

# 农田作物层温度初步研究—— 以冬小麦、夏玉米为例

董 振 国

(中国科学院地理研究所)

## 摘 要

观测表明,充分供水的麦田作物层温度在一昼夜的大部分时间内,低于作物层顶以上1.5米处气温。8—10点叶温有时比气温稍高。叶温与气温差最大值出现在日落后至露出前一段时间内,晴日无风天气大约出现在日落后一小时。白昼,夏玉米作物层温度高于气温,冬小麦作物层温度低于气温。夜间,小麦和玉米叶温都比气温低。土壤水分不足,蒸腾速率减小,叶温升高,叶温与气温差增大。叶温的变化反映了作物自身的水分状况。

## 一、试验布置及观测方法

我们于1980—1983年在河北省栾城县和北京大屯农业生态系统试验站观测了冬小麦、夏玉米作物层温度、作物层温度与土壤水分及作物层净辐射强度的关系。1980—1982年观测点设在河北省栾城县良种场,冬小麦田布置有充分灌水、控制灌水和不灌水试验。夏玉米观测在大田内进行。观测点北偏东约3公里处设有栾城县气象站。1983年小麦返青后在北京大屯农业生态系统试验站又观测了冬小麦作物层温度。

观测项目有:太阳总辐射,净辐射。土壤热流板埋在地表下2.5和10厘米。用AG-42型红外测温仪观测作物层温度和土壤表面温度。为避免长波反射对观测精度的影响,观测四个方位取平均值,仪器与作物层(或地表)呈30度角。用机动通风干湿表观测作物层顶以上0.5米和1.5米处空气温、湿度和风速。

## 二、观测结果及分析

### 1. 冬小麦作物层热量平衡及温度变化特征

作物层温度是研究农田生态平衡、作物与其周围环境进行物质和能量交换的重要参数。由于作物层温度较难观测,生态学家在讨论温度因子对农田能量、物质交换过程的影响时,一般多采用气温资料,而实际上作物层温度与气温间存在较复杂的关系。

作物层温度是由土壤—植物—大气连续体内的热量和水汽流决定的,作物层能量平衡方程可表示为:

$$R_n + G_o + LE + H = 0 \dots \dots \quad (1)$$

此处 $R_n$ 为作物层净辐射通量, $G_o$ 是由土壤表面流向土壤深层的热通量, $H$ 是作物层与

空气的湍流热交换通量,  $LE$  是蒸散耗热。并假定朝向作物层的流量为正。方程(1)中作物层净辐射通量 ( $R_n$ ) 和土壤热流量 ( $G_o$ ) 用仪器直接测量, 蒸散耗热 ( $LE$ ) 和湍流热交换通量 ( $H$ ) 用热量平衡法(翁笃鸣等, 1981)计算。1981年麦田作物层热量平衡各分量的变化见表1。充分供水的麦田拔节后农田蒸散耗热大于作物层净辐射收入, 作物层与周围空气湍流热交换的结果使作物层获得热量。

表1 小麦不同发育期作物层热量平衡各分量值\*

项目 \ 月/日	3/11—20	3/21—31	4/1—10	4/11—20	4/21—30	5/1—10	5/11—20	5/21—31	6/1—10
LAI	0.80	1.40	3.30	4.00	4.80	5.00	4.60	3.80	2.50
$R_n$	223.5	158.4	228.6	273.0	357.3	335.2	368.4	364.7	274.5
$G_o$	-29.1	-18.6	-21.7	-27.0	-28.6	-25.8	-27.5	-28.1	-22.9
$H$	-8.2	6.0	32.1	43.6	53.6	57.0	40.8	43.8	19.2
$LE$	-186.2	-145.8	-239.0	-289.6	-382.3	-366.4	-381.7	-380.4	-270.8

\* LAI表示叶面积指数,  $R_n, G_o, H, LE$ 的单位是卡/厘米<sup>2</sup>·日

作物层温度是作物层不同高度茎、叶表面温度的平均值, 用红外测温仪观测, 记为  $T_L$ ; 气温是指作物层顶以上1.5米处的空气温度, 用  $T_a$  表示; 百叶箱温度是指气象站在百叶箱内观测的气温, 用  $T_s$  表示。1982年栾城小麦拔节期(4月18日)和开花期(5月20日)作物层温度 ( $T_L$ )、气温 ( $T_a$ ) 和百叶箱温度 ( $T_s$ ) 日变化如图1、2所示。1983年小麦灌浆期(5月25日, 北

