

土壤水分遥感监测的研究进展

仝兆远¹, 张万昌²

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 土壤水分是土壤的重要组成部分, 在地—气界面间物质、能量交换中起着重要的作用, 是农作物生长发育的基本条件和农作物产量预报的重要参数。遥感技术具有大面积同步观测, 时效性、经济性强的特点, 为大面积动态监测土壤水分提供了可能。简述了到目前为止出现的几种主要的土壤水分遥感监测方法, 如热惯量法、作物缺水指数法、归一化植被指数法、植被指数距平法、植被供水指数法、植被状态指数法、温度状态指数法、温度植被干旱指数法、高光谱法、微波遥感法, 并分析了各种方法的原理和特点, 最后展望了土壤水分遥感监测方法的发展趋势。

关键词: 遥感; 监测; 土壤水分; 进展

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2007)04—0107—07

中图分类号: S152.7, X830

Progress of Soil Moisture Monitoring by Remote Sensing

TONG Zhao-yuan¹, ZHANG Wan-chang²

(1. International Institute for Earth System Science (ESSI), Nanjing University, Nanjing,

Jiangsu 210093, China; 2. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Soil moisture is an important component of soil, and plays an important role in materials and energy exchanges between earth and atmosphere. It is also the basic parameter of crop growing and crop yield forecast. With the features of observing large area synchronously, timely, and economically, remote sensing technique makes dynamic soil water monitoring possible. This paper briefly summarizes the up-to-date progresses on the developed principle algorithms and methodologies for remote sensing of soil water content, including thermal inertia approach, crop water stress index method, normalized vegetation index scheme, AT-NDVI, crop water deficit index method, vegetation condition index scheme, temperature condition index method, temperature/vegetation dryness index approach, hyper spectral remote sensing based algorithm, and microwave remote sensing orientated methodology. The features and feasibility of every discussed algorithm or approach are systematically analyzed, and the future possible prospect of the developing trend on soil moisture monitoring by remote sensing is reviewed.

Keywords: monitor; remote sensing; soil moisture; progress

土壤水分是土壤的重要组成部分, 在地—气界面间物质、能量交换中起着重要的作用, 是农作物生长发育的基本条件和农作物产量预报的重要参数, 也是水文学、气象学等科学研究领域的重要环境因子和过程参数, 因此对土壤水分监测方法的研究具有很高的现实意义和科学价值, 是众多学科的热点研究问题。

传统的土壤水分监测方法主要包括重量法、中子仪法、张力计法、伽马射线衰减法、电磁技术、湿度计法等, 这些方法虽然可以准确估测土壤剖面的含水

量, 但只能得到单点的数据, 需要大量的人力物力, 不仅费时, 而且成本高, 很难高效率地获取大范围的土壤水分。不仅如此, 由于土壤、地形、植被覆盖上的空间差异使单点的代表性差, 也限制了它的应用范围。

遥感获取土壤水分是通过测量土壤表面反射或发射的电磁能量, 探讨遥感获取的信息与土壤水分之间的关系, 从而反演出地表土壤水分。用遥感的方法监测土壤水分可以得到土壤水分在空间上的分布状况和时间上的变化情况, 监测范围广, 速度快, 成本

收稿日期: 2007-02-15 修回日期: 2007-05-18

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB400502)及(2001CB309404); 中国科学院“百人计划”择优支持项目(8—057493); 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室开放基金

作者简介: 仝兆远(1982—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 从事遥感生态应用研究。E-mail: tongzhaoyuan@sina.com。

通讯作者: 张万昌(1966—), 男, (汉族), 博士, 教授, 从事遥感与GIS水文水资源研究。E-mail: zhangwc@nju.edu.cn。

低,具备进行长期动态监测的优势,是目前研究的重点。由于遥感获取的参数与土壤水分的关系复杂,用遥感方法获取土壤水分信息也是目前研究的难点。

1 遥感监测土壤水分的理论基础

不同波段反演土壤水分的原理不同。在可见光和近红外波段,不同湿度的土壤具有不同的地表反照率,通常湿土的地表反照率比干土低,并且从理论上可以测量这种差异。但是由于土壤有机质、地表粗糙度、纹理、入射角以及植被覆盖等干扰因素的影响,这种方法并不实用。

