

## 用气象卫星监测土壤水分的试验研究<sup>\*</sup>

肖乾广 陈维英 盛永伟 李 靖

(国家卫星气象中心,北京 100081)

### 提 要

该文从土壤的热性质出发,阐述了目前国内外用气象卫星监测土壤湿度的研究中存在的问题,并提出了解决的方法.在解热传导方程的基础上,引入了“遥感土壤水分最大信息层”概念,并以此为理论依据建立了多时相的综合土壤湿度统计模型.为了在业务中有效地使用所有卫星资料,还提出获得日较差的几种方法.

**关键词:**土壤湿度;日较差;遥感监测.

### 1 前 言

土壤湿度遥感监测的重大意义已在文献[1],[2],[3]中作了详细的叙述.目前国内、外都把它作为遥感应用研究的前沿问题,投入大量的人力、物力和财力进行研究.主要采用两类研究方法,即微波方法和热红外方法(热惯量方法).对于有高植被覆盖度时,采用植被(作物)缺水系数法,此法是从植被(作物)蒸腾的角度去间接推算土壤水分含量的状况,也可以归于热红外方法.在中国,机载微波辐射计遥感土壤湿度的研究已经取得相当大的进展,而星载微波辐射计遥感土壤湿度的研究,由于技术原因,目前还不可能在卫星上安装能监测土壤湿度的仪器.机载微波遥感由于成本高,而无法在业务上推广使用.建立在气象卫星的热红外遥感资料基础上的热惯量方法,由于卫星资料较容易获得,成本低,资料重复周期短,是一种很有应用前途的方法.目前已经开展的研究工作主要集中在两个方面,一是企图建立通用的解析模型;二是用卫星资料和相应的地面资料建立通用统计模型.从土壤的热传导性质与其滞后时间的分析获得的结论是:单次资料不可能获得普遍适用的解析模型和统计模型.本文将就气象卫星在土壤湿度遥感监测中的这几个问题作较详细的分析.

1993年2月19日收到,9月2日收到再修改稿.

\* 本文得到国家抗旱指挥部的经费支持.

## 2 热红外方法遥感土壤湿度的理论基础

### 2.1 NOAA 气象卫星遥感土壤湿度的原理

对于裸露土壤用热红外方法遥感湿度是基于热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

其中  $k = \frac{\lambda}{C_a \rho}$ ,  $\lambda$  为热传导率,  $C_a$  为热容量,  $\rho$  为土壤密度,  $T$  为土壤温度,  $t$  为时间,  $z$  为土壤深度. 此热传导方程的边界条件为:

$$T_0(t) = \bar{T}_0 + \Delta T_0 \sin \omega t \quad (2)$$

其中  $\bar{T}_0$  为日平均温度,  $\Delta T_0$  为 0cm 的地表温度日较差,  $\omega$  为角频率.

解方程后, 得到热惯量表达式<sup>[1]</sup>

$$P = \frac{B(1-A)}{\Delta T_0} \quad (3)$$

其中  $P$  为热惯量, 即卫星间接遥感量,  $\Delta T_0$  为每日最高温度和最低温度之差,  $A$  为全波段反照率,  $B$  为常数.

通常用统计方法建立土壤水分遥感模型. 但目前国内都是建立的线性模型. 我们的研究认为幂函数模型比线性模型好, 因为它的物理意义与公式(3)的数学表达式相一致, 试验结果也表明拟合精度也比其它函数形式的拟合精度高. 幂函数形式为:

$$S_w = ab^P \quad (4)$$

式中  $S_w$  为土壤水分,  $a$ 、 $b$  是拟合系数(最小二乘法拟合),  $P$  是热惯量.

