

遥感监测土壤水分研究综述*

汪 潇 张增祥 赵晓丽 谭文彬

(中国科学院遥感应用研究所,北京 100101)

摘 要 对于近年来国内外遥感监测土壤水分的理论、方法的发展和进行了全面的回顾,重点介绍了目前已经比较成熟和广泛应用的基于可见光与热红外波段的特征空间方法和微波遥感方法。并对各种遥感监测土壤水分方法的优缺点作出评价,提出了遥感监测土壤水分方法存在的不足,指出了今后发展的方向,并展望了遥感监测土壤水分的发展前景。

关键词 土壤水分;光学遥感;微波遥感

中图分类号 S152.7

文献标识码 A

土壤水分是监控土地退化和干旱的重要指标,同时也是气候、水文、生态和农业系统的关键组成要素。监测土壤水分的变化对于规划和管理这些系统来说具有极其重要的意义。传统的监测方法大多都是野外实地的实验点的观测,最古老且最准确的方法就是质量法,这样能得出精确的土壤水分的质量百分比^[1],但是要消耗大量的时间和人力。利用土壤水分不同其相应的导电性能也不不同的特点发展起来的嵌入式传感器测量法^[2],能够节省大量的时间和劳力,但是依旧是实验点上的监测而不能推广到大区域上。所有这些传统田间监测手段可以准确估测土壤剖面的含水量,但是却都具有相同的缺点,不仅费时、费力,而且测点少,代表性差,从而导致时间空间分辨率低下,无法大范围、高效率地获得土壤水分数据,从而不能实现大面积土壤水分的实时动态监测^[3]。

相对于传统手段而言,利用遥感手段监测和反演土壤水分具有相当大的优势。其方法和理论依据就是建立在遥感参数和土壤水分之间的相互关系上,通过记录土壤反射特定波段的发射率或者土壤的发射率来迅速地分析和获取土壤水分数据。遥感手段还能解决传统方法不能很好解决的土壤水分的空间分布和时间变化制图。与传统的土壤水分监测方法相比,飞速发展的遥感技术手段监测土壤水分具有许多不可替代的优势,包括快速、实时、长时期动态大区域监测以及良好的时间空间分辨率。因此利用遥感手段已成为监测大区域范围内土壤水分时

空分布和变化的主要方法。

通常土壤水分的遥感监测主要从可见光-近红外、热红外及微波波段进行,土壤水分的红外波段遥感和微波遥感是当前研究的主要热点。一般热红外波段所感测的是地表温度和植被指数,通过植物的蒸散作用所带来的辐射平衡和热惯量,从而估算表面层以下的土壤水分。微波遥感监测土壤水分是现在应用比较成功的,具有广泛的应用前景。而在太阳光谱范围(380~500 nm)的光谱反射信息也能够用于估算土壤表层水分^[4]。

1 遥感监测方法的发展与现状

1.1 可见光、近红外与热红外波段遥感

遥感方法监测土壤水分的可行性研究在 20 世纪 60 年代初期就已经开始了,而应用研究也相应地在 70 年代中期开展起来。其中,Waston 等^[5,6]就尝试利用热惯量模型,而 Bijleveld^[7]则继续了他们的工作,建立了计算热惯量和每日蒸发量模型。Pratt 等^[8]提出了绘制土壤水分和地理图的热惯量方法,Jackson 等^[9]根据热量平衡原理提出了作物缺水指数(CWSI)。而在 20 世纪 80 年代,随着地基、机载、星载遥感的迅速发展与普及,遥感监测土壤水分方法也得到了迅速发展,遥感波段有可见光、近、中、远红外,热红外波段等微波遥感波段,许多遥感数据也相继被使用,比如 TM 数据和 NOAA/AVHRR 数据。20 世纪 90 年代中后期,随着 NOAA/AVHRR 和

