以作物光谱与热红外信息为基础的复合估产模式*

张 仁 华

(中国科学院地理研究所，北京)

关键词 绿度、缺水指标、受胁

在遥感作物估产过程中，最关键的是建立有效的估产模式. Idso 等继美国大面积作物估产模式后，提出一个更多地利用遥感信息的 SDD 估产模式[1]. 作者于 1983 年提出了 SDD 改进作物估产模式[2]. 这两个模式要求每日的遥感资料才能保证精度. 本文的目的就是以 18 天重复一次的作物光谱及热红外资料，建立有一定精度的作物估产模式.

一、模式的建立

众所周知，任何作物分生长期和发育期**两个阶段. 绿度由作物反射光谱的红光 (0.6—0.7 μm)、近红外光 (0.8—1.1 μm) 波段作线性、非线性的组合或比值的指标，可以很好表达作物生态参数[3,4]，从而表征了作物的长势及水肥供给情况.

由于叶子不同作物的叶子形状、倾角、密度、株高及其反射率、透过率等均不相同，造成红光及近红外的总体反射率也各不相同，从而存在一个最佳绿度表达式. 最佳绿度的评价函数 (Merit function) 定义为

$$\theta_{mer}=\left\{\sum_{i=1}^{R}[G(t_i)-L(t_i')]^2\right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

式中 $G(t_i)$ 为绿度随时间变化函数，$L(t_i')$ 为某种生态参数随时间变化函数. 当 θ_{mer} 值趋向零时. 称其为最佳拟合绿度. 这可使遥感光谱资料在表达生态参数时发挥最大潜力.

在生长期末发育期初，叶面积指数达最大值，绿度 $G(t)$ 也应达到峰值. 利用多时相作物光谱，可确定峰值前的绿度累积值，即 $\int_{t_1}^{t_2}G(t)dt$. 对于实际计算，观测次数是有限的，因此由下式表达: $\sum_{i=1}^{m}G(t_i)\cdot\tau$. 这值标志着将来种子的潜在产量 Y_p:

$$Y_p=K_1\sum_{i=1}^{m}G(t_i)\cdot\tau, \tag{2}$$

式中 K_1 为系数，τ 为观测周期长度. 如果在这个峰值以后的发育期中不受到任何受胁 (stress) 状态，就是说水肥条件能保证作物需要，没有病虫害的冲击，那末作物最终产量应为潜在产量.

在绿度峰值后，光合作用产生的碳水化合物提供种子形成. 因此这时间的 CO_2 的吸收量直接影响产量. 控制 CO_2 吸收量的最直接是空气阻力 r_a，气孔阻力 r_s 及叶肉阻力 r_m. 不

本文 1988 年 10 月 4 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

** 在作物栽培中，也称之为营养生长期及生殖生长期.

充分供水对充分供水的作物的 CO_2 吸收阻力比 η 为

$$\eta = \frac{r_a + r_m + r_s}{r_a + r_m + r_s^*}, \tag{3}$$

式中 r_s^* 为充分供水条件下的气孔阻力. 显然 η 值越大、干物质积累越慢.

气孔阻力直接影响作物的潜热输送. 空气阻力又和作物冠层的潜热、显热输送相关连. 因此我们利用微气象参数及作物缺水指标来表达 η 值. 令 $F = 1 - \frac{LE}{LE_0}$, 称 F 为作物缺水指标. LE、LE_0 分别为不充分供水及充分供水条件下的潜热输送. 潜热输送方程为

$$LE = \frac{\rho c_p}{\nu}(e_s - e_a)/(r_a + r_s), \tag{4}$$

水分充分时,

$$LE_0 = \frac{\rho c_p}{\nu}(e_s^* - e_a)/(r_a + r_s^*). \tag{5}$$

因而

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{(e_s - e_a)(r_a + r_s^*)}{(e_s^* - e_a)}(1 - F)^{-1} - r_a \\ &= \frac{[\Delta(T_s - T_a) - (d_s + d_a)](r_a + r_s^*)}{[\Delta(T_s - T_a) - da]} \cdot (1 - F)^{-1} - r_a. \end{aligned} \tag{6}$$

