 频繁的干旱迫使人们大量地投入农业资源, 提高了农业成本。干旱的威胁不仅存在于干旱和半干旱气候区, 在湿润和半湿润地区也是主要的自然灾害之一。

我国绝大部分地区属于季风气候区, 降水量的季节波动与年际变化非常显著, 空间分布也很不均匀, 干旱发生频率较大, 在各类气候灾害之中, 对粮食产量的影响也最大。新中国成立 50 年来, 我国年均受旱面积在 2 000 万 hm^2 左右, 占全国耕地总面积的 20% 左右, 其中成灾面积超过 800 万 hm^2 , 因干旱造成的粮食减产平均每年达 1 000 万 t。20 世纪 80 年代以来, 我国旱灾呈加重趋势, 1986~1995 年的 10 年间, 有 5 年发生了严重干旱, 平均每年因旱灾损失粮食 2 000 万 t。

一、土壤水分遥感研究的背景与现状

传统的干旱监测方法, 主要是根据旱情监测站点测定土壤水分含量来监测土壤水分。经典的土壤水分测量方法主要有称重法、中子水分探测法、快速烘干法、电阻法、TDR 法 (时域反射) 等, 采样速度慢、花费人力物力大、范围有限, 难以满足实时、大范围监测的需要。

自 20 世纪 70 年代开始有地球观测卫星进入稳定、连续业务运行后, 国内外就有人尝试从地面遥感、航空遥感和卫星遥感等不同的层次, 使用可见、近中远红外、微波 (L, C, X) 等遥感波段, 通过地区蒸发估计、作物表面温度、土壤热容量、土壤水分含量、干旱条件、植物水分胁迫及叶片含水量等监测方法, 对作物生长的土壤含水状况、作物缺水或供水状况、植被指数等指标所反映的作物生长状况的分析, 间接或直接地对作物旱情进行研究。大致可分为 3 个发展阶段。

第一阶段, 20 世纪 60 年代末至 70 年代, 是土壤水分遥感监测开创性试验研究阶段。这一阶段的研究主要侧重于反射率^[1-2]、亮度温度^[3]对土壤湿度变化的响应, 现在广为应用的土壤热惯量^[4]就是在这个时候提出并得到成功应用的。这些研究主要是利用航空相片及地面测量为主进行的, 涉及了电磁谱段的可见及热红外波段, 为土壤水分遥感监测研究奠定了理论基础。

第二阶段, 进入 20 世纪 80 年代, 土壤水分遥感研究从实验测量走向遥感数据的实际应用, 涉及了地面、航空及卫星遥感三个高度。由于 LandSat 卫星及 TIROS 卫星投入业务运行, LandSat/MSS, TM,

收稿日期: 2007-06-12 王利民、刘佳为副研究员 邓辉、李丹丹、张莉为助理研究员

^{*} 该文得到中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“雷达数据旱情遥感监测业务运行机制研究”项目的支持。

NOAA/AVHRR 数据得到广泛应用^[5-6]。主要内容是在以反射率、亮度温度与土壤水分关系的研究的基础上,进一步发展了热惯量、蒸散模型^[7-10],系统地阐述了热惯量方法的机理,并提出了表观热惯量的概念,利用卫星热红外辐射温度差计算热惯量,然后估算土壤水分。在这一时期,微波遥感土壤水分的实验研究也开始得到发展,探讨了后向散射系数与目标物的形态和物理特征的关系,发展了一些算法^[11-12]。

我国就是在这—时期开展土壤水分研究的,与国外刚起步时相似,也是先进行土壤参数的遥感测定研究,所用方法也基本参照国外同类研究进行的^[13-16],这些内容基本上反映了我国土壤热惯量模式研究方面所取得的进展与真实水平,标志着我国在土壤水分遥感监测领域的进步。

第三阶段,20世纪90年代以来,土壤水分遥感监测得到了全面发展。在遥感手段上,由于一系列带有微波传感器的卫星(如ERS系列、RadarSat、EnviSat)发射成功,极大地推动了微波遥感土壤湿度的研究^[17-20],一些经验、半经验及理论的模式被建立并不断被改进,证明了微波遥感区域应用的可能性。气象卫星遥感也日益受到重视,基于作物能量平衡原理之上,并与热惯量、作物缺水指数方法相结合,日益完善了土壤水分监测研究^[21-22]。

该阶段,我国在土壤水分遥感监测理论方面得到了深入,大大缩短了与国外同类研究的差异。在监测尺度上,从一个地区、到一个国家、乃至全球;在方法上,由个例分析到统计应用,再到模拟模式。在我国农业遥感应用领域,国家遥感中心农业应用部自1999年开始,利用NOAA/AVHRR资料将我国农业旱情监测纳入业务运行系统,目前该系统利用EOS/MODIS数据进行农业旱情旬报。土壤水分遥感监测在生产实际上的应用越来越受到重视,和其他灾害监测一样,正在由试验研究向实用化、产业化迈进。