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-334)资助

作者简介:汪 潇(1980~),男,博士研究生,主要从事国土资源与生态环境遥感研究。E-mail:wshaw@263.net

收稿日期:2005-10-20;收到修改稿日期:2006-06-12

MODIS 数据的普遍应用,光学和热红外波段的遥感反演方法也日趋成熟。目前,国外有学者结合可见光、近红外与热红外的信息,使用归一化植被指数 (NDVI) 和陆地表面温度 (LST),构建 NDVFLST 空间来反演土壤水分。

国内开展土壤水分遥感监测实验研究比国外大约晚 10 年以上,大体上从 20 世纪 80 年代中期才开始起步。在使用可见光/近红外与热红外波段监测土壤水分的遥感模型及其应用方面,国内发展迅速,而且工作重点体现在利用 NOAA/AVHRR 以及 MODIS 数据进行土壤水分或干旱的宏观监测以及实际应用研究^[10~12]。徐彬彬^[13~15]在宁芜试验场做了大量的土壤水分研究的开创性工作,研究了土壤水分对土壤反射光谱的影响,进行了土壤水分遥感的前期光谱研究工作,发现土壤含水量的增加,会降低光谱反射率,特别是在红及红外波段。张仁华^[16]提出了一个考虑地表显热通量及潜热通量的热惯量模式;隋洪智等^[17]通过简化能量平衡方程,直接使用卫星资料推算出一个被称为表观热惯量 (ATI) 的量,并以此量与土壤水分建立关系式来监测旱灾;肖乾广等^[18]从土壤的热性质出发,在求解热传导方程的基础上引入了“遥感土壤水分最大信息层”的概念,并以此理论建立了多实相的综合土壤湿度统计模型;辛景峰等^[19]利用 NOAA-AVHRR 数据集,研究了土壤湿度与地表温度/植被指数的斜率的定量关系;齐述华等^[20]利用水分亏缺指数 (WDI) 进行了全国旱情监测研究;张振华等^[21]利用较为成熟的作物缺水指数方法对于冬小麦田的土壤含水量进行了估算。

1.2 微波遥感

在被动微波遥感领域,20 世纪 70 年代初,美国国家航空航天局 (NASA) 在亚历山大农田进行了航空微波辐射计飞行试验,同步观测了 0~15 cm 的土壤湿度,并对试验数据进行了分析,发现亮度温度与土壤湿度 (质量百分比) 具有较好的线性相关。随着卫星微波遥感数据的有效利用,一些研究者建立了降雨指数 API 和微波极化差异指数 (Microwave Polarization Difference Index) 等土壤湿度指示因子与土壤亮度温度之间的线性关系。Njoku 等^[22]基于辐射传输方程,建立亮度温度与土壤湿度等参数的非线性方程,然后用迭代法和最小二乘法解非线性方程求出土壤湿度。而最终美国 Njoku 的算法成为 AMSR/E 土壤水分反演的标准算法。

在主动微波遥感领域,合成孔径雷达 (SAR) 已

成为国际对地观测领域最重要的前沿技术之一。目前利用多频、多极化/全极化雷达数据反演裸露地表土壤水分的经验和半经验模型主要有 Oh 模型、Do-hoson 模型和 Shi 模型,这些是针对裸露地表条件建立的,但同时这些模型也是用于稀疏到中等密度的地表植被覆盖条件。目前被普遍接受和使用的为密歇根大学微波实验室发展的基于辐射传输方程的 MIMICS 模型^[23]。

为了更好地研究和探索土壤水分分布非均质性对于陆地-大气能量流通的影响,以及微波遥感在观测和反演土壤水分中的作用,美国国家航空航天局 (NASA)、美国国家海洋及大气局 (NOAA) 以及美国国家科学基金会 (NSF) 等组织于 2002 年 6 月至 7 月,在美国爱荷华州开展了 2002 年土壤水分实验 (2002 Soil Moisture Experiment, SMEX02)^[24]。该项实验就是为了解决对地观测卫星高级微波扫描辐射计 (AMSR-E) 的亮度温度与土壤水分之间的相关关系,并且在有植被覆盖条件下检验现有的主动与被动雷达土壤水分反演模型。SMEX02 主要涉及到土壤和植被微波发射和散射模型的发展、土壤水分与植被反演算法,并且确定大区域范围内航空与航天遥感反演土壤水分和植被的测量方法。2003 年和 2004 年又分别开展了相似的实验 SMEX03、SMEX04^[25]。

