

# 冬小麦产量构成分析与遥感估产\*

朱晓红 谢昆青 徐希孺 承继成

(北京大学遥感技术应用研究所)

朱保本

(河南省农业科学研究所)

1988年1月30日收稿

## 摘 要

本文叙述了作者在可控样地条件下所做的冬小麦遥感估产试验的结果及其分析。

所谓可控样地,就是冬小麦种在几个封底的长3.25 m、宽2.37 m、深2.00 m的水泥池中,用控制冬小麦的施肥量与灌水量的方法,人为地拉开各块样地的单产值。在整个冬小麦生长期内测定必要的农学参数,如叶面积系数、穗数、平均粒数、千粒重等;同时测定各个生长期冬小麦的光谱值。在找到不同生长阶段的光谱参数与冬小麦3个产量构成因素之间的相关关系的基础上,确立了冬小麦遥感估产的整体地面模型公式,并对冬小麦遥感估产的原理进行了分析与讨论。

## 一、引 言

冬小麦是人类主要的粮食作物之一。通过卫星遥感手段及时获得冬小麦的产量信息,具有重大的政治意义和经济价值,所以历来为各国政府和经济管理部门所重视。冬小麦的遥感估产问题亦成为遥感界所瞩目的重要课题之一。要解决这样一个问题,必须搞清楚为什么遥感方法能估产?它的机理是什么?

遥感估产是通过装置于卫星上的多波段地物光谱扫描仪,去获得冬小麦各生育期的光谱数据,并依此推断冬小麦的产量。因此,解决冬小麦光谱特征与产量构成因素间的因果关系,确立它们之间的数量关系,是遥感估产的基础。虽然多年来国内外许多学者在实验的基础上提出了种种统计相关公式,但至今能把冬小麦生长发育特征与光谱数据有机地结合起来,对冬小麦的遥感估产原理和方法作出透彻分析的模式仍然是很少的。本文试图在同时获得冬小麦光谱数据和生长发育特征数据的基础上,对冬小麦的生长发育与光谱特征作一个综合性的分析,为冬小麦遥感估产方法提供必要的理论依据。

## 二、实验条件和结果

实验是在河南省新乡市中国农业科学院农田灌溉研究所的试验地里进行的。实验从

\* 参加本项研究工作的还有张克伟、黄万华、王永宏和周莲芳同志,在此一并致谢。

1986 年至 1987 年共进行了二年, 本文系最后的年度报告。

实验地为 7 块  $3.25\text{ m} \times 2.37\text{ m} \times 2.00\text{ m}$  的封底隔水水泥池。土壤为立黄土, 有机质含量为 1.7%, 全氮 0.29%, 速效磷 217 ppm, 速效钾 128 ppm。播种前施土杂肥 4000 kg/Mu, 施硫酸 15 kg/Mu, 施过磷酸钙 40 kg/Mu。播种日期均为 10 月 9 日。冬小麦品种为郑州 761。各实验地块全部用人工控制灌水量, 并以玻璃钢天蓬防雨, 使产量人为地拉开距离。

在冬小麦生长期测量叶面积系数 (LAI), 做了必要的物候观测记录; 冬小麦成熟后测量了各实验地块的平均穗数、每穗平均粒数、千粒重和亩产量, 所得结果见表 1。各实验地块每年的灌溉方式均一致(表 2)。冬小麦生长发育过程中的拔节、抽穗、扬花、乳熟、蜡熟等各生理阶段及灌溉日期均标注在图 1 中。各实验地块中冬小麦的叶面积指数 (LAI) 随时间的变化曲线亦示于图 1。

表 1 河南新乡冬小麦各实验地块平均穗数、粒数、千粒重及单产一览表

Table 1 The table of the ear number, average grain number, grain weight, and yield of winter wheat in the controlable sample field, Henan Prov

样地标号	穗数 ( $10^4/\text{Mu}$ )		粒数 (li/sui)		千粒重 (g)		产量 (kg/Mu)	
	1986	1987	1986	1987	1986	1987	1986	1987
A	27.75	29.19	26	28	40.25	39.56	289.30	246.02
B	18.40	26.58	38	35	42.40	38.31	298.00	330.30
C	25.18	39.25	28	32	43.65	36.22	306.70	369.41
D	36.33	51.53	36	36	51.05	46.59	485.05	432.78
E	26.12	45.92	34	37	43.00	38.99	387.15	420.21
F	23.70	35.78	34	35	43.39	40.44	354.55	393.87
G	53.98	71.83	14	29	39.00	36.11	303.05	393.61

表 2 河南新乡冬小麦各实验地块浇水纪录一览表

Table 2 The table of the irrigation records of winter wheat in the controlable sample fields, Henan prov

( $\text{m}^3/\text{Mu}$ )

