

遥感红外温度估算农田土壤 水分状况研究*

蔡焕杰¹ 熊运章² 李培德³

(1. 2 西北农业大学水利与建筑工程系, 陕西杨陵 · 712100)

(3 宁夏农学院水利系, 宁夏永宁 · 750105)

摘 要 根据宁夏吴忠春小麦田和甘肃省民勤县棉花田的实测资料, 对估算农田土壤水分状况的冠层温度模型进行了研究。结果表明采用冠层温度与气温差($T_c - T_a$)可较好地用于估算土壤含水量, 引入其他气象参数后模型的精度没有明显改进。

关键词 红外温度, 冠层与气温差, 土壤含水量

中图分类号 S153.75

土壤水分状况在农业、气象、水文及地理等学科都具有重要作用。土壤水分状况的监测历来受到人们的重视。传统的观测方法, 如取土烘干法、中子水分仪法及张力计方法等都是以点测量为基础, 它们存在有较大的取样误差。现代遥感方法在估算大面积土壤水分状况方面具有明显的优点。用红外测温技术估算土壤水分状况是近年才开始的, 还处于开始阶段, 但研究结果已经表明热红外温度信息可比较准确地用于估测土壤水分状况。

利用作物冠层温度估算农田土壤水分状况的研究国外开始于 70 年代^[1~4], 在国内这一领域的研究起步较晚, 目前研究还不多。本文的主要目的是研究在作物完全覆盖地面的条件下利用作物冠层温度估算农田土壤含水量。

1 试验方法

1.1 试验条件

田间试验分别于 1991 年 5 月至 6 月在宁夏回族自治区吴忠市扬水站(东经 106°10', 北纬 34°47')的春小麦试验田和 1991 年 7 月至 8 月在甘肃省民勤县大滩乡(东经 103°05', 北纬 38°40')的棉花田进行。两个试验区均布置 3 种不同的灌水处理, 即高水分、低水分和干旱处理。两地的地下水埋藏均较深, 土壤均为沙壤土。

1.2 观测仪器及项目

1) 采用红外测温仪(工作波段 8~14 μm , 视场角为 4.7°)从位于地面以上约 1.5 m 高度与地面约成 45°方向测定作物冠层温度。为消除太阳位置而造成的测量误差, 每个处理每次分别从 8 个不同方向观测, 取其平均值为该处理此次观测的作物冠层温度。

2) 采用阿兹曼通风干湿表在距地面 1.5 m 高度处测定空气的温度和湿度。

3) 太阳辐射观测: 用 DFY₁ 型直接辐射表测太阳直接辐射; 用 DFY₂ 型天空辐射表测

修改稿收到日期: 1993-07-26.

* 高等学校博士点基金资助课题。

太阳散射辐射及作物表面的反射辐射;用 DFY₅ 型净全辐射表测定作物表层的净辐射。

4)用三杯风速仪测定距地面 1.5 m 高度处的风速。上述 4 项观测同步进行,一般从早 8:00 开始至 20:00 结束,每小时观测一次,每次观测在北京时间正点进行。

5)土壤含水量的测定采用烘干法。吴忠春小麦田取土土层分别为 0~10,10~30,30~50,50~70,70~90 cm。该试验区位于新开发灌区,表层土壤质地不均,为了正确反映土壤水分与冠层温度之间的关系,土壤水分状况用相对土壤含水量(土壤含水量与田间持水量之比)来表示。民勤棉花田从地表开始每 20 cm 取土一次至 100 cm,土壤含水量用占干土重百分数表示。

2 理论基础及模型

2.1 能量平衡方程

田间能量平衡方程可用下式表示: $R_n - G - H - \lambda E = 0$ (1)

式中: R_n 为作物表面接收的净辐射通量; G 为土壤热通量; H 和 λE 分别为显热和潜热通量;上述各项单位均为 $W \cdot m^{-2}$ 。当作物完全覆盖地面后,土壤热通量 G 很小,可忽略不计。则能量平衡方程式(1)可简化为: $R_n - H - \lambda E = 0$ (2)