国内在使用微波监测土壤水分方面仍处于探索阶段。李杏朝等^[26]根据微波后向散射系数法,用 X 波段散射计测量土壤后向散射系数,与同步获取的 X 波段、HH 极化的机载 SAR 图像一起,进行了一次用微波遥感监测土壤水分的试验,监测相对误差率仅 12%。高峰等^[27]简要分析了主动微波遥感土壤湿度的研究进展。李震等^[28]研究建立了一个半经验公式模型,用来计算体散射项,综合时间序列的主动和被动微波数据,消除植被覆盖的影响,估算地表土壤水分变化状况。杨虎等^[29]利用多时相 Radarsat ScanSAR 雷达后向散射系数图像繁衍得到了地表土壤水分变化模式信息。周凌云等^[30]使用了时域反射仪 (TDR) 方法利用电磁波的传播速度来测量土壤水分。

2 主要方法原理与模型

2.1 热惯量模型

土壤热惯量是土壤的一种热性质,也是土壤温度变化的一种内在因素。土壤热惯量与土壤水分含量具有相当紧密地联系,并且控制着土壤的温度日

较差。而土壤温度日较差能够从遥感数据中获得,特别是 NOAA/ AVHRR 和 MODIS 数据。因此利用土壤热惯量来反演土壤水分便具有理论的基础。但是由于必须要获得土壤表面温度,因此该方法一般用于裸土区域或者是植被覆盖较低区域。热惯量可以由下式表示:

$$P = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (1)$$

式中, P 为热惯量, λ 为热传导率, ρ 为土壤密度, c 为比热。Price 在简化了潜热蒸发形式后给出了 P 的一个近似解如下:

$$P = 2SV(1 - \alpha) C_1 / \sqrt{\omega} (T_1 - T_2) - 0.9 \sqrt{\omega} \quad (2)$$

式中, S 为太阳常数; V 为大气透明度; α 为地表反照率; C_1 为太阳赤纬和经纬度的函数; ω 为地球自转频率; ω 为地表综合参数,是土壤辐射率和比湿等参数的函数; T_1 与 T_2 分别为地表最高、最低温度。

在实际应用中,通常使用表观热惯量(Apparent Thermal Inertia,ATI)来代替热惯量。Price^[31]提出了表现热惯量,其表达式为:

$$ATI = \frac{1 - A}{T_d - T_n} \quad (3)$$

式中, T_d 和 T_n 分别为昼夜温度, A 为全波段反射率。

England 等^[32]最近还提出了辐射亮度热惯量(Radio Brightness Thermal Inertia,即 RTI)的概念,且认为 RTI 对土壤水分的敏感性要好于 ATI。

随着研究的更深入的发展,其他热惯量模型也陆续地被提出,以用来修正上述模型。Xue 和 Cracknell^[33]就提出了一个称为 SoA-TI 的模型,在这个模型中,热惯量 P 被定义为:

$$P = \frac{(1 - A) S_0 C_1}{T \sqrt{\lambda}} \left\{ \frac{A_1 [\cos(\theta_2 - \phi_1) - \cos(\theta_1 - \phi_1)]}{\sqrt{1 + \frac{1}{b} + \frac{1}{2b^2}}} + \frac{A_2 [\cos(\theta_2 - \phi_2) - \cos(\theta_1 - \phi_2)]}{\sqrt{2 + \frac{\sqrt{2}}{b} + \frac{1}{2b^2}}} \right\} \quad (4)$$

