

热红外信息在作物估产中作用分析

张 仁 华

(中国科学院地理研究所)

摘要——本文讨论了以热红外信息为基础的 SDD 作物估产模式的机理,分析了作物干物质积累量和热红外信息的函数关系,证明该模式具有一定的理论基础。用山东禹城的试验资料确认了该模式的优点和适用范围,并以作物热惯量信息为基础试验了估产扩展模式。

一、引 言

美国学者 Idso S. B., Jackson R. D., 和 Reginato R. J., 在大量田间试验基础上,提出用作物热红外信息进行作物估产的 SDD(stress degree dag)概念^[1], 其数学形式为

$$Y = A + B \sum_{i=b}^e SDD_i, \quad (1)$$

式中 Y 是作物产量; A 、 B 是系数; SDD 是每日午后二点的作物活动面温度*和同一时间的距该面一米上空的空气温度之差, SDD 单位为度/日; b 是种子干物质积累的起始日期, e 是终了日期。他们在美国很多地区进行了多年试验,取得了很理想的结果。我们在山东禹城也取得了同样的结果。该估产模式采用的最基本信息是用手持红外测温仪测量的作物活动面温度。这信息也是红外辐射信息。

本文将讨论作物红外辐射信息和产量的关系及其机理。

二、估产模式机理的分析

定量研究作物从环境中吸收二氧化碳和水的规律,是分析估产模式机理的关键。

作物对二氧化碳的吸收方程^[3]为

$$P = K \frac{M_{CO_2, \text{空气}} - M_{CO_2, \text{叶绿色体}}}{r_a + r_s + r_m}, \quad (2)$$

式中 P 为光合作用的驱动力 ($g \cdot cm^{-2} s^{-1}$); K 是把二氧化碳从 ppm 转换成 $g \cdot cm^{-3}$ 时的系数; M 这里是表示 CO_2 克分子浓度; r_a 、 r_s 、 r_m 分别为对 CO_2 扩散的空气阻力、作物叶子气

本文 1983 年 12 月 13 日收到。修改稿 1984 年 11 月 6 日收到。

* 作物活动面是作物群体的一个抽象平面,是能量输送的界面,大约在作物高度的 2/3 处。其温度只能用红外测温仪或红外热象扫描仪测定^[2]。

孔阻力和作物叶肉阻力, 它们的量纲均是 $s \cdot cm^{-1}$ 。

式(2)表明, 作物的光合作用与空气阻力 r_a 及气孔阻力 r_s 有直接的关系, 而空气阻力与气孔阻力又直接影响了作物活动面的红外温度。作物活动面辐射温度取决于能量辐射方程

$$I_n = H + LE + S, \quad (3)$$

式中 I_n 为作物活动面的辐射通量 ($cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); H 为作物表面与作物上空之间的热交换通量 ($cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); LE 为作物表面由于水份蒸发而失去的热通量 ($cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$); S 为土壤的热辐射通量 ($cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)。辐射通量可由仪器较精密测定, 我们的观测资料表明, 在山东禹城的春季, 晴天中午变化在 $0.005 \sim 0.015 cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$, 夜间为负值。

在作物进入抽穗阶段, 通常作物已经完全覆盖, 土壤的热辐射通量 S 已很小, 其值可近似用 $S = \xi I_n$ 来表达。 ξ 是与作物覆盖率有关的参数。作物抽穗后 $\xi \approx 0.1$, 因此式(3)可改写成

$$(1 - \xi) I_n - LE - H = 0. \quad (4)$$

作物活动面蒸发热通量 LE 和 r_a 、 r_s 有如下关系式

$$LE = \frac{\rho C}{\nu} (e_a - e_0) / (r_a + r_s). \quad (5)$$

作物活动面的热交换通量 H 和 r_a 有如下关系式

$$H = \rho C (T_a - T_0) / r_a. \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, 空气密度 ρ 约为 $1.13 \times 10^{-3} g \cdot cm^{-3}$; 定压比热 C 约为 $0.24 cal \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; 干湿表常数 ν 约为 $0.65 mbar \cdot ^\circ C^{-1}$; e_a 是作物活动面上空一米处的水汽压; e_0 是近作物活动面水汽压; T_0 是近作物活动面温度(可由通风干湿表测定); T_a 是作物活动面上空一米处的温度(可由通风干湿表测定)。

当作物活动面水汽压 e_0 饱和时, 则 $e_a - e_0 = \frac{\partial e}{\partial T} (T_a - T_0)$, 变换式(5)为

$$LE = \frac{\rho C}{\nu} \frac{\partial e}{\partial T} (T_a - T_0) / (r_a + r_s) - \frac{\rho C}{\nu} (\dot{e}_a - e_a) / (r_a + r_s). \quad (7)$$