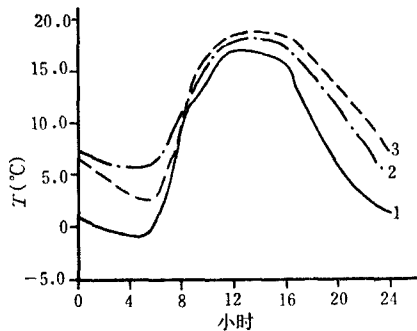


图1 冬小麦田温度日变化(1982年4月18日, 小麦拔节期, 栾城)

1. 小麦作物层温度( $T_L$ ); 2. 气象站百叶箱气温( $T_s$ );  
3. 作物层顶以上1.5米处气温( $T_a$ )。

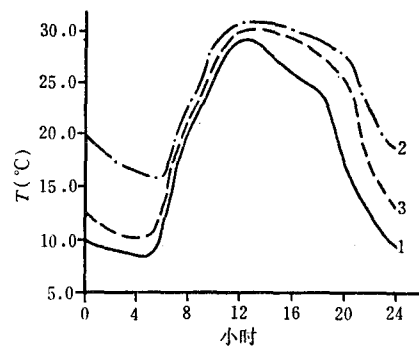


图2 冬小麦田温度日变化(1982年5月20日, 小麦开花期, 栾城)

1. 小麦作物层温度( $T_L$ ); 2. 气象站百叶箱气温( $T_s$ );  
3. 作物层顶以上1.5米处气温( $T_a$ )。

京)作物层温度 ( $T_L$ ), 气温 ( $T_a$ )、土壤表面温度 ( $T_f$ ) 和5厘米地温 ( $T_g$ ) 日变化如图3。充分供水的麦田, 在一昼夜的大部分时间内作物层温度 ( $T_L$ ) 低于作物层顶以上1.5米处气温 ( $T_a$ ), 只有8—10点作物层温度有时比气温稍高(表2)。小麦灌浆期, 土壤表面温度, 5厘米地温和作物层顶以上1.5米处气温都比作物层温度高, 在土壤—植物—大气连续体内作物层作为冷源而存在, 这一结果和用能量平衡法计算出的作物层在湍流热交换中获得热量的结论相符。

晴日, 日落前1小时左右作物层净辐射出现零值, 这时因作物层温度较高, 日落2小时

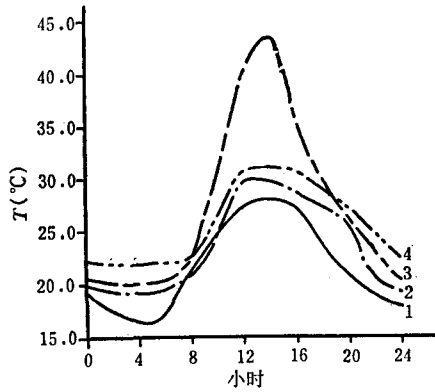


图 3 冬小麦田温度日变化(1983年5月25日, 小麦灌浆期, 北京)

1. 小麦作物层温度( $T_L$ ); 2. 作物层顶以上1.5米处气温( $T_a$ ); 3. 土壤表面温度( $T_f$ ); 4. 5厘米地温( $T_g$ )。

作物层最低温度出现在日出前 1 小时左右, 最低气温则出现在日出后半小时至 1 小时。晴日, 作物层温度最大值出现在 11 点半至 12 点, 和作物层净辐射强度最大值出现时刻相一致, 最高气温则一般出现在 13—15 点(图 4)。观测期内, 作物层昼夜温差最大值是 19.1°C, 气温昼夜温差最大值是 12.2°C。

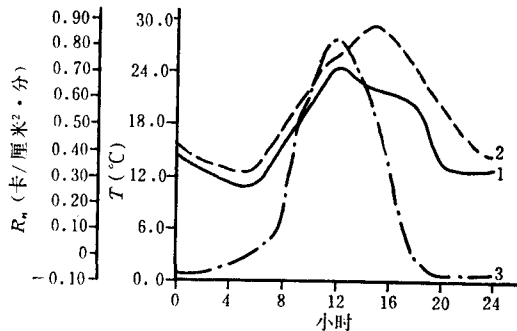


图 4 冬小麦田温度及作物层净辐射强度日变化(1982年4月20日, 小麦拔节期, 栾城)