其中, t_1 、 t_2 分别为卫星昼夜过境时间。在式(4)的基础上,继续提出了热惯量与土壤水分之间的相关关系式:

$$P = \left\{ \begin{aligned} &2.1 ds^{[1.2 - 0.02(ds/d)]} \\ &e^{[l - 0.007(wds/d - 20)^2]} + ds^{[0.8 + 0.02(ds/d)w]} \end{aligned} \right\}^{1/2} \times (0.2w/d) ds^2 / 0.001 \sqrt{100} \quad (5)$$

式中, ds 为土壤密度, w 为土壤水分质量百分比。

在得出相应的热惯量以后,即可通过经验公式得出土壤水分数据:

$$W = a \cdot P + b \quad (6)$$

式中, a 和 b 分别为经验参数,且经验公式也可以是非线性的幂函数或指数函数。

2.2 特征空间模型

特征空间方法是一种基于经验参数化的方法,建立在一些遥感参数,例如地表温度(LST)、归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)等参数的相互关系基础上的。由 LST 和 NDVI 或其他遥感参数建立的特征空间,并由特征空间计算出的干旱指数能够替代土壤水分数据来分析干旱程度和土壤水分程度。

国内外学者研究了各种空间尺度和时间分辨率的地表温度和植被指数的关系,发现 LST 和 NDVI 之间存在明显的负相关关系。Price^[34]研究发现,如果研究取得植被覆盖和土壤湿度的变化范围较大,则以遥感资料获得的 NDVI 和 LST 为纵横坐标的散点图呈三角形;而 Moran 等^[35]从理论的角度分析,认为地表温度与植被指数的散点图呈梯形的关系。

目前应用较为广泛的是简化的温度植被干旱指数(Temperature-NDVI Dryness Index, TVDI)^[36, 37],通过分析 LST/NDVI 特征空间来计算获得干旱指数。

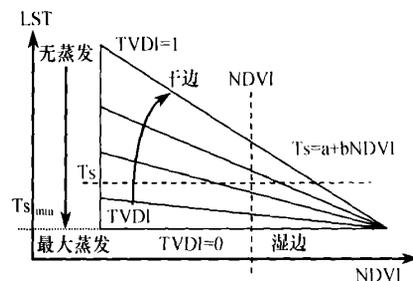


图 1 LST/NDVI 特征空间

Fig. 1 Feature space built on LST and NDVI

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \cdot NDVI)}{(a_1 + b_1 \cdot NDVI) - (a_2 + b_2 \cdot NDVI)} \quad (7)$$

其中,参数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 通过特征空间回归获得。 $a_2 + b_2 \times NDVI$ 是图 1 中 LST、NDVI 组成的三角特征空间的最低温度,决定了整个空间的湿边, T_s 为一特定像元的地表温度。而 $T_{smax} = a_1 + b_1 \times NDVI$ 决定着空间的最大温度^[36]。通过计算出 TVDI 指

数,类似于热惯量方法,利用一定的经验公式便可以获得反演的土壤水分数据。

温度植被干旱指数是目前可见光和热红外波段遥感监测土壤水分理论相对成熟,应用比较广泛的一种方法。因为该模型不仅具备良好的精度,并且简单易行,容易实现,更重要的是能够尽可能少用地面实测资料,尽可能多的从遥感影像上提取所需要的信息。

温度干旱指数特种空间方法,由于需要利用归一化植被指数,因此适用区域与热惯量方法正好形成互补。干旱指数方法在植被覆盖度较高的区域具有相对好的反演效果,对应 NDVI 在 0.15 ~ 0.85 区间之内。目前国内土壤水分遥感已经形成了一个共识,即裸土、低植被覆盖区域使用热惯量方法,高植被区域使用特征空间模型方法。

2.3 微波遥感模型

热惯量和特征空间方法都是基于可见光和热红外波段,但是微波波段却对土壤水分更加敏感。土壤的介电特性与土壤含水量密切相关,水分的介电常数约为 80,干土仅为 3,其间存在较大的反差。土壤的介电常数随土壤湿度的变化而变化,表现于卫星遥感图像上将是灰度值 G 亮度温度 T_b 的变化。另外微波遥感不受光照条件限制,能够全天候工作,特别是长波段微波能够穿透植被并对土壤具有一定的穿透能力。许多试验都证实了使用雷达手段来监测土壤水分状况具有非常好的灵敏度,这些特点使得利用微波遥感研究土壤湿度较其他波段遥感更具优势。

