

作物和土壤旱情的温差模型*

李韵珠 陆锦文 吕梅

(北京农业大学)

史美胡 牛德贵 赵秀英

(河北邯郸地区气象局)

提 要

本文根据邯郸地区的观测资料,建立了小麦、玉米和棉花地的土壤相对含水量和14时冠气温差 ($T_c - T_a$) 的作物旱情温差模型 $RW = a + b(T_c - T_a)_{14}$ 和裸地土壤相对含水量和14时土气温差 ($T_s - T_a$) 的土壤旱情温差模型 $RW = a' + b'(T_s - T_a)_{14}$ 。经检验,平均相对误差小于20%,适于灌溉管理和大面积监测旱情之用,具有快速、简便的特点。本文还提出了冠层温度的覆盖度校正方法和进行早涝等级划分的温差指标。

作物旱情和土壤干旱状况一向是农业生产和灌溉管理方面的重要研究课题,但缺乏快速、简便的监测旱情的手段和方法。植物水分亏缺导致蒸腾降低和叶温升高的现象早已被证实。Jackson(1981⁽¹⁾,1982⁽²⁾)认为作物群体的冠层温度与蒸腾和水分亏缺有着密切的关系,并提出了作物水分亏缺指数(CWSI)的概念。我国自80年代开始应用表面温度和旱情的关系来估算麦田蒸散和土壤水分⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。

本文主要研究在较大面积范围内应用表面温度建立以冠气温差和土气温差为基础的作物和土壤旱情温差模型,以便为监测旱情和灌溉管理服务。

一、原 理

作物冠层温度 (T_c) 与大气温度 (T_a) 的差值和旱情的关系可以根据热量平衡原理导出。热量平衡方程如下式,

$$R_n = G + H + LE \quad (1)$$

式中 R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, H 为冠层到空气的显热通量, LE 为潜热通量。式中热通量均以 $W \cdot m^{-2}$ 为单位。

显热通量 H 可以用下式表示,

$$H = \rho c_p (T_c - T_a) / r_a \quad (2)$$

式中 ρ 为空气密度 ($kg \cdot m^{-3}$), c_p 为空气比热 ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), r_a 为空气动力学阻抗 ($s \cdot m^{-1}$)。

潜热通量 LE 可以用 Monteith 公式表示, $LE = \rho c_p (e_c^* - e_a) / [\gamma(r_a + r_c)]$ (3)

式中 e_c^* 为 T_c 情况下的饱和水汽压, e_a 为空气水汽压, γ 为干湿表常数 ($Pa/^\circ C$), r_c 为冠层对水汽传输的阻抗 ($s \cdot m^{-1}$)。

联立(1)-(3)式,忽略 G 项,并引入

$$\Delta = \frac{e_c^* - e_a}{T_c - T_a} (Pa/^\circ C), \text{可以导出下式,}$$

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} - \frac{e_c^* - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (4)$$

*国家自然科学基金资助项目和河北省项目。

式中 e_a^* 为 T_a 情况下的饱和水汽压。

对于裸地表土温度(T_s)与空气温度(T_a)的差值与各因子的关系与有作物情况下的原理相同,只是表面温度不是作物冠层而是土壤表面,因此下式成立,

$$T_s - T_a = \frac{r_a Rn}{\rho c_p} \cdot \frac{r(1+r_s/r_a)}{\Delta + \gamma(1+r_s/r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma(1+r_s/r_a)} \quad (5)$$

式中 r_s 为表土对水汽传输的阻抗($s \cdot m^{-1}$)。

下面以(4)式为代表来分析。

根据Jackson (1981)[1]的分析,如供水不足,则 $r_c \rightarrow \infty$, (4)式成以下形式,

$$T_c - T_a = \frac{r_a Rn}{\rho c_p} \quad (6)$$

当供水充足时, $r_c = 0$, 则

$$T_c - T_a = \frac{r_a Rn}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma} \quad (7)$$