二、遥感监测土壤水分的方法及评价

根据使用光谱段的差异,遥感技术监测土壤水分的方法可分为可见-近红外、热红外和微波遥感。目前使用较多方法有热惯量法、归一化植被指数距平法、植被供水指数法、作物缺水指数法及微波法等。

(一) 热惯量法

土壤热惯量是土壤热特性的综合量度,它是引起土壤表层温度变化的内在因素之一,影响着土壤温度日较差,与土壤含水量密切相关。

为计算方便,一般使用Price提出的表观热惯量(P_{AT})的概念,表达式为:

$$P_{AT} = \frac{2SV(1-ABE)C_1}{\sqrt{\omega}(T_{max}-T_{min})} = \frac{2Q(1-ABE)}{\Delta T}$$

式中, S 为太阳常数, V 为大气透明度, Q 为总太阳辐射通量, ABE 为地表全波段反照率, C_1 为太阳赤纬和经纬的函数, ω 为地球自转频率, T_{max} 与 T_{min} 与分别代表地表最高与最低温度。

不同类型、不同深度的土壤含水量与相应的热惯量之间呈现极显著的相关性,常用线性经验公式计算土壤水分,即: $W=a \cdot P_{AT}+b$ 。

在植被盖度比较大时,遥感得到的信息是土壤和植被的混合信息,掩盖了土壤本身的热特性,使监测精度降低。该模型主要适用于裸露的土壤或作物前期生长,并要求有12小时内的昼夜两次星下点无云卫星资料作支持。

(二) 植被供水指数法

定义为归一化植被指数与叶面温度的比值。表达式为: $VSWI=NDVI/T_s$, $NDVI=(CH_2-CH_1)/(CH_2+CH_1)$ 。其中, T_s 为植被冠层温度, $NDVI$ 为归一化植被指数, CH_2 与 CH_1 为近红外与红外波段地表反射率。供水指数越小,旱情越严重,植被供水指数法仅适用于植被覆盖度高的地区。其次,由于土壤水分含量与作物缺水指数的关系取决于土壤的物理参数以及作物的生理特点,所以,植物叶片气孔的关闭、土壤含水量的滞后效应,光照及作物种类都是该方法准确性的影响因素。第三,不同时期、不同地区的供水指数与土壤含水量的关系,不具有普遍意义,必须积累长期的遥感资料进行对比。

(三) 作物蒸散模型

定义为作物(或裸地)实际蒸发量与作物(或裸地)潜在蒸发能力的比值,基本原理都是从能量平衡

方程出发计算实际蒸散,与理想状态下的作物潜在蒸发能力相比,在实际应用中常表达为与 1 的差值,即缺水指数 (CWSI)。

能量平衡方程表达式为: $R_n = \lambda E + G + H$

式中: R_n 为净辐射值, λ 为汽化潜热, E 为蒸发量, G 为土壤热通量, H 为感热通量。

以 SEBAL 模型计算为例,各参数估计公式如下:

$$R_n = (1-\alpha) S_{in} + (L_{in} + L_{out}) - (1-\epsilon) L_{in}$$

$$G = f(NDVI, R_n)$$

$$H = \rho_a c_p (T_1 - T_2) / r_{ah}$$

S_{in} 入射短波辐射、 L_{in} 入射长波辐射、 L_{out} 射出长波辐射、 α 为反照率、 ϵ 为地表比辐射率、NDVI 为归一化植被指数、 ρ_a 为空气密度、 c_p 为空气比热; $(T_1 - T_2)$ 为地面 z_1 与 z_2 处高度的温度差,可由地表温度 T_s 获得; r_{ah} 为空气动力学阻抗,可由地面摩擦速度、 z_1 、 z_2 处观测风速获得。

CWSI 与作物水分利用有效层的关系更为密切,更能有效反映作物干旱程度,在有植被覆盖的条件下,作物缺水指数法精度要高于热惯量法,但一些要素依赖于地面气象台站,在监测范围较大时模型参数获取得不到保证。

(四) 归一化植被指数距平法

一般情况下,从影响作物生长因子的角度考虑,光照、温度条件变化不大时,水分供应量成为作物生长的关键因素,水分充足供应,植被生长良好,反之植被生长受到影响。此方法是通过多年遥感资料,计算出常年平均植被指数,然后由当年植被指数与常年平均值比较,依此判断当年作物生长状况,进而对作物受旱程度作出判断。