在热红外波段遥感可以监测地表温度,而地表温度与土壤水分有关。另一方面,利用地表温度可以获得土壤热惯量,进而估测土壤水分。土壤热惯量与土壤水分关系密切,土壤水分高,土壤热惯量高;反之,土壤热惯量低。

微波分为被动微波和主动微波。被动微波通过测量土壤亮温来估测土壤水分,土壤亮温由土壤介电常数和土壤温度决定,而介电常数和温度与土壤水分有关,可以通过土壤亮温反演土壤水分。主动微波测量土壤的后向散射系数,土壤后向散射系数主要由介电常数和土壤粗糙度决定,而介电常数由土壤水分决定,因此可以利用雷达反演土壤水分。

2 遥感监测土壤水分的主要方法

遥感监测土壤水分的研究始于 20 世纪 60 年代末,伴随着遥感技术的不断发展,遥感监测土壤水分的方法也在不断发展和完善,出现了基于不同遥感原理的监测方法,如热惯量法、作物缺水指数法、植被指数距平法、植被状态指数法、温度状态指数法、温度植被干旱指数(TVDD)法、高光谱方法、微波遥感方法等。

2.1 热惯量法及表观热惯量法

热惯量是土壤的一种热特性,是引起土壤表层温度变化的重要因素,影响土壤温度日较差的大小。同时由于水分有较大的热容量和热传导率使较湿的土壤具有较大的热惯量,因此土壤水分与土壤热惯量间有重要的联系。热惯量法是在裸地或低植被覆盖土地的能量平衡方程基础上,对土壤表层水分进行定量反演的一种方法。

热惯量可以表示为:

$$P = \sqrt{c}$$

式中: P ——热惯量($J \cdot m^{-2} \cdot k^{-1} \cdot s^{-1/2}$); λ ——土壤热导率($J \cdot m^{-1} \cdot k^{-1} \cdot s^{-1}$); ρ ——土壤密度(kg/m^3); c ——土壤比热($J \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$)。

根据热传导方程及能量平衡方程,可得:

$$\frac{1-A}{T_{max}-T_{min}} = \frac{(P^2 + \sqrt{2}BP + B^2)^{1/2}}{2S_0 C_t A_n} \quad (1)$$

式中: T_{max} , T_{min} ——分别为地表最高、最低温度,即昼夜温度; A ——地表全波段反射率,其值可由 NOAA/AVHRR 通道 1 和通道 2 的反射率 A_{chl1} , A_{chl2} 得到; B ——与天气和地面状况有关的综合参数; ω ——角频率; S_0 ——太阳常数; C_t ——短波辐射的大气透过率; A_n ——太阳赤纬与地球纬度的函数。

在同一幅遥感图像中, S_0 , C_t 和 B 为常数, A_n 也仅与地理纬度有关。因此, (1) 式左边反映了热惯量的相对大小,通常把它定义为表观热惯量 I_{AT} (单位: k^{-1}), 即:

$$I_{AT} = \frac{1-A}{T_{max}-T_{min}}$$

从理论上讲,土壤含水量与真实热惯量之间有密切的关系。但真实热惯量与地表综合参量 B 有关,且 B 值计算复杂,需要大量地面数据支持。若忽略地理纬度的影响,可以在实际应用中用表观热惯量 I_{AT} 来近似代替真实热惯量 P ,直接建立表观热惯量 I_{AT} 与土壤含水量 S_w 之间的遥感统计模式,大多数都是建立两者之间的线性模型^[1]: $S_w = a * I_{AT} + b$ 。但肖乾广等认为^[2],幂函数模型: $S_w = ab^{I_{AT}}$,要比线性模型精度高,更具有物理意义。