1. 小麦作物层温度( $T_L$ ); 2. 作物层顶以上1.5米处气温( $T_a$ ); 3. 作物层净辐射强度( $R_n$ )。

湍流热交换和蒸腾耗热的形式散失。植物叶片可近似看作黑体, 据斯蒂芬定律, 作物层长波辐射强度主要决定于作物层温度。叶片与周围空气的湍流热交换强度主要受叶、气温差、风速和叶片形状及叶片大小的影响。从叶片外形考虑, 我们可将华北地区主要农作物分为大叶和小叶植物, 大叶植物如玉米、高粱、棉花等, 小叶植物如小麦、水稻等。相邻地块叶面积指数相同的农田, 大叶植物作物层因湍流热交换损失(或吸收)的能量小于小叶植物。据研究(N.J.罗森堡1982), 在自由对流状况下, 叶片与周围空气的对流热( $A$ )可表示为:

内作物层净辐射强度为  $-0.06$ — $-0.08$ 卡/厘米<sup>2</sup>·分, 作物层出现露珠后净辐射强度下降为  $-0.03$ 卡/厘米<sup>2</sup>·分左右。长波有效辐射的结果使作物层温度迅速下降, 日落后 1 小时至叶片露珠出现前一段时间内, 叶、气温差出现最大值, 如 1982 年 4 月 23 日 19 点作物层温度比作物层顶以上 1.5 米处气温低 10.4°C。当叶温低于空气露点温度时, 叶片周围空气中的水汽处于饱和状态, 叶片表面出现露珠。叶片周围的水汽层在某种程度上阻碍了叶片与周围空气的辐射热交换, 作物层长波有效辐射强度减弱, 加之叶片表面水汽凝结时释放出的热量, 使叶温下降缓慢, 叶、气温差减小。如表 2 所列, 10 天温差平均值 19 点和 20 点分别为  $-5.5$ °C 和  $-6.0$ °C, 而 22 点和 23 点下降为  $-4.7$ °C 和  $-4.3$ °C。

作物层最低温度出现在日出前 1 小时左右

最高气温则一般出现在 13—15 点(图 4)。

作物层温度随时间的变化一昼夜内有两个极值, 分别出现在日出后 1 小时和日落前 1 小时。日出后, 随太阳辐射强度增大, 叶片吸收的太阳能增加, 叶温迅速升高, 叶、气温差减小, 8—10 点叶温与气温大体相等。日落前 1 小时左右, 作物层净辐射通过零值, 叶片由吸收太阳能转变为自身释放热能, 叶温很快下降, 负值温差增加, 叶片出现露珠前负值温差出现最大值。

## 2. 冬小麦、夏玉米作物层温度比较

叶片吸收太阳能后, 只有极少部分用于光合作用, 绝大部分能量则以再辐射,

于光合作用, 绝大部分能量则以再辐射,

于光合作用, 绝大部分能量则以再辐射,

于光合作用, 绝大部分能量则以再辐射,

表 2 晴日作物层温度 ( $T_L$ ) 与气温 ( $T_a$ ) 差 (1982年, 荣城)