目前有两种基本的微波遥感测量方法,一个是采用成像雷达的主动微波方法,一个是用基于微波辐射计的被动微波方法。

2.3.1 主动雷达遥感 不同含水量的土壤介电特性不同,其雷达回波信号也不同,据此可建立后向散射系数与土壤水分含量的关系。裸露表面土壤后向散射系数可表示为与介电特性与表面粗糙度状态有关的公式:

$$\sigma_{pp}(\theta) = a(\theta) \times \sigma_0^{b(\theta)} \quad (8)$$

其中,下标 pp 表示雷达极化状态, θ 为雷达的入射角, σ_0 表示通常入射条件下的反射系数,它仅与介电常数有关,而与极化状态和入射角无关,系数 a 与粗糙度 S_R 有关。因此通过反演出土壤水分反射系数 σ_0 ,便可以依据统计方法,通过实验数据的相关分析建立土壤湿度与后向散射系数之间的经验函数

关系。李震等^[28]给出的经验函数关系式为:

$$\sigma_0 = -0.231 - 2m^{0.6874} \quad (9)$$

式中, m 为土壤水分。

主动微波遥感估算土壤水分主要受地表粗糙度 $a(\theta)$ 和植被覆盖 (NDVI) 的影响。因此近年来许多主动雷达遥感反演土壤水分的都是着重在去除地表粗糙度对于后向散射系数的影响,以及将 NDVI 加权分配融入雷达数据。

2.3.2 被动微波遥感 被动微波遥感是监测土壤含水量最有效的手段之一。与红外与可见光相比,它具有波长长、穿透能力强的优势;与主动微波雷达相比,被动微波辐射计具有监测面积大、周期短、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。

土壤湿度是影响被动微波辐射测量的关键因子,因此被动微波遥感土壤湿度的最终目的是利用微波辐射计测得的亮度温度反演土壤湿度。相对于主动雷达遥感,被动微波反演土壤湿度的研究开展的较早,其算法种类较多也更加成熟。Schmugge^[38]建议,在土壤湿度遥感监测中,应以被动遥感监测法为主,以热红外遥感和主动微波遥感法辅之,可以取得较好的效果。

早期的被动微波反演土壤水分的研究 (1978 ~ 1987) 年主要使用 Nimbus-7 卫星携带的扫描式多通道微波辐射计 SMMR 提供的微波亮温数据, SMMR 于 1987 年停止运行,目前研究经常使用的是美国国防气象卫星计划 DMSP 系列卫星上的微波辐射计特别传感器 SMM/I 提供的数据。继 SMMR、SSM/I 之后, AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) 和 AMSR-E 将承担起全球的被动微波遥感监测任务。我国也在已发射的神舟 4 号飞船上搭载了多模态微波传感器,其中的微波辐射模态的最低频率为 6.6 GHz,可以用来反演土壤水分,类似的传感器还会出现在我国计划发射的风云 3 号以及海洋 2 号卫星上面。

利用 AMSR 提供的微波遥感数据可以反演很多陆面参数,其中土壤湿度的卫星反演成为 AMSR 的主要目标之一。目前,围绕 AMSR 和 AMSR-E 的算法研究和验证工作,候选的土壤湿度反演算法有 3 个,分别是:美国 Njoku 的算法^[39]、Jackson 的算法^[40] 和日本 Koike 的算法^[41]。

3 各方法的优缺点比较

国内许多土壤水分监测和干旱监测都是采用建

立在能量平衡原理基础上的热惯量法以及以 LST/NDVI 空间为基础的特征空间方法。但是,这两种方法存在着很大的不足。热惯量模型多用于裸地以及低植被覆盖的区域,并且对于遥感卫星的过境时间有着较为严格的要求,需要白天及夜晚两次过境从而获得昼夜地表温度,由于许多通用的卫星数据不能达到这种要求,因此限制了热惯量模型的应用。