Watson 最早应用了热模型^[3], Rosema 进一步发展了他们的工作^[4],提出了计算热惯量、逐日蒸发的模型。Price 的经典热惯量法在对地表综合参量 B 求解过程中^[5],需要代入大量的地面实测数据作为支持,降低了这种方法的实用性;而 Pratt 等人采用训练场的做法^[6],以点代面,降低了监测精度;隋洪智等人提出了表观热惯量(I_{AT})概念^[7],在考虑了地面因子和大气因子的情况下,简化能量平衡方程,使用 NOAA/AVHRR 数据计算热惯量,得到植被覆盖度较低条件下土壤表观热惯量与土壤水分的一元线性关系,提高了这种方法的实用性,使直接利用卫星资料推算得到地表热特性参量成为可能;肖乾广等^[2]用 NOAA 气象卫星资料研究用热惯量模式监测土壤水分,引入了“遥感土壤水分最大信息层”的概念,建立了多时相的土壤水分监测幂函数模型,提高了线性模型的精度;余涛、田国良^[8,5]从 Price 等人的研究出发,经过适当简化,由 B 的定义导出另一个 P, B, T_g 关系式,提出了一种改进的求解土壤表层热惯量的方法,开发了地表能量平衡方程的一种新的化简方法,实现了利用 NOAA/AVHRR 图像定量计算热惯量

P 值,进而得到土壤水分含量分布;陈怀亮、李杏朝在GIS支持下利用表观热惯量模型时^[9-10],分土壤质地建模或选不同类型的样本进行分析,消除土壤地质的影响,提高了监测精度;朱永豪发现土壤光谱反射特性与土壤含水量可能并非总是线性关系^[11],成为后来热惯量模型修正的依据。

2.2 作物缺水指数法

水分供应是蒸散过程的基本条件之一,土壤水分含量对蒸散速率有着一定的影响。由于蒸散作用与能量和土壤水分含量关系密切,当能量较高,土壤水分供给充足时,蒸散作用较强,冠层温度处于较低状态;反之,土壤水分亏缺时,蒸散作用较弱,冠层温度较高。人们把一定气象条件下充分供应水分的蒸散定义为潜在蒸散 E_p ,把实际蒸散 E_d 与潜在蒸散之比(E_d/E_p)作为作物缺水的量度。作物缺水指数(CWSI)最早是由T. J. Jackson等(1981)以能量平衡为基础提出的,是以植物叶冠表面温度(T_c)和周围空气温度(T_a)的测量差值,以及太阳净辐射的估算值计算的,实质上反映出植物蒸腾与最大可能蒸发的比值。作物缺水指数CWSI定义为:

$$CWSI = 1 - E_d/E_p$$

潜在蒸散 E_p 的计算采用彭曼方法来计算,实际蒸散 E_d 可以由下式计算得到:

$$E_d = E_i \times 2N_e / \{ \sin(t/N_e) \}$$

式中: N_e ——可以根据每一区域的经纬度求得; E_i ——瞬时蒸散。

CWSI模型所需的数据大致有:(1)气象站的日最高、最低温度,平均温度,风速,比湿,饱和水汽压,大气压等。作物高度来自国家气象局旬报,根据物候期大面积估算得到。(2)实时遥感图像获得比如反照率,通过AVHRR通道1,2图像反演得到的反照率百分比计算求得;总辐射由经过大气辐射订证后的图像反演得到;地表覆盖率 C_v 通过绿度函数由遥感图像得到; T_c 由NORR/AVHRR通道4,5的辐射温度反演得到。(3)由田间实验得到,比如地表覆盖率 C_v 通过野外测定数据,统计计算后确定。

田国良等人运用CWSI法^[12],通过NOAA/AVHRR图像与气象台站数据估算土壤水分;申广荣^[13]等在GIS的支持下研究了通过遥感影像获得的数据和地面气象站资料估算农田蒸散进而计算作物缺水指数来监测土壤水分的方法;陈云浩^[14]根据田国良等的研究,利用作物缺水指数与土壤水分间的关系进行农田区的旱情监测,参考对作物缺水指数的定义,提出区域缺水指数(RWSI)。