H 和 λE 取决于作物冠层温度(T_c)、气温(T_a)、风速(WS)和空气湿度(用空气相对湿度或饱和差表示)。在作物覆盖的农田中,潜热通量(λE)是能量消耗的一个主要方式。由于作物蒸散所需要的水分由土壤提供,因此,随着土壤含水量的增加,蒸散冷却作用加大,作物冠层温度降低。反之作物冠层温度升高。所以(2)式就反映了土壤含水量估算模型中各变量之间的关系,为模型的建立提供了理论基础。

2.2 土壤含水量估算模型

由上面的分析可知,土壤含水量(SWC)是作物冠层温度与气温差值($T_c - T_a$),净辐射通量(R_n),风速(WS)和相对湿度(RH)的函数。因此,由方程(2)可得出如下的表达式。

$$SWC = f(T_c - T_a, R_n, WS, RH) \quad (3)$$

在一般情况下,式(3)的函数形式 $f(T_c - T_a, R_n, WS, RH)$ 是不知道的。我们可以利用多元回归技术,根据实测资料估算回归系数(a_i),建立回归方程。在本研究中我们采用了下述几种模型:

$$\text{模型 1: } SWC = a_0 + a_1(T_c - T_a) \quad (4)$$

$$\text{模型 2: } SWC = a_0 + a_1(T_c - T_a) + a_2 \cdot R_n \quad (5)$$

$$\text{模型 3: } SWC = a_0 + a_1(T_c - T_a) + a_2 \cdot R_n + a_3 \cdot RH \quad (6)$$

$$\text{模型 4: } SWC = a_0 + a_1(T_c - T_a) + a_2 \cdot R_n + a_3 \cdot RH + a_4 \cdot WS \quad (7)$$

式(4)~(7)中的 a_0, a_1, a_2, a_3 和 a_4 均为回归系数,其它符号意义同前。

3 结果与讨论:

3.1 一天中不同时间作物冠层温度与土壤含水量之间的关系

用作物冠层温度估算农田土壤水分状况的一个很重要问题是测定作物冠层温度的适宜时间。Ehrler 等人^[5]认为测定($T_c - T_a$)的最好时间为 14:00;Reginato 等人^[6]采用的测定时间为 12:30;张仁华^[7]则认为 13:00~13:30 为最佳时间。Myhre^[8]认为美国佛罗里达

的最好时间为 11:00~14:00。Huanjie 等^[9]的研究显示当地时间 12:00~15:00 为测定 ($T_c - T_a$) 的适宜时间。表 1 为根据一天中不同时期的实测数据按模型建立的估算两种作物农田土壤含水量的经验模型。由该表可以看出一天中上午土壤含水量与作物冠层温度之间的相关系数最低,午后相关系数最大,日落前 2~3 h 又减少。产生这一结果的原因是由于上午的蒸腾速率较低,作物冠层温度对土壤水分状况相对不太敏感;午后蒸腾强度大,不同土壤水分状况下的作物冠层温度差异最大,当地时间 15:00 以后随着净辐射通量的快速降低,作物冠层温度的下降也很快,此时不同土壤水分条件下的 T_c 差异又减小。因此,为了利用作物冠层温度准确地估算土壤含水量,参数的测定时间应为当地时间的 12:00~15:00。

表 1 一天中不同时间模型 1 的回归结果

地点	作物	时间范围	a_0	a_1	相关系数	F 检验值	样本数	备 注
吴 忠	春小麦	7:00~11:00	68.22	-5.146	0.4733	41.5	147	90 cm 土层平均相对土壤含水量
		12:00~15:00	63.71	-7.723	0.840	136.6	59	
		16:00~19:00	54.88	-7.936	0.6271	24.0	39	
		7:00~19:00	64.90	-4.899	0.5266	110.9	291	
民勤棉花		7:00~11:00	17.12	-0.247	0.2235	1.8	36	100 cm 土层土壤含水量(干土重%)
		12:00~15:00	13.50	-1.465	0.8564	88.0	34	
		16:00~19:00	16.10	-0.376	0.2755	1.3	18	
		7:00~19:00	15.64	-0.669	0.5153	31.8	90	