特征空间指数方法具有很强的适用性,在实际应用中使用得也较为广泛,但该方法也存在着缺陷。最重要的问题就是计算出的指数与真实土壤水分之间的转换。目前的研究中主要利用实测土壤水分数据来进行回归,但是回归相关系数不高,可信度差。而且该方法存在不同时间、不同区域的特征空间指数不可对比分析的问题。

微波遥感土壤水分虽然经过近 30 年的发展,但是如何消除植被覆盖以及地表粗糙度对反演土壤水分的影响依然是当前的一个研究热点和难点。同时由于其应用的广泛性及卫星反演算法实用化的难度,发展实用的基于全球尺度的土壤水分反演算法,目前还很困难。

4 结 语

1) 在可见光、近红外与热红外波段,建立在能量平衡原理基础上的热惯量法和 LST/NDVI 特征空间方法为代表的遥感监测土壤水分理论已经非常成熟,众多的模型和方法已经使用在实际的农业与环境应用当中。

2) 对于可见光与近红外波段,土壤水分遥感反演所采用的波段已基本确定,利用这些波段合成的各种效果较好的土壤水分遥感监测指数,为进一步提高土壤水分监测精度提高了可能性。同时高光谱数据由于能够以很高的光谱分辨率在光谱区域内连续地取样,故其能够提供几乎整个波段的辐射信息。由于土壤和植被在不同的波段具有不同的光谱特征,不同波段可以提供不同影响因素的信息,因此利用高光谱波段信息,多种数据融合,各波段获得的信息互补,可以提高土壤水分的监测精度,这是今后土壤水分遥感反演研究的趋势。

3) 使用微波监测土壤水分是目前研究的重点。微波波段由于其独特的特性,以及土壤水分和介电常数密切相关,将不断提高监测土壤水分的精度,是未来土壤水分遥感监测发展的方向。在这方面欧美国家已经做了许多实验与研究,已取得了许多成果。

4) 目前而言,无论国内还是国外,完全脱离野外观察和实测数据来反演土壤水分是不可能成功的。所有的方法都是通过一些指标,例如植被指数、亮度温度等,来间接评价土壤水分,因此最终都要通过实测的土壤水分数据进行回归和反演。如何摆脱实测数据的支持,将光谱反射率、红外温度或亮度值等遥感数据通过一定的模型与土壤水分建立起关系,从而达到仅仅依靠遥感数据来获得真实土壤水分百分比含量也是今后土壤水分遥感反演研究的一个重点内容。

5) 相对于传统的定点监测方法,遥感在监测土壤水分方面具有相当多的优势,随着遥感技术的不断发展,以及相应的遥感模型不断的完善,遥感监测土壤水分在实际应用中具有广阔的前景。

参 考 文 献

- [1] Foody G.M. Soil moisture content ground data for remote sensing investigation of agriculture region. *Int. J. Remote Sensing*, 1991, 12(7): 1461 ~ 1469
- [2] Cassel D K, Klute A. Water potential: Tensiometry. In: Klute A. ed. *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods*. Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986
- [3] 陈怀亮,毛留喜,冯定原. 遥感监测土壤水分的理论、方法及研究进展. *遥感技术与应用*, 1999, 14(2): 55 ~ 65. Chen HL, Mao L X, Feng D Y. A review: Theories, methods and development on soil moisture monitoring by remote sensing (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(2): 55 ~ 65
- [4] 刘伟东,Frédéric B,张兵,等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. *土壤学报*, 2004, 41(5): 700 ~ 706. Liu W D, Frédéric B, Zhang B, et al. Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 700 ~ 706
- [5] 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
- [6] Waston K, Bohn H A. Thermal inertia mapping from satellite discrimination of geology unit in Oman. *J. Res. Geol. Suvr.*, 1974, 2(2): 147 ~ 158
- [7] Bijleveld R A. 'Tell Us' a combined surface temperature, soil moisture and evaporation mapping approach. Paper Presented at 12th Int. Symp. on Rem. Sens. of Env. Manila, Philippines, 1978. 20 ~ 25
- [8] Pratt A, Elyett C D. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 151 ~ 168
- [9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 1981, 17(1): 133 ~ 138
- [10] 郭广猛,赵冰茹. 使用 MODIS 数据监测土壤湿度. *土壤*,