2.3 植被指数距平法

遥感技术发展到现在,科学家已经创立了40多种植被指数(NDVI),其中最重要也是最常用的就是归一化植被指数(NDVI)。NDVI一定程度上可以减少太阳高度角、大气状态和非星下点观测带来的误差。遥感影像得到的NDVI可以反映植物的长势,土壤水分是影响植物长势的重要因素,因此NDVI可以间接地反映土壤水分,虽然NDVI反映土壤水分时在时间上有一定滞后,但是在多年遥感影像资料计算NDVI的基础上,可以得到各个地方各个时间的NDVI平均值,NDVI平均值大致可反映土壤供水的平均状况。遥感影像资料的时间系列越长,NDVI平均值的代表性就越好。当时值与该平均值的离差反映了偏旱或偏湿的程度,由此可确定土壤水分含量。根据这一原理,提出了植被指数距平法,植被指数距平ATNDVI定义为:

$$ATNDVI = TNDVI - \overline{TNDVI}$$

$$TNDVI = \text{Max} \{NDVI(t)\}$$

TNDVI——同旬各年的归一化植被指数的平均值; t ——天数;NDVI(t)——第 t 天的植被指数;TNDVI——当年该旬最大值合成的植被指数。

陈乾^[15]通过NOAA/AVHRR影像计算的NDVI来监测甘肃省的干旱状况,表明植被指数的相对变化率分布情况与同时期的20cm土壤水分相对含量和降水量的偏差均一致。毛学森等^[16]研究了冬小麦水分胁迫与NDVI变化之间的关系,发现NDVI对土壤水分的反应具有一定的滞后性。肖乾广^[12]、陈维英^[17]、陈乾^[15]等通过研究植被指数距平与土壤水分之间的关系,对全国的土壤水分及旱情进行监测。

2.4 植被供水指数法

植被供水指数法的原理是:当作物供水正常时,即土壤水分正常时,遥感影像的植被指数在一定的生长期保持一定的范围,遥感影像的作物冠层温度也在一定的温度范围之内,如土壤水分低于正常范围,作物供水不足,作物没有足够的水供给叶子蒸发,被迫关闭一部分气孔,植被冠层温度将升高,将导致叶子枯萎及叶面积指数减小。植被供水指数的定义是:

$$VSWI = B_1 \times T_s/NDVI$$

式中: B_1 ——增强图像层次的增强系数; T_s ——植被的冠层温度;NDVI——归一化植被指数。 T_s 、NDVI都可以通过卫星进行定量反演。

作物供水指数法适合植被覆盖度较高的地方通过建立VSWI与土壤水分之间的模型进行土壤水分的监测;但在植被覆盖度较低的情况下,往往会夸大

植被的影响作用。刘丽等人^[18]用 NOAA/AVHRR 数据及植被供水指数法对贵州省进行了土壤水分及旱情监测。

2.5 植被状态指数法及温度状态指数法

植被状态指数 VCI (Vegetation Condition Index), 反映了植被在不同年间的生长波动情况, 它被定义为:

$$VCI = 100 \times \frac{NDVI_i - NDVI_{I_{min}}}{NDVI_{I_{max}} - NDVI_{I_{min}}}$$

式中: $NDVI_i$ ——某一年份内第 i 个时期的 NDVI 值; $NDVI_{I_{max}}$, $NDVI_{I_{min}}$ ——分别代表所有研究年份内第 i 个时期 NDVI 的最大值和最小值。

温度状态指数 TCI (Temperature Condition Index), 反映了植被对温度的两种相反响应, 它被定义为^[25]:

$$TCI = 100 \times \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}}$$

式中: T_i ——某一年份内第 i 个时期的温度值; T_{max} , T_{min} ——分别代表所有研究年限内第 i 个时期温度的最大值和最小值。

VCI - TCI 接近于 NDVI 和亮温的天气影响分量, 其值从 0 变化到 100, 反映了植被从最差到最好的变化。此外, 它们也被集成为一个指数 (VCI/T), 用于表达它们对植被胁迫的另外一种近似作用^[26]:

$$VCI/T = (VCI + TCI) / 2$$

利用 VCI, TCI, VCI/T, 通过对全球多年干旱和植被胁迫的监测, 取得了较好效果。Liu^[19]等通过运用 NOAA/AVHRR 的两个时期的 NDVI 和 VCI 数据, 得到区域土壤水分及干旱状况分布图, 并认为其与当地的降水分布是一致的。蔡斌等^[20]用 VCI 参照当时降水对全国 1991 年春季土壤水分及干旱进行了监测和研究, 结果表明, 该方法可以对干旱进行宏观动态监测。冯强等^[21]利用 1981—1994 年连续 504 旬的 NOAA/AVHRR 8 km 分辨率的 NDVI 时间系列数据, 以及对应时段全国 102 个固定农气观测站的旬土壤湿度资料, 建立了植被状态指数 VCI 与土壤湿度之间的统计模型, 由旬 VCI 值来换算出每旬的土壤湿度, 用以反映全国的逐旬土壤水分分布。