### 2.2 NOAA 气象卫星遥感土壤湿度的深度限制

对土壤的热性质进行分析时, 可知土壤含水量越高, 土壤的热传导率越大, 土壤的热容量也大; 对于同样加热率, 土壤湿度越大, 白天土壤表面受热时热量容易向深层传递, 夜间冷却时, 深层热量也容易往上传, 所以潮湿土壤白天表层温度低而夜间高. 土壤中的水分既控制热传导率, 也控制热容量, 这与公式(3)表达的结果相一致. 土壤温度的升高, 不但决定于土壤水分, 而且取决于热量收支的各项变化, 即与公式(3)中的反照率  $A$  有关. 土壤干燥时, 在地面辐射差额中, 反照率  $A$  增加, 消耗于蒸发的热量减少, 干燥土壤热传导率变小, 传给下面的热量也少. 把所有因素考虑进去后, 热量收支差额增大, 使得白天地面温度增高, 进而使式(3)中的  $\Delta T_0$  值增大.

以上分析只限土壤表层温度的变化, 而未涉及深层温度的变化, 在热传导方程中只用了边界条件, 而未使用初始条件. 事实上土壤温度的日较差  $\Delta T$  是随土壤深度变化的, 表层日较差最大, 越向深层日较差越小, 到一定深度后, 日较差将为 0, 这个深度通常为日变化消失层. 对于不同含水量的土壤, 日变化消失层在 30 至 100cm 之间. 通常深度每增加 10cm, 出现最高和最低温度的时间滞后 2.5~3.5 小时. 而有植被覆盖的土壤, 各个深度的日较差将减小. 各个深度的日较差同时还受到地面风和大气乱流的影响. 风加强地面和

大气间的热交换,使日较差变小.

土壤日较差的消失层是不固定的,它随纬度、季节、土壤性质而异,通常低纬度日变化消失层深于高纬度,夏季深于秋季.这是因为热量收入多的地区和季节,向下传送的热量多,日变化消失层就深.水分含量大的土壤日变化消失层比水分含量小的土壤日变化消失层深.

图1是一天中不同时间内大气与地表温度的分布情况<sup>[4]</sup>.从图中可以看出地表温度与大气温度有很大差别.中午,地表温度高于大气温度;而午夜,地表温度低于大气温度.地表温度变化的幅度要比大气温度的变化幅度大.地表温度变化的周期是随土壤深度变化的.由于地表温度以温度波的形式自表面向地下传播,所以地下各个深度的土壤温度也周期的变化.图1实际上是周期为24小时的土壤深度的日变化示意图.

在气候变化的研究中<sup>[4]</sup>,用解热传导方程(1)得到不同深度的土壤温度振幅与土壤温度的变化周期关系为:

$$T_z = T_0 \exp\left(\frac{z \sqrt{\pi}}{\sqrt{\tau K_s}}\right) \tag{5}$$

其中  $T_z$ ,  $T_0$  分别是  $z$ cm 和 0cm 的温度振幅,  $z$  是土壤深度,  $\tau$  是周期,  $K$  是与热传导率、热容量有关的常数.

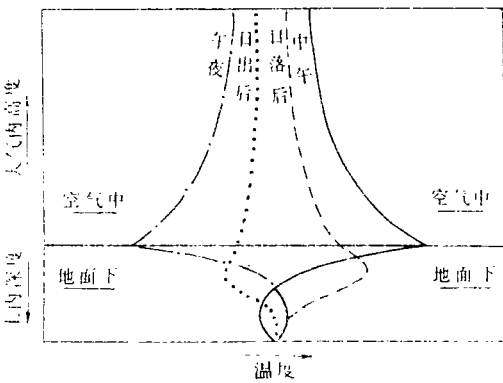


图1 大气及地下温度日变化示意图<sup>[4]</sup>

表1  $K_s(\text{cm}^2/\text{s})$ 与土壤深度  $z(\text{cm})$ 温度振荡周期之间的关系

周期 (d)	$K_s$		
	$3 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$
1	9.1	11.7	13.9
5	20.3	26.3	31.0
14	34.0	43.0	51.9
90	86.6	111.7	132.7
180	122.5	158.0	187.2

将式(5)作进一步变换并对  $\tau$  微分取极值,得到公式:

$$z_m = \sqrt{\frac{\tau \cdot K_s}{\pi}} \tag{6}$$

我们把  $z_m$  定义为最大信息层,即对于固定温度变化周期,当达到这个深度以后温度变化消失.一定的深度  $z_m$  对应一个温度振荡周期,如  $K_s$  取3个值( $K_s = 3, 5, 7 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),其  $\tau$  与  $z_m$  关系如表1所示.