观测时间 $T_L - T_a$ 月/日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
4/17	-5.0	-6.2	-6.0	-7.2	-6.6	-5.7	-0.6	-1.1	0.7	0.3	-0.4	-0.3	-0.8	-0.6	-1.6	-1.9	-2.5	-3.3	-7.0	-9.1	-7.6	-7.4	-6.7	-6.6
4/20	-3.4	-3.8	-4.1	-3.8	-4.6	-4.2	-0.1	0.5	1.2	2.3	1.9	0.7	1.3	-0.4	-1.2	-2.0	-2.7	-3.0	-2.6	-2.0	-1.6	-2.7	-2.8	-2.5
4/23	-3.4	-4.2	-3.9	-2.7	-2.8	-3.9	-3.0	-1.7	0.3	0.7	-0.2	0.1	-2.9	-5.5	-4.5	-4.5	-4.5	-4.6	-10.4	-9.4	-6.6	-4.7	-3.4	-3.6
4/24	-2.4	-3.9	-1.7	-1.7	-1.4	-2.2	-1.0	-1.4	-1.0	-1.1	-1.4	-2.3	-1.5	-2.0	-3.5	-3.6	-4.4	-3.8	-2.9	-2.8	-3.6	-2.3	-2.0	-2.2
5/13	-6.2	-5.6	-5.8	-6.2	-7.1	-4.2	-1.2	1.0	0.3	-0.5	-2.6	-2.5	-1.3	-0.9	-1.0	-2.9	-3.2	-6.9	-6.0	-5.9	-6.5	-5.7	-6.9	-6.2
5/14	-3.2	-2.4	-3.5	-7.8	-5.4	-2.8	-1.4	-0.4	0.3	-0.2	-1.0	-0.3	-1.9	-1.6	-3.0	-3.4	-3.3	-4.2	-4.1	-4.5	-3.9	-2.9	-2.6	-3.4
5/20	-1.7	-2.5	-1.0	-3.7	-1.5	-0.4	-0.4	1.6	0.5	-0.2	1.0	-1.0	-2.8	-3.3	-3.5	-3.9	-3.1	-3.2	-5.1	-5.2	-7.2	-5.9	-2.9	-3.3
5/27	-4.7	-4.7	-3.0	-3.0	-2.8	1.1	1.6	2.3	-0.1	0.2	-0.1	-0.8	-2.1	-3.5	-3.7	-5.1	-5.5	-6.9	-4.5	-6.7	-3.7	-2.8	-4.1	-4.9
5/28	-4.2	-3.5	-3.8	-3.6	-3.2	-1.8	-0.4	-0.1	-0.8	-0.8	-1.5	-2.0	-1.5	-2.9	-3.4	-1.2	-1.6	-2.6	-7.0	-6.3	-6.6	-5.3	-4.4	-4.3
6/2	-5.1	-5.3	-4.5	-3.2	-3.1	1.1	-0.6	-0.1	1.5	2.0	0.3	1.6	1.9	-0.9	-1.2	-3.5	-3.6	-3.0	-5.5	-7.8	-5.1	-6.8	-6.8	-6.4
合 计	-39.3	-42.1	-37.3	-42.9	-38.5	-23.0	-7.1	0.6	2.9	2.7	-4.0	-6.8	-11.6	-21.6	-26.6	-32.0	-34.4	-41.5	-55.1	-59.7	-52.4	-46.5	-42.6	-43.4
平 均	-3.9	-4.2	-3.7	-4.3	-3.9	-2.3	-0.7	0.1	0.3	0.3	-0.4	-0.7	-1.2	-2.2	-2.7	-3.2	-3.4	-4.2	-5.5	-6.0	-5.2	-4.7	-4.3	-4.3

$$A = 5.86 \times 10^{-3} \left( \frac{T_L - T_a}{D} \right)^{1/4} (T_L - T_a) \quad (2)$$

在强迫对流中, 叶片与周围空气的对流热(A)表示为:

$$A = 5.93 \times 10^{-3} \left( \frac{u}{D} \right)^{1/2} (T_L - T_a) \quad (3)$$

(2.3)式中,  $T_L$ 和 $T_a$ 分别表示叶温和气温,  $u$ 是风速,  $D$ 是叶片大小的特征值, 用叶片平均宽度表示, 以厘米为单位。据栾城资料, 冬小麦 $D$ 值可取1.0, 夏玉米 $D$ 值是10.0。在其它条件都相同的情况下, 单位面积叶片因对流热交换损失(或获得)的热量冬小麦是夏玉米的2—3倍。

据研究,  $C_3$ 植物的蒸腾系数大于 $C_4$ 植物, 小麦是 $C_3$ 植物, 玉米是 $C_4$ 植物, 小麦的蒸腾系数大约是玉米的2倍(牛文元, 1981)。在光合速率相同的情况下, 小麦因蒸腾作用消耗的热能大于玉米。由于冬小麦和夏玉米蒸腾耗热和湍流热交换的差异, 在相同辐射环境中玉米叶温高于小麦。冬小麦、夏玉米生长季节不同, 我们用叶、气温差比较两种植物叶温的差异。白昼, 夏玉米作物层温度比气温高(表3), 冬小麦作物层温度比气温低(表2)。夜间

表3 白昼夏玉米作物层温度( $T_L$ )与作物层顶以上1.5米处气温( $T_a$ )差( $T_L - T_a$ )