2.6 温度植被干旱指数 (TVDI) 法

Price^[22], Carlson 等^[23]发现当研究区域的植被覆盖和土壤湿度变化范围较大时, 根据遥感资料得到的以 NDVI 为横轴和以地表辐射温度为纵轴的散点图呈三角形, 并利用土壤—植被—大气传输模型 (SVAT) 进行了验证; Moran 等从理论的角度分析, 认为 NDVI— T_s 之间呈梯形关系。

无论 NDVI— T_s 特征空间为三角形或梯形, 都把上边界称为干边, 下边界称为湿边, 主要因为在同样 NDVI 下, 如果植被供水充分, 则温度较低, 相反温度较高。基于 NDVI— T_s 特征空间为三角形或梯形, Sandholt^[24]等提出了温度植被干旱指数 TVDI:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_s - T_{s_{max}} - T_{s_{min}}}$$

式中: T_s ——地表温度; $T_{s_{min}}$ ——相同 NDVI 值的最小地表温度, 对应的是 T_s ——NDVI 特征空间的湿边; $T_{s_{max}}$ ——相同 NDVI 值的最大地表温度, 对应的是 T_s ——NDVI 特征空间的干边。通过对 NDVI— T_s 特征空间的干边及湿边进行模拟可得:

$$\begin{aligned} T_{s_{max}} &= a_1 + b_1 \times NDVI \\ T_{s_{min}} &= a_2 + b_2 \times NDVI \end{aligned}$$

则

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

国内外许多学者都在 NDVI— T_s 空间的基础上, 建立了 TVDI 与土壤水分之间的各种关系, 用以监测土壤水分并取得了良好的效果。王鹏新^[25]等在 NDVI— T_s 构成的三角形空间的基础上, 提出了条件植被温度指数 (VTCI) 模型来监测干旱; 姚春生^[26]等利用 MODIS 合成产品数据 MOD11A2 和 MOD13A2 获取的归一化植被指数 (NDVI) 和陆地表面温度 (T_s) 构建 NDVI— T_s 特征空间, 依据该特征空间计算的温度植被干旱指数 (TVDI) 作为土壤湿度监测指标, 反演了新疆 8, 9 两个月份每 16 d 的土壤湿度。

2.7 高光谱法

高光谱遥感技术具有高光谱分辨率的特点, 能够提供连续的反射光谱曲线, 而连续的反射光谱曲线可以表现出地物的细微变化。光谱微分技术处理“连续”的光谱是遥感中常用的数学方法, 高光谱分辨率微分光谱在遥感中很有应用潜力。现在微分光谱已广泛地应用于研究植被的生物物理参数、矿物和有机质等, 然而, 利用高光谱以及微分光谱对土壤的研究却刚刚起步。

在太阳光谱范围 (380 ~ 2 500 nm) 的光谱反射信息也能够用于估算土壤表层水分。Stoner^[27], Bowers 与 Hanks^[28]等指出了随土壤水分的增加土壤光谱反射率在整个波长范围内降低, 尤其在 760, 970, 1 190, 1 450, 1 940 和 2 950 nm 等水分吸收波段。而 Liu 和 Baret 等^[29]的研究明确表明, 土壤光谱反射率在一定的土壤水分临界值之下时随土壤湿度的增加而降低, 当超过临界值后随土壤水分的继续增

加而增加,这个临界值通常大于田间持水量。Bowers等^[30]指出土壤水分含量与水分在吸收波段的吸收强度之间具有很好的线性关系。Dalal等^[31]通过使用近红外波段的吸收系数准确地预测了一系列土壤的水分含量。刘维东^[32]等通过选择最佳波段运用相对反射率、微分光谱、差分等方法,对土壤水分进行定量反演,取得了比较好的精度。

2.8 微波遥感法

微波遥感是指通过微波传感器获取从地物发射或反射的微波辐射,实现对地物的识别监测。微波遥感技术有着传统可见光、近红外、红外遥感技术无可比拟的优点,它具有穿云透雾的能力,能够全天候、全天候工作,且对地表面的穿透能力比较强。