CO_2 吸收阻力比 η 可表达:

$$\eta = A + B(1 - F)^{-1}, \tag{7}$$

其中

$$A = \frac{r_m}{r_a + r_m + r_s^*}, \quad B = \frac{[\Delta(T_s - T_a) - (d_s + d_a)(r_a + r_s^*)}{(r_a + r_m + r_s^*)[\Delta(T_s - T_a) - d_a]},$$

其中 T_s、T_a 分别为作物冠层表面温度及空气温度, d_s、d_a 分别为冠层表面及冠层上空的空气饱和差. 利用冠层热量平衡方程及 (4)、(5) 式, F 值可用下式表达[5]:

$$F = \left[(T_s - T_a)(\nu + \Delta) + d_a - \frac{(1 - \xi)R_n r_a \nu}{\rho c_p}\right] \Big/ [d + \Delta(T_s - T_a)], \tag{8}$$

式中 R_n 为冠层表面净辐射通量, ξ 为土壤热通量与 R_n 之比值, $\Delta = \frac{de}{dT}$, 即饱和水汽对温度的微分, ν 为干湿表常数, ρ 为空气密度, c_p 为空气定压比热. 这些参数中 R_n、T_s 可以用遥感方法获得, T_a、d 可从当地附近气象站资料近似得到, r_a、ξ 可以根据小气候试验站测得, 或从气象站资料近似求得.

在发育期开始后, 如果水分供应始终十分充足, 每日的 $F = 0$, $\eta = 1$, CO_2 吸收的阻力比最小又不受到其他灾害冲击. 理论上, 在收获时的产量应等于潜在产量. 当水分供应不足时, $F > 0$, $\eta > 1$, CO_2 吸收的阻力比增大作物生长受到胁迫, 产量降低, F 值越大, 减产越厉害. 由此得到复合估产模式:

$$Y = K_1 \sum_{i=1}^{m} G(t_i)\tau_1 - K_2 \sum_{j=1}^{n} F(t_i)\tau_2, \tag{9}$$

Y 为最后种子产量. m、n 分别为生长期和发育期的观测次数. τ_1、τ_2 分别为生长期和发育期的观测周期(天为单位). 本模式与 SDD 模式相比, 具有两个优点: (1) 本模式以绿度累积值表达了生长期的长势, SDD 无法表达. (2) 本模式包含微气象参数, 排除了在 $(T_s - T_a)$ 信息中非蒸腾的干扰因素, 从而能够确切表达作物的蒸腾强度, 也就是可以较正确地反映由

光合作用造成的干物质积累程度．在这些优点的支持下，减少观测次数，仍能保持一定的估产精度．本模式的观测周期可与陆地卫星的测量周期相一致．

二、试验设计及结果分析

试验是在中国科学院禹城综合试验站的遥感试验场进行的，土壤为灰潮土，质地为中壤，试验面积约 3500 m²．共分 9 个小区，中心小区树立 30 m 高塔，在塔的 15 m 及 30 m 有两个观测平台．周围 8 个小区用喷灌、漫灌方式造成阶梯式的土壤水分含量．最干的不灌水，土壤水分含量由天然降水决定．最湿的用漫灌方式灌水，使其接近田间持水量．每个小区之间用 2m 深的油毡相隔，以免土壤水分互相渗透．

常规微气象观测有净辐射通量 R_n、气温 T_a、气湿 e_a、风速 u 等，均在每小区中心巡回检测，用红外测温仪在 30 m 平台上观测每个小区的作物活动面温度，与微气象同步观测．另外也用红外测温仪在每个小区的中心向东南、西南、西北、东北四个方向观测（作物行向为南北向），以此四个方向的平均温度代表作物冠层表面温度 T_f．以上微气象参数均在最低气温及最高气温出现的两个时刻观测．用 SE 590 电刷式光谱辐射计分别在每个小区 1 m 上空，及 15 m、30 m 平台上对作物进行垂直与倾斜观测，观测时间间隔为 4—5 天．在作物成熟后，在每个小区分别采 16 m² 的产量，推算亩产．