$T_L - T_a$ 观测时间 月/日	观测时间												
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8/12	1.1	2.0	1.2	1.2	1.3	1.4	1.7	1.2	0.2	-0.5	-0.4	0.3	-1.8
8/13	0.6	1.9	1.8	1.1	0.8	0.2	1.5	0.1	0.0	0.1	0.5	-0.6	-0.8
8/20	1.4	1.9	4.1	1.9	3.7	1.8	1.4	1.0	-1.0	1.0	0.5	0.0	-0.4
8/21	1.5	0.9	2.4	1.2	1.0	1.0	1.6	0.4	0.8	-0.3	0.2	-0.3	-0.5
8/26	0.1	1.1	1.0	0.9	0.3	0.6	0.6	0.5	0.2	0.3	-0.8	-0.7	-1.0
合计	4.7	7.8	10.5	6.3	7.1	5.0	6.8	3.2	0.2	0.6	0.0	-1.3	-4.5
平均	0.9	1.6	2.1	1.3	1.4	1.0	1.4	0.6	0.0	0.1	0.0	-0.3	-0.9

气孔关闭, 光合作用停止, 蒸腾耗热减小, 作物层长波有效辐射的结果使冬小麦和夏玉米作物层温度都比气温低。图5是1980年8月18—20日夏玉米作物层温度和作物层顶以上1.5米处气温差及1981年5月13—15日冬小麦作物层温度与气温差三日平均值日变化, 7—16点夏玉米作物层温度比气温高, 而冬小麦作物层温度比气温低。

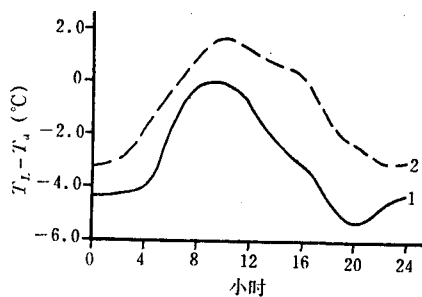


图5 冬小麦、夏玉米作物层温度与作物层顶以上

1.5米处气温差( $T_L - T_a$ )日变化

1. 冬小麦 (1981年5月13—15日, 栾城);
2. 夏玉米 (1980年8月18—20日, 栾城)。

我们将白昼7—19点观测的作物层温度平均值( $T_{L,a}$ )与气象站日平均气温( $T_s$ )和光合有效温度( $T_p$ )<sup>1)</sup>比较, 可看出, 白昼夏玉米作物层温度与光合有效温度接近(图6), 冬小

1)  $T_p = T_m - 1/4(T_m - T_n)$ ;  $T_n = T_m + 1/4(T_m - T_m)$   
 $T_m$ 和 $T_n$ 分别为日最高和最低气温

麦作物层温度接近气象站日平均气温(图7)。

夜间20—5点小麦作物层温度平均值( $T_{L,n}$ )低于夜间温度( $T_n$ )<sup>1)</sup>,与气象站百叶箱最低气温( $T_m$ )接近(表4)。

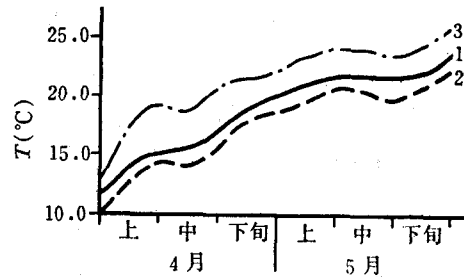
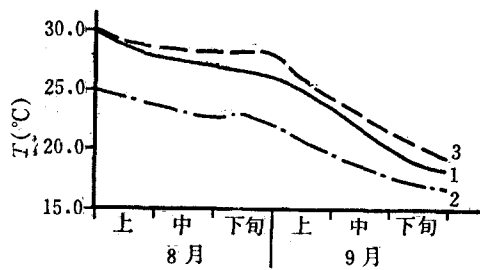


图6 夏玉米田温度随时间的变化(1980年8—9月, 栾城) 图7 冬小麦田温度随时间的变化(1981年4—5月, 栾城)