微波遥感土壤水分具有坚实的物理基础。目标物的介电常数是决定地物微波比辐射率的主要因素,而土壤水分是决定土壤介电常数的主要因素。微波波段,土壤的比辐射率从湿土的0.6(30%体积土壤湿度)到干土的0.9(9%体积土壤湿度)之间变化^[33]。水的介电常数大约为80,干土仅为3,它们之间具有较大的反差,土壤的介电常数对土壤水分含量很敏感,国内外研究者对此进行了大量的研究和理论计算。由于微波遥感具有以上所述的几个特点,从而使微波遥感土壤水分具有比光学遥感更大的优势。

2.8.1 被动微波遥感监测土壤水分的方法 土壤的介电常数随其含水量变化而变化,由辐射计观测到的亮度温度也随之变化。为此,国内外专家围绕土壤水分与亮度温度之间的关系进行了大量的研究及野外和航空遥感实验,发展了具有区域应用价值的一些算法^[34-35]。同时,对其它影响因子(如植被、粗糙度、土壤温度以及土壤纹理结构等)也做了大量研究^[36-37]。与主动微波遥感相比,被动微波遥感土壤湿度研究开展得较早,其算法种类多,相对也比较成熟。特别是自1978年以后,装载在风云卫星及国防气象卫星上的SMMR、SSM/I等卫星微波遥感数据的有效利用,基于卫星微波遥感数据的被动微波遥感土壤湿度算法得到了发展,推动了被动微波监测土壤水分方法的发展。

被动微波遥感土壤水分的最终目的是利用微波辐射计测得的亮度温度反演土壤水分。20世纪70年代初,NASA在亚历山大农田进行了航空微波辐射计飞行实验,并同步观测了0—15 cm的土壤水分。Schmugge等^[38]对实验数据进行了分析,发现亮度温度与土壤水分具有较好的线性相关,并利用分层模式对土壤水分在决定土壤微波辐射的重要性上进行了模拟研究。Schmugge^[38]引入了田间持水能力 F_c ,作

为土壤水分的一个指示因子,建立了亮度温度与田间持水能力 F_c 之间的线性关系。随着卫星微波遥感数据的更加有效的利用,一些研究者引入了前期降雨指数API^[39]和微波极化差指数MPDI^[40]等土壤水分指示因子,建立了亮度温度与API、MPDI之间的线性关系,这些线性算法都是经验算法或统计算法。随着微波遥感的发展,基于辐射传输方程的理论算法得到了发展和应用,Njoku等^[35]基于辐射传输方程,建立亮度温度与土壤水分含量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水分含量等参数。金亚秋^[41]运用星载微波SSM/I的7个通道辐射亮度温度数据研究中国东北、华北农田的土壤水分,提出用微波数据生成的散射指数与极化指数来分析农田微波辐射特征及其随季节的变化,它可以用来监测农作物生长和平原土壤水分的变化。Choudhury^[36]等研究了地表粗糙度对土壤水分监测的影响。Wang^[37]等分析了植被对土壤水分监测的影响。

2.8.2 主动微波遥感监测土壤水分的方法 土壤的介电特性与它的水分含量有着密切的关系,随着物体含水量的增加,其介电常数几乎呈线性增加,土壤含水量不同,介电特性不同,主动微波遥感的回波信号也不同,据此可建立后向散射系数和土壤水分含量的关系。大多数研究是依据统计方法,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,而以线性关系应用最普遍。Ulaby^[42]等研究了线性关系的土壤水分和雷达参数的关系。Dobson等认为干的或饱和的土壤,不适用线性关系,而是非线性的关系。同时,许多学者研究了雷达参数(频率、极化方式、入射角等)与土壤表面粗糙度和土壤纹理结构的关系。Sano^[43]等考虑了粗糙度的影响对其进行了研究。李杏朝^[44]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,并用同步获得的X波段、HH极化的机载SAR图像,微波遥感监测土壤水分的试验,监测的相对误差仅为12%。