- 2004, 36(2) :219 ~ 221. Guo GM, Zhao B R. Monitoring soil moisture content with MODIS data (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(2) : 219 ~ 221
- [11] 陈怀亮,冯定原,邹春辉. 麦田土壤水分 NOAA/ AVHRR 遥感监测方法研究. *遥感技术与应用*, 1998, 13(4) : 27 ~ 35. Chen H L, Feng D Y, Zou C H. The study of method on monitoring soil moisture in wheat field by NOAA/ AVHRR data (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(4) : 27 ~ 35
- [12] Liu D S, Wang Z S. A modelling study of potential evapotranspiration and the estimation of Chinese soil moisture regimes. *Pedosphere*, 1996, 6(3) : 193 ~ 200
- [13] 徐彬彬. 土壤光谱反射特性与理化性状的相关分析. 见: 徐彬彬. 编. 宁夏土壤遥感研究专辑. 北京: 科学出版社, 1987. 66 ~ 76. Xu B B. Correlation analysis of soil spectral reflection characteristic and physical chemistry characteristic. In: Xu B B. ed. *Ning-Wu Soil Remote Sensing Researches Special* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987. 66 ~ 76
- [14] 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究. *环境遥感*, 1991, 6(1) : 61 ~ 71. Xu B B. Research of China's soil spectral line (In Chinese). *Remote Sensing of Environment China*, 1991, 6(1) : 61 ~ 71
- [15] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. *土壤*, 2000, 32(6) : 281 ~ 287. Xu B B. Reflected spectrum research of soil section (In Chinese). *Soils*, 2000, 32(6) : 281 ~ 287
- [16] 张仁华. 改进的热惯量模式及遥感土壤水分. *地理研究*, 1990, 9(2) : 101 ~ 112. Zhang R H. Improved thermal inertia model and remote sensing of soil moisture (In Chinese). *Geographical Research*, 1990, 9(2) : 101 ~ 112
- [17] 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. *遥感学报*, 1997, 1(3) : 220 ~ 224. Sui H Z, Tian G L, Li F Q. Two layer model for monitoring drought using remote sensing (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3) : 220 ~ 224
- [18] 肖乾广,陈维英,盛永伟. 用气象卫星监测土壤水分的实验研究. *应用气象学报*, 1994, 5(3) : 312 ~ 317. Xiao Q G, Chen W Y, Sheng Y W. A study on soil moisture monitoring using NOAA satellite (In Chinese). *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(3) : 312 ~ 317
- [19] 辛景峰,宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究. *遥感学报*, 2001, 5(6) : 443 ~ 447. Xin J F, Yu Z R, Driessen P M. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(6) : 443 ~ 447
- [20] 齐述华,张源沛,牛铮,等. 水分亏缺指数在中国干旱遥感监测中的应用研究. *土壤学报*, 2005, 42(3) : 367 ~ 372. Qi S H, Zhang Y P, Niu Z, et al. Application of water deficit index in drought monitoring in China with remote sensing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3) : 367 ~ 372
- [21] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 基于 CWSI 和土壤水分修正系数的冬小麦土壤水分含量估算. *土壤学报*, 2005, 42(3) : 373 ~ 378. Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y. Estimation of soil moisture of winter wheat field based on CWSI and soil water correction coefficient (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3) : 373 ~ 378
- [22] Njoku E G, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 ~ 18 GHz. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1999, 37(1) : 79 ~ 93
- [23] Ulaby F T, Charles E. *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*. Boston: Artech House, 1990
- [24] Ujjiwal N, Venkat L E, Njoku G. Retrieval of soil moisture from passive and active L/S band sensor (PALS) observations during the soil moisture experiment in 2002 (SMEX02). *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92 : 483 ~ 496
- [25] Jackson T J, Bindlish R, Cosh M. Soil moisture experiments 2004 (SMEX04) polarimetric scanning radiometer, AMSR-E and heterogeneous landscapes. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2005
- [26] 李杏朝,董文献. 利用遥感和 GIS 监测旱情的方法研究. *遥感技术与应用*, 1996, 11(3) : 7 ~ 15. Li X C, Dong W X. Method researches on monitoring drought by remote sensing and GIS (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 1996, 11(3) : 7 ~ 15
- [27] 高峰,王介民,孙成权,等. 微波遥感土壤湿度研究. *遥感技术与应用*, 2001, 16(2) : 97 ~ 102. Gao F, Wang J M, Sun C Q, et al. Advance on study on microwave remote sensing of soil moisture (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 2001, 16(2) : 97 ~ 102
- [28] 李震,郭华东. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化. *遥感学报*, 2002, 6(6) : 481 ~ 484. Li Z, Guo H D. Measuring the change of soil moisture with vegetation cover integration passive and active microwave data (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6) : 481 ~ 484
- [29] 杨虎,郭华东,李新武,等. 主动微波遥感土壤水分观测中的最优雷达参数选择. *高科技通讯*, 2003, 13(9) : 21 ~ 24. Yang H, Guo H D, Li X W, et al. Optimum radar parameters for mapping soil moisture (In Chinese). *High Technology Letters*, 2003, 13(9) : 21 ~ 24
- [30] 周凌云,陈志雄,李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究. *土壤学报*, 2003, 40(1) : 59 ~ 64. Zhou L Y, Chen Z X, Li W M. Calibration on measurement on soil water content using time domain reflectometry (TDR) (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1) : 59 ~ 64
- [31] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1) : 59 ~ 73
- [32] England A W, Galantowicz J F, Schretter M S. The radiobrightness thermal inertia measure of soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(1) : 132 ~ 139
- [33] Xue Y, Cracknell A P. Advanced thermal inertia modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(3) : 431 ~ 446
- [34] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transac. Geosci. Remote Sensing*, 1990, 28 : 940 ~ 948
- [35] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49 : 246 ~ 263