1. 夏玉米田白昼作物层温度( $T_{L,a}$ );  
2. 气象站日平均气温( $T_s$ );  
3. 光合有效温度( $T_p$ )。

1. 冬小麦田白昼作物层温度( $T_{L,a}$ );  
2. 气象站日平均气温( $T_s$ );  
3. 光合有效温度( $T_p$ )。

表4 夜间20—5点小麦作物层温度( $T_{L,n}$ )与气象站最低气温( $T_m$ )和夜间温度( $T_n$ )(1982), 栾城)

温 度	月/日	4/14	4/22	4/24	5/6	5/13	5/24	5/26	6/1	6/5
$T_{L,n}$		2.4	9.1	10.1	10.5	11.0	13.0	16.0	20.8	21.1
$T_m$		2.9	8.6	8.9	10.6	9.4	12.0	14.9	20.3	19.7
$T_n$		8.0	12.5	13.3	17.4	12.9	17.0	18.1	23.3	23.6

### 3. 土壤水分对冬小麦作物层温度的影响

我们于1981年小麦拔节期(4月5日)至乳熟期(6月2日)观测了不同土壤水分状况麦田作物层温度的变化。灌水的试验田0—20厘米土层含水量始终保持在18—21%,不灌水的试验田从4月5日起停止灌水,停灌时0—20厘米土层含水量是21%,乳熟期(6月2日)0—20厘米土层含水量下降为8%,停灌期间用中子水分仪和土钻法每5天测量一次土壤水分。小麦开花期(5月10—14日)不灌水的试验田0—20厘米土层含水量是15%,灌水的试验田0—20厘米土层含水量是20%。5天(5月10—14日)作物层温度平均值与土壤水分的关系如图8。土壤水分不足的麦田作物层温度比土壤水分充足麦田作物层温度高,白昼差值大,夜间差值小。白昼,蒸腾是叶片耗散热的主要形式,土壤水分不足,叶片得不到充足的水分供应,气孔关闭,蒸腾耗热减小,叶温升高。

小麦灌浆期(5月21—25日)不灌水的试验田0—20厘米土层含水量是12%,灌水的试验田0—20厘米土层含水量是19%,两种土壤水分状况麦田作物层温度与气温差5天(5月21—25日)平均值日变化如图9。不缺水麦田作物层温度比气温低,叶、气温差是负值。土壤缺水,叶片蒸腾耗热减小,作物层蒸腾耗散的热量小于作物层净辐射收入,作物层温度随净辐射强度增大而升高,作物层温度高于气温,叶、气温差是正值。

观测资料还表明,土壤变干后短波反射率可增大3—5%。白昼,较高的土壤表面温度使土壤长波有效辐射强度增大。生长在干燥土壤中的小麦作物层可获得较多的能量。但是,这

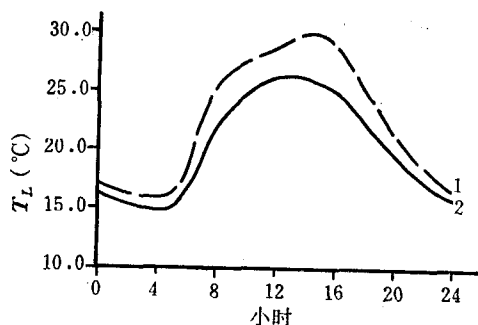


图 8 不同土壤水分状况麦田作物层温度( $T_L$ )日变化  
(1981年5月10—14日, 小麦开花期, 栾城)

1. 0—20厘米土层含水量15%;
2. 0—20厘米土层含水量20%。

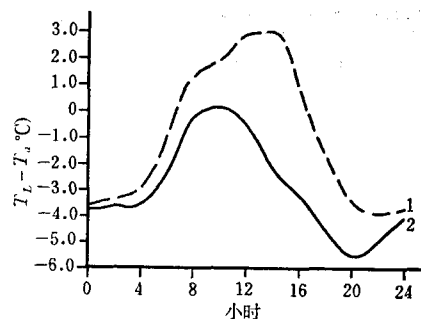


图 9 不同土壤水分状况麦田作物层温度( $T_L$ )与气温( $T_a$ )差  
( $T_L - T_a$ )日变化 (1981年5月21—25日, 小麦灌浆期, 栾城)