以叶面积指数和叶绿素含量为基础，把近红外波段及红光波段的光谱数据作线性组合，选择最佳的绿度拟合模式．经试验表明，在作物上空 1 m 处的测量中，以两波段的简单比为佳．在高塔平台测量中，以两波段的标准差为佳．以这种拟合的绿度随时间变化曲线，表征了作物长势过程（图 1）．

小麦在三月底，绿度逐渐增高、四月中旬达到峰值．从 1# 区到 6# 区土壤水分逐渐减少．1# 区常达田间持水量．6# 区不灌溉．6 个区长势也有明显差异．绿度曲线下积分面积为绿度的累积值（图 1）．这种累积值奠定了产量基础，表征着潜在产量，6 个区的潜在产量已有明显差异．在无病虫害的前提下，每区能否保持它的潜在产量、主要取决于水肥供应条件，如果在绿度峰值以后水肥供应不足，势必气孔关闭在冠层的红外温度中可以较敏感地反映出来．如前所述，CO_2 吸收阻力比 η 取决于 F 值，F 值越高，η 值也越大，干物质积累越少，减产越历害．由于 F 值包含净辐射、空气饱和差和风速等环境参数，表征作物受胁状态就更准确．

现采用 18 天的观测周期，比较 F 值与单项（$T_f - T_a$）值对产量的影响．用 1987 年的资料，在小麦绿峰后随机抽样三个不同的起始日期，然后都以 18 天间隔往后继续抽样并累计 $F \cdot \tau_1$ 值及 $(T_f - T_a) \cdot \tau_2$ 值（在相同观测周期中，可以不乘以周期长度 τ）．ΣF 值与产量的相关系数分别为 −0.88，−0.83，−0.85．$\Sigma(T_f - T_a)$ 值与产量的相关系数分别为 −0.82，−0.52，−0.30．以同样方法，计算 1988 年小麦资料，ΣF 值与产量相关系数分别为：−0.89，−0.85，−0.87．$\Sigma(T_f - T_a)$ 值与产量相关系数为 −0.39，−0.45，−0.78．

大豆在绿峰后抽样四个起始日期．以同样方法，得到 ΣF 与产量相关系数分别为 −0.82，−0.85，−0.75，−0.74，$\Sigma(T_f - T_a)$ 与产量相关系数分别为 −0.27，−0.81，−0.67，−0.58．

从这些相关分析可知，ΣF 比 $\Sigma(T_f - T_a)$ 要稳定得多，$\Sigma(T_f - T_a)$ 的不稳定性完全是由于环境因素（净辐射、气温、风速等）的影响造成的，而 ΣF 值在不同的抽样时间里相当稳定．这说明采用 18 天一次观测周期，以 $\sum_{\Delta=18\text{天}}(T_f - T_a)$ 作为作物产量影响，指标将会造成较