- [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(3): 213 ~ 244
- [37] 姚春生,张增祥,汪潇.使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473 ~ 478. Yao C S, Zhang Z X, Wang X. Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the temperature vegetation dryness index (TVDI) (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(6): 473 ~ 478
- [38] Schmugge T J. Remote sensing of surface soil moisture. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17: 1 549 ~ 1 557
- [39] Njoku E G, O'Neill P E. Multi-frequency microwave radiometer measurement of soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1982, 20(4): 468 ~ 475
- [40] Jackson T J. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2 136 ~ 2 151
- [41] Koike T. Study on spatial and temporal variability of surface soil wetness on Tibet plateau by using satellite-based microwave radiometer. *Annual J. Hydr. Eng.*, 1997, 41: 915 ~ 919

A REVIEW OF RESEARCHES ON MONITORING OF SOIL MOISTURE BY REMOTE SENSING

Wang Xiao Zhang Zengxiang Zhao Xiaoli Tan Wenbin

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract A general review of recent development and application of the technology of remote sensing in monitoring soil moisture was done with emphasis on introducing the relatively mature and extensively used feature space method and microwave remote sensing method based on visible light and thermal infrared bands. It also analyzed advantages and disadvantages of various remote sensing methods in monitoring soil moisture, pointed out shortages with the remote sensing methods, predicted directions of future development and foretold prospects of the technology of using remote sensing to monitor soil moisture monitoring.

Key words Soil moisture; Optical remote sensing; Microwave remote sensing