(6)式和(7)式说明,当土壤水分不足以供应作物需要时, ($e_a^* - e_a$) 已不再影响冠气温差 ($T_c - T_a$), ($T_c - T_a$) 只受 Rn 和 r_a 的影响。当土壤水分充足时, $r_c = 0$, ($T_c - T_a$) 除受 Rn 和 r_a 影响外, 还受 ($e_a^* - e_a$) 的影响。由此可见, ($T_c - T_a$) 的变化与水分条件有密切关系。但在水分状况相同时 (设 r_c 相同情况下), 以上因子仍一定程度上影响 ($T_c - T_a$)。那么, 忽略其他因子的影响, 建立简化的温差模型 $RW = a + b(T_c - T_a)$ 是否可行? Rn , r_a 和 ($e_a^* - e_a$) 对 ($T_c - T_a$) 的影响程度如何? 下面以邯郸地区气象条件为例, 对各因子的重要性进行分析。

以 Rn , ($e_a^* - e_a$), r_c 和 r_a 为自变量 X_1 , X_2 , X_3 和 X_4 。取值范围根据邯郸多年气象资料统计所得的每月日平均值变幅。设 Rn 为50—200 $W \cdot m^{-2}$, ($e_a^* - e_a$) 为2—14 hPa, r_c 范围为0—500 $s \cdot m^{-1}$, r_a 为10—60 $s \cdot m^{-1}$ 。根据(4), (6)和(7)式计算得到

($T_c - T_a$), 以 ($T_c - T_a$) 为因变量 y , 作多元回归, 得以下回归系数:

$$b_0 = -1.05, b_1 = 5.11 \times 10^{-3}, b_2 = -1.54 \times 10^{-3}, b_3 = 4.94 \times 10^{-3}, b_4 = 2.46 \times 10^{-2}, n = 44, F = 24.25, \text{复相关系数 } R = 0.846.$$

标准化后, 得标准回归系数如下,

$$b_1 = 0.13, b_2 = -0.31, b_3 = 0.71, b_4 = 0.28$$

4个标准回归系数中以 r_c 的系数 b_3 最高, 为0.71。说明在影响($T_c - T_a$)值的诸变量中, 以 r_c 的影响最大。

以上因子重要性分析结果也同样适用于对 ($T_s - T_a$) 影响因子的分析。

r_c 或 r_s 与土壤干湿状况有密切关系。因此, 建立以 ($T_c - T_a$) 或 ($T_s - T_a$) 为自变量, 土壤相对含水量 (土壤含水量/田间持水量) 为因变量的温差模型是可行的。但其适用范围有一定限度。因在作物水分充分满足以后, 或干旱达一定程度时, 水分已不再是影响温差的主要因子了。本项研究在模型建立时, 资料的取舍大致以1—0.3为限, 即上限为田间持水量, 下限在萎蔫系数左右。

二、研究条件和方法

以河北省邯郸地区 (除山区外) 为研究范围。选择武安、肥乡、曲周和大名4个县为基点, 共设观测区8个。土壤质地有壤土、粘土和砂土, 以壤土分布较广。观测的主要作物有小麦 (6个观测区)、玉米 (5个区)、棉花 (4个区)。此外, 裸地观测区为5个。

1. 观测内容和方法

冠层温度(T_c): 由冠层上方1m处用红外测温仪探头垂直向下测定。叶面温度(T_l): 小麦, 对准叶丛; 棉花, 对准中上部叶片; 玉米, 测定上部第二叶, 测定时均应避免测到背景温度; 空气温度(T_a), 离地面1.5m高观测; 行间土壤温度(T_s'), 离地面0.1米左右; 裸地土壤14时温度(T_{sh})

和6时温度 (T_{s1}) 均由离地面1m高处向下测定; 作物覆盖度用目测法; 土壤含水量用取土烘干法测定, 分6层, 0—5、5—10、10—20、20—30、30—40、40—50cm。同时记载天气状况、灌溉状况和作物生长发育阶段等。

以上冠层、土表和叶面温度都用BAU-1型红外测温仪测定, 其滤波窗口近似为6.0—15.5 μm , 测量范围为-10—50 $^{\circ}\text{C}$, 分辨率为0.1 $^{\circ}\text{C}$, 测量精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。每个测点的红外温度测定均为9次重复。观测时要求天气晴朗, 云量少(约2以下), 风速小。观测时间为13:30—14:30。

观测时期为1990—1991年的各种作物的主要生长季节, 裸土为春播和秋播前后。

2. 覆盖度校正方法

测定作物冠层温度时, 不可避免地包含行间裸露土壤的温度, 这样, 在作物不同生育阶段覆盖度不同时, 行间裸土所占比例不同, 将会影响冠层温度的可比性。因此, 覆盖度的校正是一个重要问题。