将式(6)代入式(7), 得

$$LE = \psi H \frac{r_a}{r_a + r_s} - LE_a \frac{r_a}{r_a + r_s}, \quad (8)$$

式中 $LE_a = \frac{\rho C}{\nu} (\dot{e}_a - e_a) / r_a$, 称为作物活动面上空一米处空气水汽压饱和压差的蒸发热通量, e_a 是空气温度等于 T_a 时的饱和水汽压, $\psi = \frac{1}{\nu} \frac{\partial e}{\partial T}$, 是饱和水汽压对温度的斜率。

将式(4)代入式(8), 得

$$LE = \frac{r_a}{(1 + \psi)r_a + r_s} [\psi(1 - \xi)I_n - LE_a]. \quad (9)$$

从式(2)和式(9)可知 CO_2 吸收方程与作物热量蒸发方程共同受到 r_a 和 r_s 的制约, 也就是说作物的光合作用是与作物的水份蒸发有其内在的联系, 这样作物的产量就与水份蒸发有关, 而水份的蒸发又与作物活动表面的温度有关, 因此, 作物的产量与红外辐射温度有其一定的函数关系, 这就是探讨 SDD 估产模式的基本原理。

在相同气象条件下, 土壤水份供给充足时, 作物的气孔阻力 r_s 很小, 蒸发可达最大值

LE_0 , 反之蒸发就降低。这两种蒸发量的比值 α 反映土壤对作物的供水情况, 也反映了作物的生长状况, 根据式 (9) 可得

$$LE_0 = [\psi(1-\xi)I_n - LE_a] / (1+\psi)。 \quad (10)$$

蒸发比 α 为

$$\alpha = \frac{LE}{LE_0} = \frac{(1+\psi)r_a}{(1+\psi)r_a + r_s}。 \quad (11)$$

当空气中 CO_2 含量相同的条件下, 由于土壤水份含量不同, 作物通过根系可间接引起叶子气孔阻力不同, 因而 CO_2 吸收量也就不同。设充分供水和不充分供水之间作物对 CO_2 吸收量之比 β 为

$$\beta = \frac{r_a + r_m + r'_s}{r_a + r_m + r_s}, \quad (12)$$

式中 r'_s 为充分供水时作物叶子的气孔阻力 ($s \cdot cm^{-1}$)。 CO_2 的吸收量可表达为作物的生长量, β 值则可表达为相对生长量, 由式 (11) 和式 (12) 可得

$$\beta = \frac{r_a + r_m + r_s}{r_m + r_a [1 + (1+\psi)(1-\alpha)/\alpha]}。 \quad (13)$$

由式 (4) 和式 (6) 得

$$r_a = \frac{T_a - T_0}{A}; \quad (14)$$

式中 $A = \frac{\nu}{\rho O} [(1-\xi)I_n - \alpha LE_0]$ 。

因此可得

$$\beta = \frac{(T_a - T_0)/A + r_m + r'_s}{\frac{(T_a - T_0)}{A} \left[1 + \frac{(1+\psi)(1-\alpha)}{\alpha} \right] + r_m}。 \quad (15)$$

式 (15) 表达了 CO_2 相对吸收量与作物活动面温度之间的函数关系, 这样也就反映了红外辐射温度与作物产量之间的关系。

作物相对生产量在抽穗之前与作物根茎叶的干物质积累成正比, 在抽穗之后与作物种子干物质积累成正比。 CO_2 的吸收量表达了干物质的积累。令每天干物质积累量为 y , 则

$$y = a + b\beta。 \quad (16)$$

令作物收割时的产量为 Y (从抽穗到黄熟的种子干物质积累),

$$Y = a + b \sum_{t=\text{抽穗期}}^{\text{黄熟期}} \beta_t。 \quad (17)$$

抽穗以后的积累生物量仅与作物种子产量有关。为了避免因为作物疯长引起的估产误差, 以式 (15) 代入式 (17), 更换相关方程的系数, 可得

$$Y = A + B \sum_{t=\text{抽穗期}}^{\text{黄熟期}} (T_a - T_0)_t, \quad (18)$$

上式与式 (1) 相同, 由此可见产量确实与作物红外辐射有密切关系。说明 SDD 估产模式有坚实的气象学与作物生理学基础。

式 (18) 还表明, 作物产量与包含在 A 、 B 系数里的净辐射通量 I_n 、蒸发比 α 、作物叶肉阻力 r_m 等因素有关。这些因素还在一定程度上影响着产量。它们随着不同地区、不同气象条件、不同的作物品种和类型而变化, 从而也造成不相同的线性相关方程的系数。