1. 0—20厘米土层含水量12%;
2. 0—20厘米土层含水量19%。

种能量对小麦作物层温度的影响只有当叶面积指数较小时才显著。

充分供水的麦田, 作物层温度( $T_L$ )与气温( $T_a$ )差和作物层净辐射强度( $R_n$ )的关系如图10。日出至10点, 作物层温度与气温差随净辐射强度增大而减小。12—20点, 作物层温度与气温差随净辐射强度减弱而增大。中午, 净辐射强度最大时, 叶、气温差是负值。

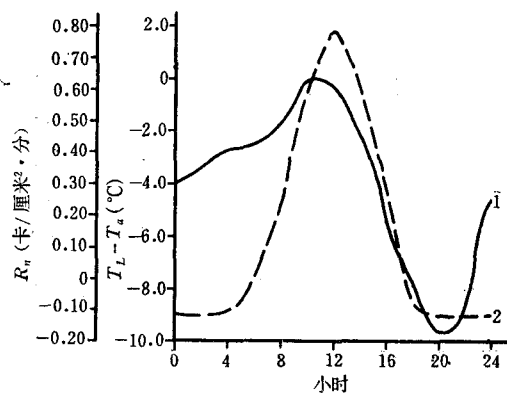


图 10 冬小麦田作物层温度( $T_L$ )与气温( $T_a$ )差  
( $T_L - T_a$ )及作物层净辐射强度( $R_n$ )日变化  
(1982年4月24日, 孕穗期, 栾城)

1. 作物层温度与气温差( $T_L - T_a$ );
2. 作物层净辐射强度( $R_n$ )。

### 三、问题与讨论

叶温是叶片与其周围环境进行能量交换的结果。白昼, 叶温主要靠叶片蒸腾作用调节, 不缺水植物的叶温一般都较低。植物缺水, 叶片蒸腾耗热减小, 叶温升高, 叶、气温差增大。叶、气温差的变化反映了植物和土壤的水分状况, 叶、气温差是土壤—植物—大气相互影响的结果。我们是否可以用叶、气温差作为植物缺水的指标呢? 据观测结果, 作物层温度与气温差随土壤含水量减小而增大。小麦拔节至乳熟期, 晴日14点观测不同土壤水分状况麦田作物层温度和气温, 0—20厘米土层含水量是20%时, 作物层温度比气温低0.5—4.5%; 0—20厘米土层含水量是15%时, 作物层温度

比气温高0.5—2.5°C; 0—20厘米土层含水量是12%时, 作物层温度比气温高1.5—3.5°C。Jackson等人(1980)在美国菲尼克斯水分保持试验站研究用叶、气温差作为农田灌溉指标的可能性, 获得了一定的成果。

植物需水状况是一个动态过程, 它不仅受土壤种类和天气的影响, 而且随植物不同发育阶段而异。我们不仅要研究叶温与土壤含水量的关系, 也要研究植物不同发育阶段叶温与植物水势及生长发育的关系。在进行综合研究之后, 用叶、气温差作为植物缺水的指标是可能

的。关于叶温与土壤水分、植物水势、植物生长发育和作物层热量平衡关系的研究工作,今后将在北京大屯农业生态系统试验站继续进行。

### 参 考 文 献

- 翁笃鸣等编著 1981 小气候和农田小气候。农业出版社,80页。  
N.J.罗森堡著 1982 小气候—生物环境。科学出版社,87页。  
牛文元 1981 农业自然条件分析。农业出版社。92—95页。  
Jackson D, et al. 1980 Infrared Thermometer Irrigation, *Agricultural Research* 9:9.

## A PRELIMINARY STUDY ON THE CANOPY TEMPERATURE IN THE WINTER WHEAT AND THE SUMMER MAIZE FIELDS

Dong Zhenguo

(*Institute of Geography, Academia Sinica*)

Most of the observations show that canopy temperature is lower than air temperature of 1.5m above the canopy in the wheat fields with an adequate water supply during day and night. Sometimes, leaf temperature is slightly higher than air temperature from 8:00—10:00 in the morning. The maximum difference between leaf temperature and air temperature occurs in the period from after sunset to before dewing. It occurs about one hour after sunset under calm, clear day. In daytime, the canopy temperature of summer maize is higher than air temperature but the canopy temperature of winter wheat is lower than it. In darkness, both are lower than air temperature. In the soil with insufficient moisture, transpiration rate decreases, leaf temperature increases and the difference between leaf temperature and air temperature becomes greater. The variance of leaf temperature reflects the condition of water content in the crop.