本文采用的方法是, 首先假定叶片温度反映了不包括行间裸土的作物温度, 则 $T_c - T_l$ 就是由覆盖度引起的温度差值。作出不同作物($T_c - T_l$)与覆盖度C(%)的回归方程, 得

$$T_c - T_l = A + B \times C \quad (8)$$

$$T_c' = A + B \times C + T_l \quad (9)$$

式中 T_c' 为经校正过的冠层温度。将要求校正达到的覆盖度, 如90、80或75等代入(2)式中的C, 即可得到覆盖度为90%(或80, 75%)情况下的 T_c' 。

在应用遥感技术情况下, T_l 不易获得。为了避免应用 T_l 数据, 再作一次转换, 即作出($T_c - T_c'$)与C的关系, 得

$$T_c - T_c' = a + b \times c \quad (10)$$

$$T_c'' = T_c - (a + b \times c) \quad (11)$$

式中 T_c'' 为经第二次校正后的冠层温度。根据(11)式, 将实际覆盖度代入C, 即可得

到 T_c'' 。

本文将冠层温度校正到覆盖度为75%和90%两种, 以 $T_c''75$ 和 $T_c''90$ 代表校正后的冠层温度。因篇幅关系, 下面只列出 $T_c''90$ 的结果。

三、结果

1. 有作物覆盖下的旱情温差模型

(1) 几种作物的旱情温差模型

根据1990和1991两年观测资料统计, 所得各作物的冠层温度覆盖度校对方程如下,

$$\text{小麦: } T_c''90 = T_c - 4.552 + 0.053(C)$$

$$\text{棉花: } T_c''90 = T_c - 4.147 + 0.050(C)$$

$$\text{玉米: } T_c''90 = T_c - 4.037 + 0.050(C)$$

各作物地不同土层厚度的土壤相对含水量 RW 分别与未经校正的($T_c - T_a$)、经校正的($T_c''90 - T_a$)和叶气温差($T_l - T_a$)的回归统计结果, 列于表1。表1内的相关系数均符合0.01显著水平。 S_y 为 y 的标准差。

由表1可以得到以下结果:

经覆盖度校正后的旱情温差模型与未校正的相比, 斜率不同, 相关系数稍高, S_y 值较小。从表4的检验效果看, 平均相对误差等均小, 优于未校正覆盖度的温差模型。

RW 与叶气温差($T_l - T_a$)模型的相关系数小于冠气温差模型。这与叶片温度测定的是单株叶丛或单个叶片, 个体差异和特殊性使之在空间的变异性较大, 代表性有局限有关。

以上规律在3种作物的旱情温差模型中是一致的。可以说明应用覆盖度校正后的($T_c''90 - T_a$)模型最佳。

由表1可知, 3种作物的旱情温差模型的截距与斜率有所差别。除各作物的生长季节不同, 天气状况有差异的原因外, 作物本身的水分生理特性也有影响。

(2) 不同年份的旱情温差模型比较

3种作物1990和1991年的分模型与两年的总模型比较, 如图1所示。两年的主要作

表1 作物旱情温差模型

模式号	小麦, n=154			棉花, n=129			玉米, n=87		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	a								
RW(0-5)	0.553	0.582	0.517	0.603	0.626	0.591	0.713	0.756	0.712
RW(0-10)	0.600	0.623	0.561	0.624	0.655	0.624	0.750	0.785	0.749
RW(0-20)	0.641	0.662	0.602	0.653	0.678	0.649	0.764	0.794	0.764
RW(0-50)	0.695	0.713	0.663	0.684	0.698	0.676	0.792	0.817	0.791
	-b								
RW(0-5)	0.052	0.049	0.057	0.033	0.030	0.029	0.051	0.037	0.042
RW(0-10)	0.046	0.043	0.051	0.030	0.026	0.026	0.041	0.030	0.033
RW(0-20)	0.039	0.035	0.046	0.028	0.023	0.024	0.036	0.026	0.028
RW(0-50)	0.029	0.024	0.036	0.020	0.015	0.018	0.029	0.022	0.023
	-1								
RW(0-5)	0.659	0.652	0.597	0.576	0.550	0.447	0.588	0.511	0.487
RW(0-10)	0.624	0.607	0.579	0.570	0.521	0.443	0.570	0.499	0.459
RW(0-20)	0.587	0.549	0.573	0.553	0.481	0.427	0.569	0.498	0.447
RW(0-50)	0.486	0.423	0.495	0.446	0.363	0.363	0.502	0.455	0.402
	Sy								
RW(0-5)	0.161	0.162	0.171	0.155	0.158	0.170	0.162	0.172	0.175
RW(0-10)	0.156	0.153	0.162	0.141	0.147	0.154	0.138	0.146	0.149
RW(0-20)	0.146	0.151	0.148	0.136	0.143	0.147	0.129	0.126	0.130
RW(0-50)	0.141	0.146	0.140	0.130	0.135	0.135	0.115	0.118	0.121