3 土壤水分遥感监测方法的评价

不同的遥感监测土壤水分方法的应用范围是不同的,各种方法都受到了不同的因素制约。热惯量法比较适合于植被覆盖度低的地方,在植被盖度大的地方效果不好;作物缺水指数法、植被供水指数法比较适合于植被盖度大的地区,在植被盖度小的地方会过于夸大植被的作用,而影响监测精度;植被指数距平法、植被状态指数法、温度状态指数法需要较长时间

序列的遥感影像资料,所以在实际应用中比较困难;温度植被干旱指数(TVDI)法由于综合利用了表征地物热特性的温度和表示地物植被覆盖情况的植被指数,所以不仅适用于低植被覆盖区,也适用于高植被覆盖区;高光谱方法具有明确的物理意义,也是比较新的方法,有待进一步的发展;到目前为止,被动微波遥感和主动微波遥感大部分的监测反演模型在裸土和低植被覆盖区都取得了不错的效果,但由于微波与植被的相互作用对土壤水分监测来说是不可忽略的,因此在密集植被覆盖区的效果都不太好。

4 遥感监测土壤水分发展趋势和展望

土壤水分遥感监测所采用的遥感波段已基本确定,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效果提供了可能。微波遥感具有全天候、高精度等特点,是未来土壤水分遥感监测的发展方向。

由于不同的遥感技术在监测土壤水分时,除了理论上的一些局限外,在方法和应用上也存在一些有待深入的地方,有些问题是用单一遥感手段很难解决的,如微波遥感易受植被的影响,可见光、红外方法易受到云的影响及昼夜的影响等。随着遥感技术向着高空间分辨率、高光谱分辨率的方向发展,可以综合利用各种遥感技术手段进行土壤水分的监测。

目前对于裸露土壤一般采用热惯量法;植被覆盖下采用植被指数法。但是,对裸露土壤、部分植被覆盖和完全植被覆盖没有明确的界定,这就造成了操作的不确定性。因此,今后的研究应向将热惯量模型推广到植被覆盖情况,成为广义的热惯量。将基于植被指数的模型扩展到裸露土壤情况,向广义植被指数模型方向发展,建立适合植物生长各个时期的模型。

目前的研究大多是建立回归模型来计算土壤水分,这种方法需要积累大量的观测数据,工作量大,模型也不稳定,影响了监测的时效性。而且,地面实测资料多为点状的,如何外推到面上与遥感资料相匹配也是影响模型精度的一大问题。因此,今后仍要加强土壤水分变化的动力学模型的研究,力求建立稳定的,较少依赖于非遥感数据的模型。

随着 GIS 技术的发展,GIS 提供的多种地理数据与遥感提供的地物波谱数据叠合,一方面丰富了图像处理的信息源,有利于改善和提高干旱监测的精度。另一方面,GIS 具有的强大的空间分析与查询功能也为遥感监测到的干旱信息向实践应用转化提供了可能性。但目前土壤水分遥感监测与地理信息系统的一体化程度较低,很有必要开发针对土壤水分遥感监

测的、与遥感高度一体化的土壤水分遥感监测地理信息系统。

[参 考 文 献]