从上表中我们可以看出,周期越长,最大信息层的深度越深.一天的周期其深度只有十几厘米.表中  $\tau$  是日变化周期,  $z$  是最大信息层的深度.企图只用气象卫星获得的几个物理量表示出普遍适用的解析模型是困难的.即便使用同一天的资料建立的统计模型,也只能适用其表层.由于  $K_s$  随时间变化,建立稳定的统计模型也是困难的.我们认为使用温度

滞后的不同时间的卫星资料与地面资料建立统计模型可使遥感土壤水分的深度加深(相当于加长周期)。例如,用 8 日卫星资料与 9 日 10cm 地面资料建模;8 日卫星资料与 10 日 20cm 地面资料建模……。为了检验以上推论的正确性,我们把单次资料建模与使用多次资料建模进行了比较,因为多次资料建立的模型包含了不同深度温度滞后信息。研究结果表明,多时次资料建立的模型,相关系数大大提高。

### 3 NOAA 气象卫星遥感土壤湿度的方法

#### 3.1 日较差 $\Delta T$ 的计算方法

由于地球的表面温度在 273—330K 之间(对土壤湿度监测而言),其普朗克辐射峰值在 8—12 $\mu\text{m}$  范围,所以采用 AVHRR 第 4 通道遥感陆表温度较为理想,计算 $\Delta T_0$ 、 $P$  时必须使用每天的最高温度及最低温度<sup>[1]</sup>。而实际上卫星遥感难以获得这两个值。地表温度的日变化的振幅并非按标准的正弦函数变化。最高温度出现在 14 时 30 分,而最低温度出现在 05 时 00 分左右(图略)。NOAA-11 卫星获得准最高地表温度和最低的地表温度时间分别是 14 时 30 分和 02 时 30 分。所以,NOAA-11 卫星只能获得准日较差。

用热惯量方法遥感土壤湿度的关键是获得日较差 $\Delta T$

下面介绍几种获得日较差的方法:

①对于上行轨道卫星(NOAA-9,NOAA-11)星下点都过同一地区。白天、夜间都是晴空时,用式(4)计算土壤水分状况。

②对于下行轨道卫星(NOAA-10,NOAA-12)早上 7 时获得遥感区域的晴空资料。上行卫星(NOAA-9,NOAA-11)下午 14 时获得晴空资料。可用  $T_{14} - T_{07}$  获得 $\Delta T$ ,用式(4)遥感土壤水分。

③只获得下行卫星(NOAA-10,12)07、18 时所遥感区域的晴空资料用下列的方法计算 $\Delta T$ <sup>[5]</sup>:

$$\Delta T = \frac{2T_{18} - T_7}{C_1 - C_2}$$

其中

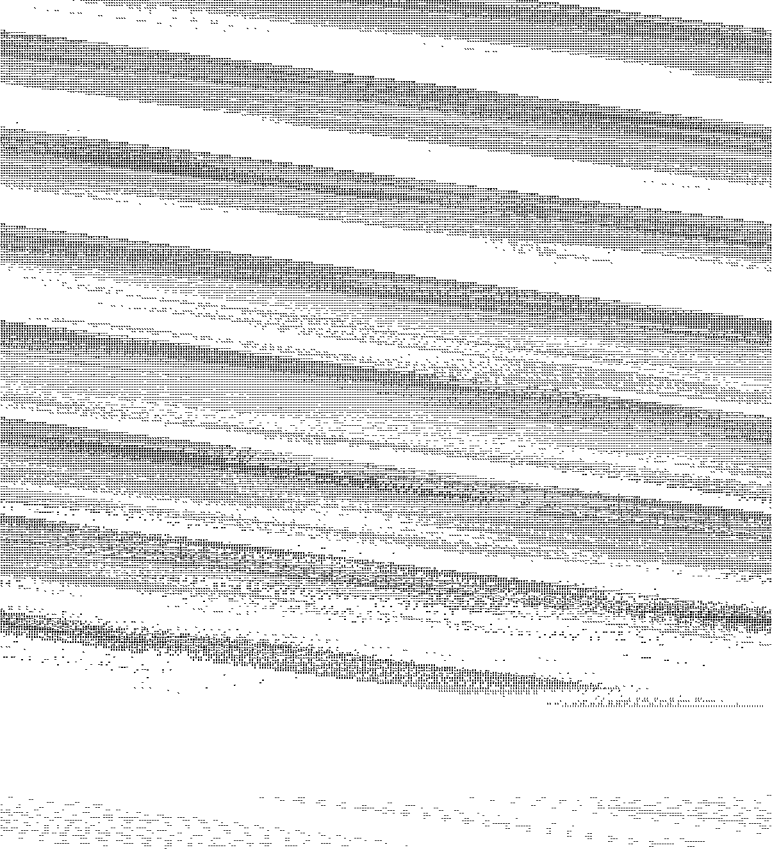
$$C_1 = 1 + \sin\left[\frac{\pi}{t_r} \times (7 - t_w) + 1.5\pi\right]$$

$$C_2 = 1 + \sin\left[\frac{\pi}{t_r} \times (18 - t_w) + 1.5\pi\right]$$

式中 $t_w$ 为日落的地方时, $t_r$ 为日出到出现最大温度的时间, $T_{18}$ 、 $T_7$ 分别是早上 7 时 00 分和下午 6 时 00 分的温度。在获得卫星资料的同时,收集 10cm,20cm,30cm,40cm,50cm 深度的土壤湿度资料,就可以建立统计模式。

#### 3.2 统计模型的建立

统计模型的建立可以是线性模型,对数模型,幂函数模型。表 2 是各种模型的拟合精度,其中  $y$  代表土壤湿度, $x$  代表热惯量  $P$ , $N$  为样本数, $r$  是相关系数。卫星资料取自 1990



分析以上不同时间建立的模式,可以看出随着卫星资料日期与地面观测资料日期延后天数的增加,其相关系数也随之提高,说明公式(6)提供的理论分析是正确的。

按幂函数模型计算出的 3 月 17 日 30cm 深度土壤湿度分布黑白图(图 2)。其中颜色越深,土壤水分含量越大,故水体(海洋、湖泊、河流)呈黑色;颜色越浅,含水量越小(图中最白部分)。用灰度等级表示出每个象元的含水量之后,再把相同灰度的象元数统计出来,即可计算出该图像范围的土壤湿度分布。这种方法既可以获得较深层土壤的水分信息,也可以获得浅层地质构造信息,在图中黄河古河道及郑州以南巨型纬向地质构造也由土壤水分高于周围地区而显示了出来。

## 4 结 论

(1)幂函数形式的统计模型,比目前广泛采用的线性模型好。

(2)使用考虑到土壤湿度滞后的不同时间的卫星资料与地面资料建立统计模型,可使遥感土壤湿度的深度加深(相当于加长周期)。其原因是多次资料建立的模型包含了不同深度的信息,相关系数大大提高。