* 模式: 1. $RW=a+b(Tc^{90}-Ta)$; 2. $RW=a+b(Tc-Ta)$; 3. $RW=a+b(Tl-Ta)$

物生长季节的降雨量(以肥乡县资料为例)列于表2。

表2 1990和1991年生长季节雨量比较

年份	1990		1991	
	2-5月	7-9月	2-5月	7-9月
降雨量(mm)	207.0	403.7	125.2	252.5

如图1所示, 3种作物中, 玉米的两年分模型基本一致, 但小麦与棉花两年有所差别, 小麦相差不大。可能与这两年的降雨状况等气象条件不同有关。但两年的总模型仍符合统计要求, 可以应用。虽然90, 91两年情况不能代表所有降雨年型, 但仅就这两年的不同降雨量来看, 模型的适应性较宽。

(3) 不同土壤质地和不同层厚的旱情温差模型比较

图2表示小麦、棉花不同土壤质地的模型比较。3种质地的模型有所差别。说明虽然应用了土壤相对含水量来消除由于土壤质地不同带来的影响, 但仍未能全部消除, 尤其是粘土模型, 相关系数较低。其原因可能与粘土导水率低, 不易得到田间持水量的明确界限数据有关。再加上观测点位置不固

定, 土壤层次和质地 in 空间分布的变异性以及粘土和砂土观测样本较少, 这些原因都可能导致差异。但是该地区大面积分布的是壤土, 因此, 以壤土为主, 包括3种质地在内的总模型在监测作物旱情中是可以应用的。

2. 裸地土壤旱情温差模型

根据6个观测区数据的统计, 得到土壤相对含水量RW与土气温差($Tsh-Ta$)模型, 并与RW和最高最低土壤温差($Tsh-Tsl$)模型相比较, 结果列于表3。表3中90和91表示年代, 统计资料表明, 均达到0.01显著水平, 并可得到以下结果。