计算监测时段的 NDVI 和多年相应时段 NDVI 均值,公式如下:

$$NDVI_{\text{监测年份}} = \text{MAX}(NDVI)$$

$$NDVI_{\text{多年均值}} = \text{MAXN}(NAVI_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

计算 NDVI 的差值 D_{ndvi} , 公式如下:

$$D_{ndvi} = NDVI_{\text{监测年份}} - NDVI_{\text{多年均值}}$$

该方法需要建立比较好的能代表正常年景的植被指数集,但卫星资料的存档时间不够长,以及资料的定标问题,正常年景数据集不易获得都是该法应用的限制因子。其次,旱、涝的影响都是负向的,因此单纯从植被指数的出发并不能准确判断干旱。第三,在农作物生长季节,该法可靠性较高,但在非生长季节,由于植被指数与土壤含水量相关性下降,该方法的可靠性就会降低。

(五) 微波遥感法

土壤含水量的多少直接影响土壤的介电特性,目标物的介电特性是决定微波发射率的主要原因,因而雷达回波对土壤湿度极为敏感,这是利用微波遥感测定土壤水分的理论基础。后向散射系数与介电常数有很好的关系,但它与表面粗糙度的统计特性有关;当土壤含水量一定时,不同的表面粗糙度对后向散射系数与入射角间的关系有一定影响。微波遥感分为主动微波遥感与被动微波遥感两种,前者所需发射功率较大,后者存在空间分辨率低、影响因素多的缺点;二者受植被影响有明显的差异,利用这一点可以剔除植被的影响而获取土壤水分信息。

从目前的研究来看,该方法虽然精度较高,且不受云雾的影响,具有全天候的特点,但如何将土壤含水量的影响因子和其他的影响区分开、提取准确的反演模型仍然是制约微波遥感应用的主要因素。

三、影响土壤水分遥感监测的原因分析

土壤水分遥感是在地表温度、地表反射率、植被指数反演基础上,结合地表特征,或从能量平衡原理出发、或从作物生理过程出发估计地表水分,是一项综合性的地表参数反演研究。由于土壤水分是影响作物产量最主要的因子之一,同时由于区域性、时效性问题的提出,不仅使农业生态系统中土壤水分及干旱监测显得迫切与重要,也使监测研究变的更为复杂。总的来讲,在当前旱情遥感监测中存在以下几个方面

的因素,制约着区域旱情遥感监测的精度的进一步提高。

1. 数据源的保证与替代问题。农业干旱是一个与时间有关的函数,一般情况下,暂时的土壤水分亏缺并不能造成作物旱情的发生,只有较长持续时间的作物缺水才能造成作物干旱,连续的土壤水分监测是分析干旱程度的主要保证。当前用于区域旱情监测的卫星数据多是 EOS/MODIS, NOAA/AVHRR 这类中低分辨率的数据,重访周期在 2~3 天左右,考虑云污染、设备故障等因素造成的数据不足、缺失、质量低下等问题,我国北方地区数据获取频率平均在 4 天左右,南方地区数据获取还要长些。单一卫星的遥感数据的获取频率一直是困扰旱情遥感监测的主要问题,发展多源卫星数据融合技术、多源卫星数据尺度转换技术、多源卫星数据反射率校正和标准化技术以及单源卫星数据时间序列插补技术,研究数据缺失情况下的多源遥感信息相互替代方法与方案,是解决这类问题比较有效的手段之一。

2. 不同作物覆盖条件下监测方法的选择问题。研究表明,热惯量模型适合于裸土或作物发育早期土壤水分监测、而植被供水指数模型适合于作物发育中后期盖度较高的时期,这两类模型本质上都是机理性的,但由于需要建立土壤水分与模型结果的相关关系,而不是直接反映的土壤水分。因此与蒸散模型相比,机理性相对弱些,同时蒸散模型理论上适合于从作物发育早期到作物发育后期的不同作物生育期。

我国幅员辽阔,自然条件多变,各地区土壤、作物、气候类型等存在巨大的差异,土壤的热惯量、作物供水指数、蒸发散强度差别很大,不同地区、不同土壤类型、不同作物种类间这些参数间所代表的干旱程度可比性比较差,甚至没有可比性。为提高遥感监测的准确性,一方面以植被分区为基础,考虑目标作物不同生育期、关键需水期的土壤水分状况基础上,以作物类别等作物类型指标,土层含水量、相对土壤湿度、降水蒸发等气候指标,土壤质地与田间持水量等土壤指标建立分区指标集,并在此基础上通过适当的综合,建立全国土壤墒情遥感监测分区;另一方面,针对不同的旱情遥感分区,筛选满足不同作物发育时段的监测方案与方法,建立旱情分级标准,是保证区域旱情监测精度的主要条件。