(3)气象卫星的热惯量方法对于裸露土壤的水分监测有一定的应用前途,但由于诸多因素的影响难以获得稳定的遥感模式。主要影响因素有土壤表面温度的反演误差,最佳信息层与传导系数相关联以及植被覆盖的影响。对于土壤有植被覆盖时,卫星观测的最高温度将降低,最低温度将升高,使日较差变小,由此计算出的土壤水分比实际的高。目前干旱监测的用户(中央抗旱办公室,民政部救灾司,国务院生产办公室,中国人民保险公司等)急需土壤湿度遥感监测研究业务化,而该问题又是目前遥感应用研究的前沿问题,难度较大。为了满足业务应用,我们采取两项应急措施,首先由全国 200 多个农业气象站的土壤湿度观测资料与气象卫星资料分区建立统计模型,然后,用卫星资料计算出各地区的土壤湿度分布。这种方法克服不同时相模式的不稳定性,减少了误差。第二种方法,把当时的卫星资料代入历史上建立的各个地区的土壤湿度统计模型,从而计算出各地区土壤湿度分布。再用当时各个地区的农气站土壤湿度资料检验其系统偏差,然后再加以订正。

与此同时我们亦正开展其它干旱监测方法,如植被指数法,作物缺水系数法,植被供水指数法等。

## 参 考 文 献

- 1 肖乾广,陈维英.用 NOAA/AVHRR 资料监测土壤湿度.遥感信息,1990,5(1).
- 2 张向前,马嵩乃.热惯量图象研究.遥感信息,1986,1(2).
- 3 田国良等.热惯量方法监测土壤水分.遥感动态研究文集.北京:科学出版社出版,1990.122.
- 4 汤懋苍编著.理论气候学概论.北京:气象出版社出版,1990.238.
- 5 Robert G. Reeves. Manual of Remote Sensing. 1975 PRENTICE HALL, Englewood Cliffs New Jersey,271.

## A STUDY ON SOIL MOISTURE MONITORING USING NOAA SATELLITE

Xiao Qianguang Chen Weiyong Sheng Yongwei Li Jing

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

### Abstract

Meteorological satellite data have been widely used to study soil moisture, but there exist many problems. Solutions of these problems are put forward in the paper. Based on soil thermal characteristics and the concept of "maximum information layer in remote sensing of soil moisture" which is introduced in the paper, a multitemporal integrated soil moisture statistical model is established. In order to put this model in operation, several methods to estimate daily range of temperature are also discussed.

**Key words:** Soil moisture; Daily range of temperature; Remote sensing monitoring.

\*\*\*\*\*

### 第九届全国热带气旋科学讨论会 在南京召开

由中国气象学会天气与极地气象学委员会、南京大学大气科学系、南京气象学院、江苏省气象局和全国热带气旋及海洋气象专家工作组联合举办的第九届全国热带气旋科学讨论会于1994年6月1—4日在南京大学召开。

出席会议的有关单位共40个,代表113人。会议还特别邀请了在宁的部分老气象学家参加了开幕式并讲话。澳大利亚数值预报专家Dr. Noel Davidson也应邀出席会议并作了报告。

会议由第22届天气与极地气象学委员会主任陈联寿教授主持。会议共收到论文131篇,采用了大会综述报告、大会研究报告、分会研究报告、专题讨论及张贴论文等多种形式穿插进行方式。与会代表参与意识强、讨论热烈、交流广泛,会议取得了圆满成功。

会议重点交流了1990年以来由3个台风试验(SPECTRUM, TCM-90, TYPH00N-90)提供的加密观测资料所进行的深入研究的成果,尤其是SPECTRUM的研究成果,另外对“八五”攻关项目热带气旋研究的阶段性成果也进行了交流。内容有:热带气旋路径、结构、影响、业务系统以及警报和防灾方面的研究工作。会议认为,四年来,我国在热带气旋研究方面已取得较显著的进展,某些领域的研究水平已与国际水平相当。另外,对热带气旋研究方面的不足之处作了较详实的分析,并提出了可行的建议。

中国气科院  
(佳敏)