(1) RW与($Tsh-Ta$)模型的相关系数高于RW与($Tsh-Tsl$)模型。斜率和截距也差别较大。

(2) 两年的分模型在斜率和相关系数方面有一些差别, 但相差不大。0-20cm的基本一致。

(3) 不同土层厚度模型的规律与有作物覆盖下的情况相似。

3. 模型的检验

对作物旱情温差模型的检验是在两年观测资料中随机选留一部分样本进行的。根据

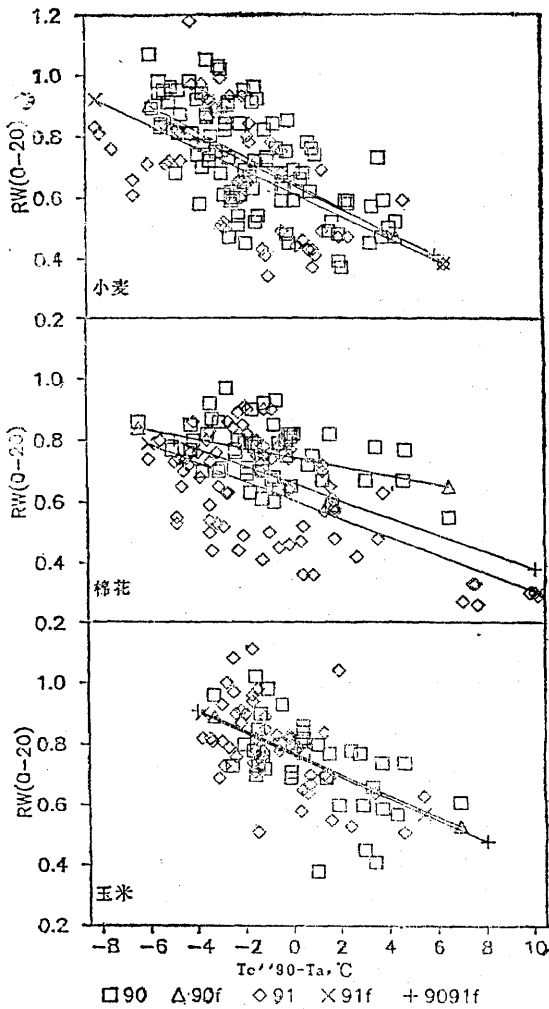


图1 作物地不同年份旱情温差模型
90, 91表示年代, f为拟合线

$RW-(Tc''90-Ta)$ 模型, 用实测冠层温度校正后的 $(Tc''90-Ta)$ 计算出RW, 与实测RW相比较。裸地土壤旱情模型则用 $RW-(Tsh-Ta)$ 模型, 用1991年秋季观测资料进行检验。此外, 还列出了小麦地 $RW-(Tc-Ta)$ 模型检验结果, 以比较覆盖度校正的结果。检验结果列于表4。

表4所列检验结果表明, 不论作物地或裸地的旱情温差模型, 其平均相对误差均在20%以下, 从11.6到18.2%。相对误差

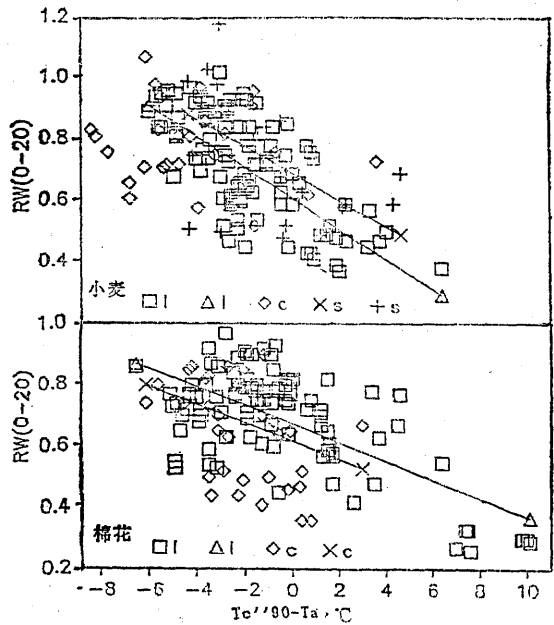


图2 作物地不同质地土壤旱情温差模型
l壤土, c黏土, s砂土, f拟合线

表3 裸地旱情温差模型RW
 $= a + b(Ts - Ta)$

模式号	Tsh-Ta			
	1990	1991	3091	9091
	a			
RW(0-5)	0.852	0.727	0.384	1.015
RW(0-10)	0.872	0.791	0.360	0.994
RW(0-20)	0.873	0.851	0.874	0.951
RW(0-50)	0.889	0.855	0.867	0.999
	b			
RW(0-5)	0.035	0.023	0.033	0.016
RW(0-10)	0.028	0.023	0.028	0.013
RW(0-20)	0.021	0.023	0.022	0.009
RW(0-50)	0.013	0.018	0.017	0.006
	c			
RW(0-5)	0.890	0.494	0.685	0.455
RW(0-10)	0.680	0.513	0.667	0.416
RW(0-20)	0.589	0.515	0.588	0.330
RW(0-50)	0.353	0.450	0.439	0.210
	s			
RW(0-5)	0.136	0.134	0.136	0.166
RW(0-10)	0.121	0.123	0.122	0.149
RW(0-20)	0.117	0.117	0.117	0.137
RW(0-50)	0.132	0.123	0.131	0.143
	n			
	142	62	204	204

<20%者占总检验数的75%左右。<25%者占84%左右。经覆盖度校正的小麦地模型检

表 4 旱情温差模型的检验

	RW平均相对误差%	占总检验数%		检验数
		RE<20%	RE<25%	
小麦	13.1	71.7	83.3	60
棉花	18.2	69.6	80.4	56
玉米	11.6	85.0	92.5	40
裸地	14.5	75.7	80.0	140
小麦RW (Tc-Ta)	16.4	68.3	73.5	60

* RW为相对误差

验结果均优于未校正者。根据大面积旱情监测的等级精度而言,模式是可以满足要求的。

三、讨论

关于以上旱情温差模型的应用,提出以下的看法。

1. 模型的选用

覆盖度校正究竟选用90%,还是其他为好,可视作物密植程度决定。建议小麦可采用 $(Tc^{90}-Ta)$ 模型,棉花、玉米则视具体情况而定。当作物覆盖度已大于75% (或90%等) 时,则Tc可不必校正。