- [1] 裴浩,范一大,乌日娜.利用气象卫星遥感监测土壤含水量[J].干旱区资源与环境,1999,13(1):73—76.
- [2] 肖乾广,陈维英,盛永伟,等.用气象卫星监测土壤水分的试验研究[J].应用气象学报,1994,5(3):312—318.
- [3] Waston K, Poho H A. Thermal inertia mapping form satellites discrimination of geologic units in Oman[J]. J Res Geol Suvr,1974,2(2):147—158.
- [4] Rosema. Result of the group agromet monitoring project [J]. ESA Journal,1986,10:17—41.
- [5] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery. The limited utility of apparent thermal inertia [J]. Remote Sens Environ,1985,18:59—73.
- [6] Pratt A, Ellyett C D. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology[J]. Remote Sens Environ,1979,8:151—168.
- [7] 隋洪智,田国良.热惯量方法监测土壤水分[M].黄河流域典型地区遥感动态研究.北京:科学出版社,1990.
- [8] 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.
- [9] 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[J].遥感技术与应用,1998,13(4):27—35.
- [10] 李杏朝.利用遥感资料进行旱情监测的研究[J].卫星应用,1996,4(4):39—43.
- [11] 朱永豪,邓仁达,卢亚非.不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义[J].土壤学报,1982,21(2):194.
- [12] 田国良,杨希华,郑柯.冬小麦旱情遥感监测模型研究[J].环境遥感,1992,7(2):83—89.
- [13] 申广荣,田国良.基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究——作物缺水指数模型的实现[J].生态学报,2000,20(2):224—228.
- [14] 陈云浩,李晓兵,李霞,等.不同地表覆盖条件下区域水分盈亏的遥感分析——以中国北方为例[J].地球科学进展,2002,17(2):283—288.
- [15] 陈乾.用植被指数监测干旱并估计冬麦产量[J].遥感技术与应用,1994,9(3):12—18.
- [16] 毛学森,张永强,沈彦俊.水分胁迫对冬小麦植被指数 NDVI 影响及其动态变化特征[J].干旱地区农业研究,2002,20(1):69—71.
- [17] 陈维英,肖乾广,盛永伟.距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J].环境遥感,1994(2):106—112.
- [18] 刘丽,刘清,周颖,等.卫星遥感信息在贵州干旱监测中的应用[J].中国农业气象,1999,20(3):43—47.
- [19] Liu W T, Kogan F. Monitoring regional drought using

- the vegetation condition index[J]. *Int J Remote Sens*, 1996, 17(14): 2761—2782.
- [20] 蔡斌,陆文杰,郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. *国土资源遥感*, 1995, 4: 45—50.
- [21] 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(3): 81—88.
- [22] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28: 940—948.
- [23] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetational cover [J]. *Remote Sensing Review*, 1994, 52: 45—59.
- [24] 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: 213—224.
- [25] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件温度植被指数及其在干旱监测中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 412—418.
- [26] 姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TV-DI)反演新疆土壤湿度[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473—478.
- [27] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, 45: 1161—1165.
- [28] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soil[J]. *Soil Science*, 1965, 100: 130—138.
- [29] Liu W D, Baret F, Gu X F, et al. Relating soil surface moisture to reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 81(2/3): 238—246.
- [30] Bowers S A, Smith S J. Spectrophotometric determination of soil water content[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1972, 36: 978—980.
- [31] Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by infrared reflectance spectrometry[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 120—123.
- [32] 刘伟东, Frédéric Baret, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 700—706.
- [33] Jackson T J, O'Neil P E. Salinity effects on the microwave emission of soil[J]. *Remote Sens Environ*, 1990, 31: 161—173.
- [34] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers [J]. *JGR*, 1974, 79(2): 317—323.
- [35] Njoku E G, O'Neill P E. Multifrequency Microwave Radiometer Measurements of Soil Moisture [J]. *IEEE Trans Geo sci Remote Sensing*, 1982, 20(4): 468—475.
- [36] Choudhury B J, Schmugge T J, Newton R W, et al. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils[J]. *J. Geophys. Res*, 1979, 84(C9): 5699—5706.
- [37] Wang J R. Effect of vegetation on soil moisture sensing observed from orbiting microwave radiometer [J]. *Remote Sensing Environ*, 1985, 17: 141—181.
- [38] Schmugge T J. Remote Sensing of Surface Soil Moisture[J]. *J Appl Meteorol*, 1978, 17: 1549—1557.
- [39] 张宏名. 微波遥感土壤水分[J]. *遥感信息*, 1992(4): 7—9.
- [40] 王磊,李震,陈权. 植被覆盖地区 AMSR-E 反演土壤水分算法研究[J]. *高科技讯*, 2006, 16(2): 204—209.
- [41] 金亚秋. 星载微波 SSM/I 遥感在中国东北华北农田的辐射特征分析[J]. *遥感学报*, 1998, 2(1): 19—25.
- [42] Ulaby F T, Aslam A, Dobson M C. Effect of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1982, GE - 20(4): 476—481.
- [43] Sano E E, Moran M S, Huete A R, et al. C - band multiangle Ku - band SAR data for soil moisture estimation agricultural areas[J]. *Remote Sensing of Environ*, 1999, 64: 77—90.
- [44] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探[J]. *遥感技术与应用*, 1995, 38(4): 1—8.