注:表中时间为当地时间

3.2 不同深度土层的平均土壤含水量回归模型分析

根据实测资料,按模型 1~4 分别建立了吴忠春小麦田不同深度土层的平均相对土壤含水量的估算模型,见表 2。由表 2 我们可以发现随着土层深度的增加,各种模型的相关系数均逐步增大。如模型 1 的相关系数由 10 cm 的 0.685 8 增大到 90 cm 的 0.840。这一结果显示出 $T_c - T_a$ 与 90 cm 土层内的平均土壤含水量之间的关系比它与较浅土层的关系更为密切。该结果与 Myhre 等人^[8]的结果是一致的。

当然由于试验条件的限制,我们没有测定更深土层的土壤含水量, $T_c - T_a$ 与更深一些土层的平均土壤含水量之间的关系未能得到。虽然如此,对于春小麦田,我们认为取 90 cm 深度土层来研究作物需水规律及评价其水分状况是可以的。

3.3 几种模型的分析与比较

由表 2 估算土壤含水量 4 种模型的相关系数的变化可以发现,仅采用 ($T_c - T_a$) 的模型 1 与引入其他参度量(净辐射、相对温度、风速)后的模型 2~4 相比,随着模型变量的增多,模型的相关系数逐步稍有增大,剩余标准差也有所减少,但它们的变化都不大。根据民勤县棉花试验田的实测资料的回归分析也得出了类似的结果,见表 3。

表 2 吴忠春小麦田不同深度土层平均土壤相对含水量的回归模型

土层深度 (cm)	模型	回归系数					相关系数	F 检验值	显著水平
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4			
10	1	57.83	-10.052 8				0.685 8	50.62	极显著
	2	53.08	-10.202 5	0.007 5			0.686 3	24.94	
	3	35.40	-11.0439	0.007 4	0.356 5		0.694 8	17.11	
	4	40.70	-11.939 7	0.012 6	0.371 2	-4.309 2	0.703 6	13.24	
30	1	64.46	-8.811 5				0.729 0	64.67	极显著
	2	62.85	-8.862 2	0.002 5			0.729 1	31.78	
	3	50.26	-9.461 8	0.002 5	0.254 1		0.735 1	21.56	
	4	54.63	-10.200 3	0.006 7	0.266 2	-3.552 3	0.743 4	16.68	
50	1	62.70	-8.373 8				0.765 7	80.78	极显著
	2	61.07	-8.425	0.002 6			0.765 8	39.71	
	3	43.37	-9.267 9	0.002 5	0.357 1		0.779 5	28.39	
	4	47.25	-9.923 6	0.006 3	0.367 9	-3.154 1	0.787 0	21.97	
70	1	61.73	-7.528 5				0.783 4	90.56	极显著
	2	60.82	-7.557 2	0.001 4			0.783 4	44.50	
	3	43.20	-8.396	0.001 4	0.355 4		0.800 6	32.72	
	4	46.26	-8.911 8	0.004 3	0.363 9	-2.481 3	0.865	25.12	
90	1	63.71	-7.723				0.840 0	136.56	极显著
	2	64.40	-7.701 2	-0.001 1			0.840	67.10	
	3	50.27	-8.374	-0.001 2	0.285 1		0.851 2	48.24	
	4	53.49	-8.919 4	0.002 0	0.294 0	-2.623 9	0.858 0	37.68	

表 3 民勤棉花田 100 cm 土层平均土壤含水量回归模型

模 型	回归系数					相关系数	F 检验值	显著水平
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4			
1	13.50	-1.465 3				0.856 4	88.03	极显著
2	13.14	-1.410 3	0.000 7			0.857 2	42.94	
3	11.49	-1.429 1	0.001 4	0.036 9		0.859 0	28.16	
4	5.10	-1.475 8	0.007 0	0.164	-1.095	0.881 3	25.22	

通过对模型 2~4 的逐步回归分析结果也表明,多数情况下,净辐射、相对湿度和风速对土壤含水量的估算模型影响不大。利用上述变量进行的非线性逐步回归分析亦显示出非线性项不显著。因此,在一般情况下,土壤含水量与 (T_c-T_a) 之间存在比较好的线性关系(见附图)。