3. 土壤水分与作物旱情精度验证的方法。目前国内外土壤水分或旱情遥感反演精度评价主要是利用单点星地同步数据,通过直接相关、机理模拟两种方法验证卫星监测数据的准确性,多尺度、多时相、多源数据的不确定性研究和精度评价研究更比较少见,也较少涉及区域尺度的不同验证体系方面的精度评价研究。

显然,一方面完善不同作物区域的地面土壤墒情观测站点的布设,改进单点尺度验证方式;另一方面,建立地面“点”状数据与遥感“面”状数据有效转换及精度验证的技术方法体系,是目前墒情遥感监测业务精度验证的主要致力方向。

4. 墒情遥感监测模型的进一步的优化与改进。现有的模型具有一般性的理论普适意义。对不同的传感器,其反演算法是不同的;对不同的区域,模型的参数是不同;对不同物候期,模型的适用范围也是不同。因此,模型的优化包括区域尺度模型的选择与优化,也包括模型本身的优化与选择。

参考文献

- 1 Bowers S A, Hunka R J. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 1965, 100(2): 130~138
- 2 Curran P J. The use of polarized panchromatic and false color infrared film in the monitoring of soil surface moisture. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(3): 249~266
- 3 Bartholic J E, Namken L N, Wiegand C L. Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and crop canopies differing in water stress. *Agronomy Journal*, 1972, 64: 603~608
- 4 Waston K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, 3: 2017~2041
- 5 Robinove C J, Chavez P S. Arid land monitoring using Landsat albedo difference image. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11(2): 133~156
- 6 Everitt J H, Escobar D E. Using multispectral videl imagery for detecting soil surface condition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(4): 467~471
- 7 Price J C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation. *Water Resources Re-*

- search, 1980, 16(4):787~795
- 8 Price J C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales. *Journal of Application meteorology*, 1982, 21:1111~1122
 - 9 Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: The Limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18:59~73
 - 10 Carlsorn T N. Regional Scale Estimates of Surface Luoisture Availability and Thermal Inertia Using Remote Thermal Measurements. *Remote Sens Environ*, 1986, 1:197~247
 - 11 Shutko A. Microwave radio mietry of lands under natural and artifical moistening. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20:18~26
 - 12 Tsang L, Kong J. Wave theory for microwave remote sensing of a half space random medium with three dimentional variations. *Radio Science*, 1979, 14:359~369
 - 13 朱永豪, 邓仁达, 卢亚, 等. 不同温度条件下黄棕壤光谱反射率的变化生气勃勃征及其遥感意义. *土壤学报*, 1984, 21(2):194
 - 14 徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特性研究及其应用. *土壤学进展*, 1987, 15(1):1
 - 15 黄杨, 杨习荣, 耿淮滨. 土壤含水量与其微波反射特性关系的研究. *环境遥感*, 1986, 1(2):101
 - 16 张仁华. 土壤水分的热惯量模型及其应用. *科学通报*, 1991, 36(12):924
 - 17 Jackson R D. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13:187~208
 - 18 Pampaloni P, Chiarantini L, Coppo P, et al. Sampling depth of soil moisture content by radiometric measurements at 21cm wavelength: Some experimental results. *International of Remote Sensing*, 1990, 11:1 085~1 092
 - 19 Ulaby F, Sarabandi K, Whitt M, et al. Michigan microwave canopy scattering model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11 (7):1 223~1 253
 - 20 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探. *遥感技术与应用*. 1995, 10(4):1~8
 - 21 Hall F G. Satellite Remote Sensing of Surface Energy Balance: Success, Failure, and Unsolved Issues in FIFE. *J Geophy Res*, 1992, 97:19061~19089
 - 22 Vining R G. Estimation of Sensible Heat Flux from Remotely Sensed Canopy Temperature. *J Geophy Res*, 1992, 97:18951~18959

PRESENT STATUS AND PROSPECT OF REMOTE SENSING SUPERVISION AND TEST FOR ARID AGRICULTURE IN CHINA

Wang Limin, Liu Jia, Deng Hui, Li Dandan, Zhang Li

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, The Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract On the basis of reviewing the research progress on inspecting soil moisture by remote sensing, this paper compares the application scopes of many commonly used drought ravage testing methods, such as heat inertia method, vegetation water supply index method, vegetation index method, crop vaporization and micro-wave testing method, etc. It also analyzes the present status, development prospect and operation ability etc. development tendency of soil moisture remote sensing and inspection in China. The paper deems that the most urgent issue for solving the problems in present drought ravage inspection and test are data processing ability, arithmetic accuracy, result validation and establishment of a system for evaluating drought ravage.

Keywords China; arid agriculture; remote sensing and supervision; present status and prospect