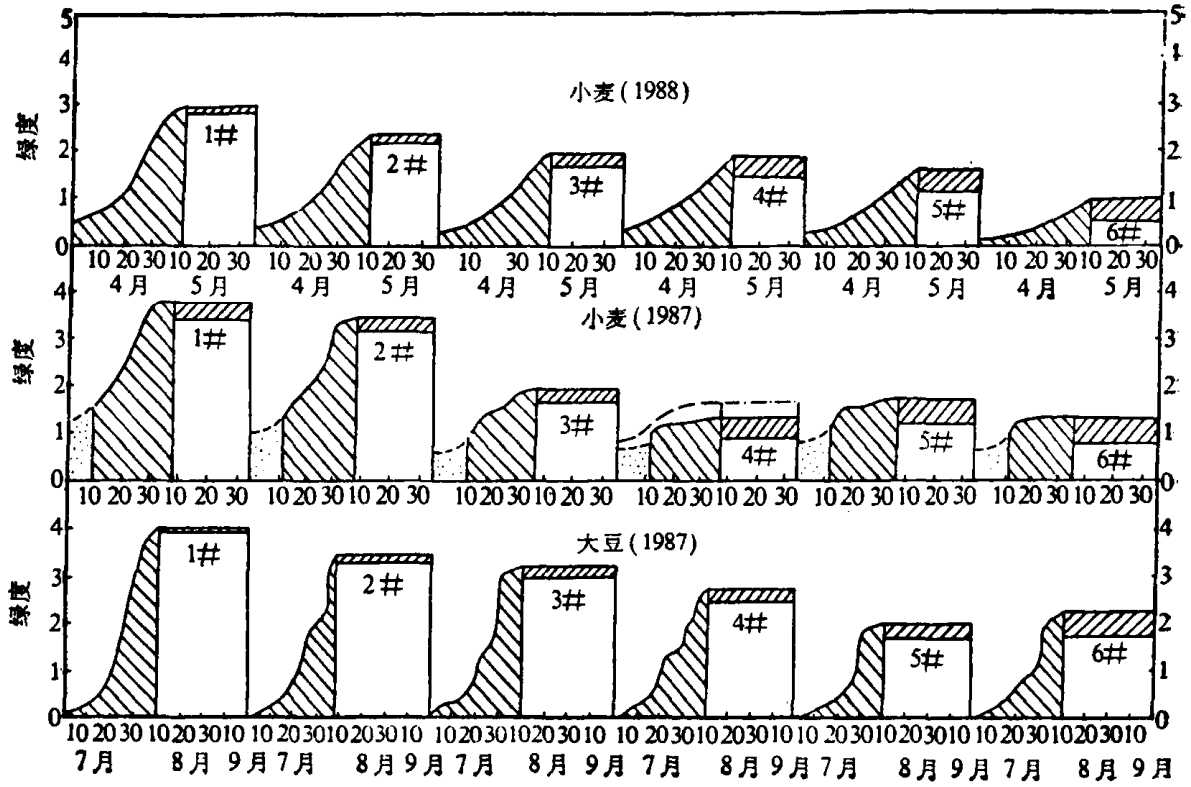

图 1　复合估产模式的时间变化图

大的误差，而 $\sum_{\Delta=18天} F$ 值却展示了良好前景.

图 1 中每区绿峰后的斜线面积表征着平均的 F 值. 1987、1988 年的小麦资料表明，从 1# 到 6# 作物的缺水状况呈现阶梯变化. 大豆资料也是如此.

仅用绿峰前绿度累积值 $\sum_{\Delta=13天} G$ 与小麦实际产量相关，1987、1988 年两年平均相关系数为 0.88. 仅用绿峰后的 $\sum_{\Delta=18天} F$ 值与小麦实际产量相关，两年平均为 −0.85. 而采用复合估产模式 $K_1 \sum_{\Delta=18天} G \cdot \tau - K_2 \sum_{\Delta=18天} F \cdot \tau$ 与小麦实际产量相关系数提高到 0.92.

同样，仅用大豆绿峰前的 $\sum_{\Delta=18天} G$ 与大豆产量相关，1987 年相关系数为 0.82. 仅用绿峰后的 $\sum_{\Delta=18天} F$ 值与大豆实际产量相关，相关系数为 −0.80，而采用 $K_1 \sum_{\Delta=18天} G \cdot \tau - K_2 \sum_{\Delta=18天} F \cdot \tau$，相关系数提高到 0.88. 由此可见，采用复合估产模式，即使是 18 天观测周期，仍有较高的估产精度，显示了这模式的应用价值.

参　考　文　献

[1] Idso, S. B. et al., *Science*, 1977, 196: 19—25.
[2] 张仁华，科学通报，28(1983),20: 1259—1262.
[3] Jackson, R. D., *Remote Sensing of Enviromnent*, 1984.
[4] Goel, N. S., *Int. J. Remote Sensing*, 7(1986), 10: 1263—1286.
[5] 张仁华，中国科学，1986,7: 776—784.