从土层厚度来说,虽然0—5, 0—10cm的模型相关系数大于0—20或0—50cm,但表层水分变化较大,不稳定。0—50cm模型的r值又较低。因此选用0—20cm的模型较好。

2. 旱涝等级划分指标

用红外测温仪或用卫星磁带资料获得表面温度后,可以用以下几种指标确定旱涝状况。一种是用土壤相对含水量,另一种是直接用温差作为指标,不必换算成土壤相对含水量。

根据本文研究成果,并参考过去经验,提出以下旱涝等级划分指标(表5)。

这种土壤相对含水量指标和相应的温差指标在应用时可根据不同作物和不同生育阶段作适当调整。

*河南棉田旱情调查资料由刘学著、秦耀东等提供。

表 5 旱涝等级划分指标

	旱	偏旱	适宜	偏湿一涝
土壤相对含水量	<0.6	6.6-0.7	0.7-0.9	>0.9
$(Tc^{90}-Ta), ^\circ C$				
小麦	>1.2	1.2--1.2	-1.2--6.0	<-6.0
棉花	>2.1	2.1--1.5	-1.5--8.6	<-8.6
玉米	>4.5	4.5--1.8	1.8--3.8	<-3.8
$(Tc-Ta), ^\circ C$				
小麦	>1.8	1.8--1.1	-1.1--6.8	<-6.8
棉花	>3.4	3.4--1.0	-1.0--9.7	<-9.7
玉米	>7.5	7.5--3.6	3.6--4.1	<-4.1
$(Tch-Ta), ^\circ C$	>12.5	12.5--7.9	7.9--1.2	<-1.2

3. 应用情况和应注意的问题

1991年夏在河南棉田进行旱情调查*, 4块棉田共12个层次,应用旱情温差模型, RW的相对误差平均为10.6%。相对误差<20%者占总检验数的91.7%, <25%者为100%。用温差指标估测旱情,与实际旱情符合较好。实际应用结果说明模型可以满足大面积旱情监测的要求。

应用时应注意观测时的天气状况。在有作物情况下,应注意避免刚灌溉过的地块,以免作物对水分反应的滞后性所带来的误差。此外,还应注意模型适用的土壤水分范围。据研究,最适用的相对含水量范围为0.4—0.9左右,过干和过湿情况下, RW与冠气温差或土气温差无一定关系。

参考文献

- (1) Jackson, R.D. et al., Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17, 1133-1138, 1981.
- (2) Jackson, R.D., Canopy temperature and crop water stress. Advanced in Irrigation. 1, 43-85, 1982.
- (3) 田国良等, 用NOAA-AVHRR数字图象和地面气象站资料估算麦田的蒸散和土壤水分、遥感动态研究, 科学出版社, 161-176, 1990.

- (4) 刘国祥,作物植被覆盖地土壤湿度的红外遥感监测, 京津冀冬小麦遥感估产试验研究论文集, 138-145, 1987.
- (5) 刘兴文、马勇进, 应用热惯量编制土壤水份图及土壤水分探测效果, 土壤学报, Vol.24, No.3, 272-279, 1987.
- (6) 李付琴等, 用每日一次的热红外温度估算日蒸散, 遥感动态研究, 科学出版社, 151-160, 1990.
- (7) 李付琴等, 植被条件下遥感监测土壤水分的方法探讨—田间实验部分, 遥感动态研究, 科学出版社, 151-160 1990.
- (8) 唐登银, 一种以能量平衡为基础的干旱指数, 地理研究, Vol.6, No.2, 21-30, 1987.

The temperature-difference models for crop and soil water stress

Li Yunzhu Lu Jinwen Lu Mei

(Beijing Agricultural University)

Shi Meihu Niu Degui Zhao Xiuying

(Handan Bureau of Meteorology)

Abstract

The canopy-air temperature-difference models, $RW = a + b(T_c - T_a)$, for wheat, corn and cotton, and the soil-air temperature difference model, $RW = a' + b'(T_s - T_a)$, for bare soil were developed based on the data observed in Handan area in 1990 and 1991. The average relative error was less than 20%. The models are simple and easy to be used for irrigation management and drought monitoring over large areas. The method of crop coverage calibration for the canopy temperature and the temperature-difference indexes of the drought grades were also presented in this paper.