得出上述结果是因为作物冠层温度反映了作物和大气间的能量交换,它是各种环境因素的综合体现。在一定的作物和土壤水分条件下, (T_c-T_a) 主要受气象因素的影响,因此,净辐射、相对湿度和风速在很大程度上可由 (T_c-T_a) 来反映。

这里必须说明的是上述分析所建立的模型是根据晴天(西北干旱地区大部分时间均可满足)条件下的实测资料得到的。如果不考虑天气条件,特别是不稳定天气,模型的精度会明显降低。

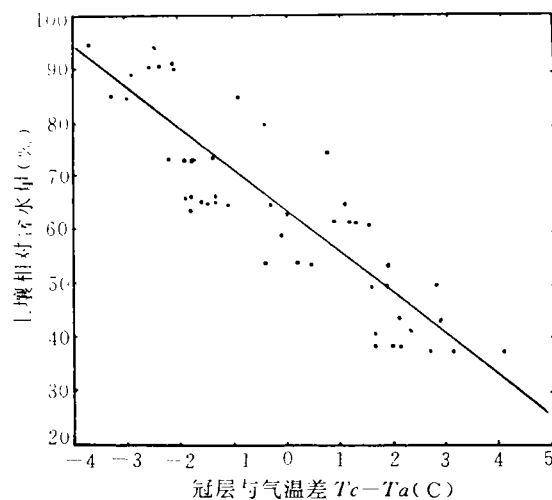
4 结 论

遥感作物冠层温度可用于估算作物完全覆盖地面条件下的农田土壤含水量。根据吴忠春小麦和民勤县棉花试验田的实测资料分析,得出了以下几点结论:

1)用作物冠层温度估算土壤含水量模型的精度在一天中的不同时间是有差异的,参数测定的适宜时间为当地时间 12:00~15:00。

2)不同深度土层的平均土壤含水量与冠层—气温差($T_c - T_a$)之间存在着良好的线性关系,在 100 cm 土层内,随着土层深度的增加,相关系数增大。

3)引入净辐射,相对湿度和风速的多变量模型 2~4 与仅采用($T_c - T_a$)的模型 1 相比,模型精度没有明显改进。



附图 吴忠春小麦 90 cm 土层平均土壤相对含水量与 12:00~15:00 测定($T_c - T_a$)之间的关系

参 考 文 献

- 1 Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Research*, 1977, 13(3): 651~656
- 2 Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Remote sensing of crop yield. *Science*, 1977, 19(6): 19~25
- 3 Idso S B, Jackson R D, Pinter Jr P J et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24: 45~55
- 4 Jackson R D, Idso S B, Reginato R J et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17(4): 1133~1138
- 5 Ehrlir W L, Idso S B, Jackson R D et al. Diurnal changes in plant water potential and canopy temperature as affected by drought. *Agronomy Journal*, 1978, 70: 998~1004
- 6 Reginato R J, Howe J. Irrigation scheduling using crop indicators. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1985, 111(2): 125~133
- 7 张仁华. 利用作物冠层表面温度的空间变率推算作物的供水状况. 见: 中国科学院禹城综合试验站年报(1988—1990). 北京: 气象出版社, 1991, 40~45
- 8 Myhre B E, Shih S. Using infrared thermometry to estimate soil water content for a sandy soil. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(5): 1479~1486
- 9 Cai Huanjie, Xiong Yunzhang. Opportune time for quantifying crop water status using canopy temperature. In: *Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering*, Beijing, 1992

Remote Sensing of Infrared Canopy Temperature to Estimate Soil Water Status

Cai Huanjie Xiong Yunzhang

*(The Department of Water Conservancy and Architecture, Northwestern Agricultural
University, Yangling, Shaanxi, 712100)*

Li Peide

(Ningxia Agricultural College, Yongning, Ningxia, 750105)

Abstract Based on the field experiment of spring wheat at Wuzhong, Ningxia Hui Autonomous Region, and cotton at Minqin county, Gansu Province, several models of using canopy temperature to estimate soil water content were studied. The results showed that soil water content can be estimated successfully by using canopy-minus-air temperature, but when other meteorological factors were introduced into the models, there was no much change in the accuracy of the models.

Key Words infrared canopy temperature, canopy-air temperature difference, soil water content