三、试验结果

1981年到1982年,我们在山东禹城遥感试验场试验了SDD估产模式。其目的是证实作物红外辐射信息在估产中的作用;研究SDD模式的适用性。

作物活动面温度用手持红外测温仪测量。波段为 $8\sim 12.5\mu\text{m}$ 。测量时间为每日凌晨日出之前和午后二点。保证观测目镜里全是作物而无土壤。在测量同时,用红外测温仪及辅助设备测环境辐照度和比辐射率。比辐射率大约相隔七天测定一次。然后,将以上测得的三个要素换算成作物活动面温度^[4]。

试验是在六块土壤质地相同、而土壤水份含量不同的田块上进行的。土壤水份用喷溉进行控制,从凋萎系数(含水量11%左右)到田间最大持水量(25%左右)之间,基本按等差级数分布。

试验结果表明,六块土壤水份不同的小麦田的产量与每日 $(T_a - T_0)$ 的累加值(即SDD值)成十分理想的线性关系。相关系数为0.99,见图1。

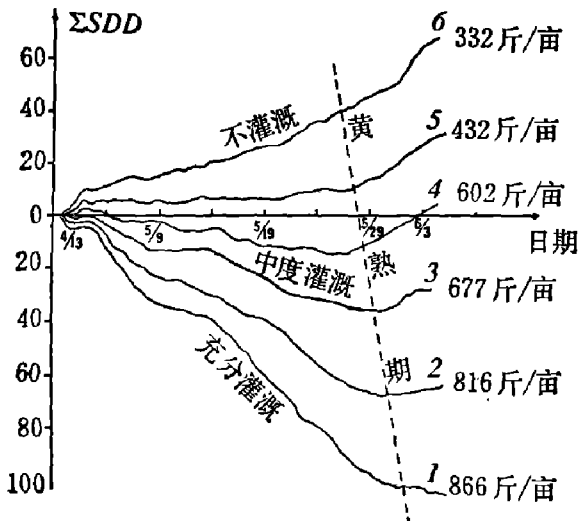


图1 六块小麦地的SDD值发展过程及亩产量
(山东禹城1981~1982年)

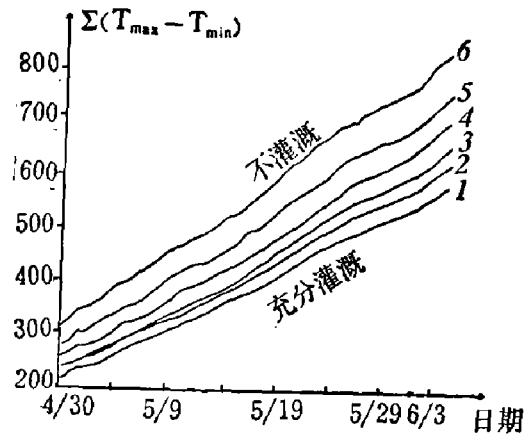


图2 六块小麦地的作物活动面温度日较差
 $(T_{(\max)_0} - T_{(\min)_0})$ 的发展过程与产量关系

从图1中可以看出,由于每日午后二点的作物活动面温度呈阶梯分布,造成了SDD值呈规律性的阶梯分布。

我们用相同资料,避开在SDD估产模式中所需要的空气温度 T_a ,采用了早晨和午后二点的作物活动面温度之差(即象征着热惯性的温差),作与SDD估产模式类似计算,即

$$Y = A' + B' \sum_{i=b}^e (T_{(\max)_0} - T_{(\min)_0}); \quad (19)$$

式中 $T_{(\max)_0}$, $T_{(\min)_0}$ 分别为一月中作物活动面的最高与最低温度。

试验结果表明,相关系数仍达0.99。这是因为

$$\frac{1}{2}(T_{(\max)_0} - T_{(\min)_0}) = T_{(\max)_0} - \bar{T}_0 \doteq T_{(\max)_0} - f \cdot T_a; \quad (20)$$

式中 \bar{T}_0 为一日的作物活动面平均温度, f 为系数。

式(20)表明利用热惯量估产在原理上与SDD概念相似,见图2。这一试验揭示了用热惯量进行估产的可能性。

参 考 文 献

- [1] Idso S. B. et al., *Science*, (1977), 19~25.
- [2] 牛文元,张仁华等著,土面增温剂的处理与效应,科学出版社,1982,72~95.
- [3] N. J. 罗森堡著,小气候——生物环境,科学出版社,1982,231~232.
- [4] Zhang Renhua, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Environmental Research Institute of Michigan, 1980, 121~133.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THERMAL INFRARED INFORMATION IN ESTIMATING CROP YIELD

ZHANG RENHUA

(*Institute of Geography, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The mechanism of SDD model for estimating crop yield is discussed on the basis of thermal infrared information, and the function relation between dry material accumulation of crop and thermal infrared information is analysed. That the model has a fair theory basis is proved. The Advantages and the adaptive limits are affirmed by using experimental data of Yucheng, shandong province. An expanded model on the basis of thermal inertia is tested.