月	日	A		B		C		D		E		F		G	
		1986	1987	1986	1987	1986	1986	1986	1987	1986	1987	1986	1987	1986	1987
1	21	15	15	5	5	15	15	15	15	5	5	15	15	15	15
2	15							25	25						
2	18	25		20	20	30	30	25		15	15	20	20	15	15
2	20			20	20					15	15			15	15
3	10							15	15						
3	26							30	40		5	20	20	25	25
4	12							25	25	15	15				20
4	28		15					20	20						20
5	4	15		15	15	15	15	15	15	25	25	15	15	20	20
5	20													30	10
5	28													5	
总计		55	30	60	60	60	60	160	155	75	80	70	70	125	140

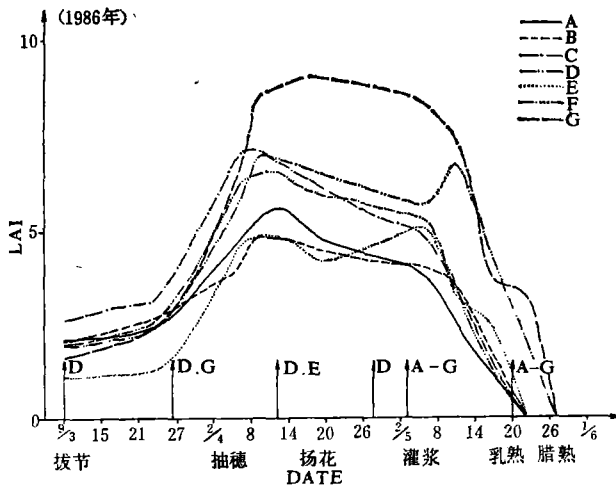


图 1 (a) 叶面积系数随时间变化曲线 (1986 年)

Fig. 1 (a) The variation of LAI with time in 1986

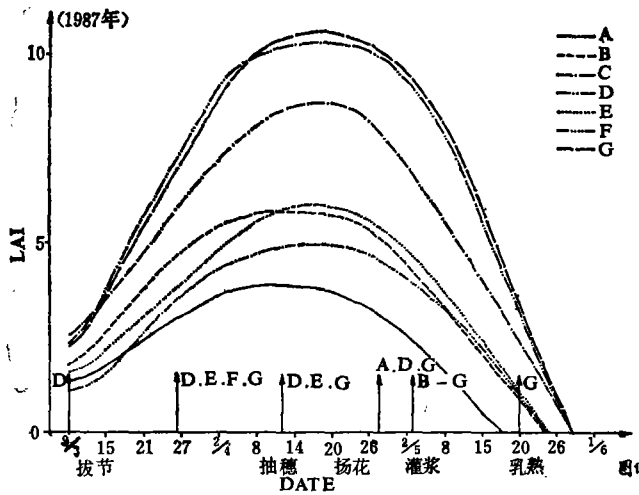


图 1 (b) 叶面积系数随时间变化曲线 (1987 年)

Fig. 1 (b) The variation of LAI with time in 1987

我们用北京大学遥感技术应用研究所研制的 RS-II 型四通道与 RS-III 型二通道野外光谱仪测量了冬小麦生长期内的光谱反射率值 (RS-II 型光谱仪与 TM 的 1, 2, 3, 4 波段相配, RS-III 型光谱仪与 AVHRR 的 1, 2 波段相配)。光谱仪安装在距地面 4 m 高的测试架上, 光谱采样点为直径 1 m 的圆斑。对每个实验地块的光谱测量均采用多次测量后取平均值, 然后计算出冬小麦的绿度值  $G$  (Greens) 和植被垂直指数  $PVI$  (Plants Vertical Index)。PVI 值随时间的变化曲线见图 2 (a) 和图 2 (b)。

光谱反射率的测试方法如下。先将光谱仪对准一个反射系数为  $\rho_0$ 、朗伯性很好的标准板, 读出此时的测量值  $V_0$ , 此时光谱仪接收的光通量为:

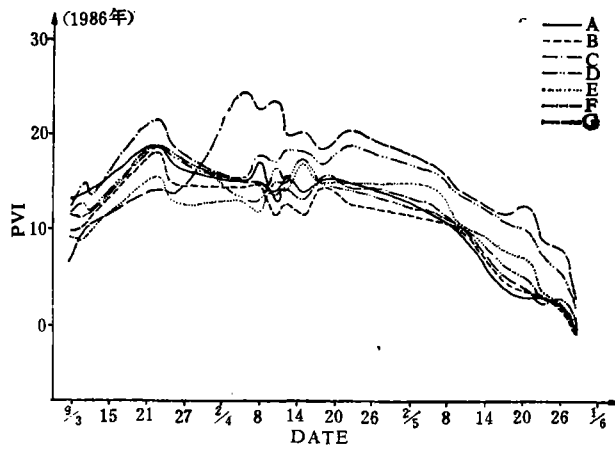


图 2 (a) PVI 随时间变化曲线 (1986 年)

Fig. 2 (a) The variation of PVI with time in 1986

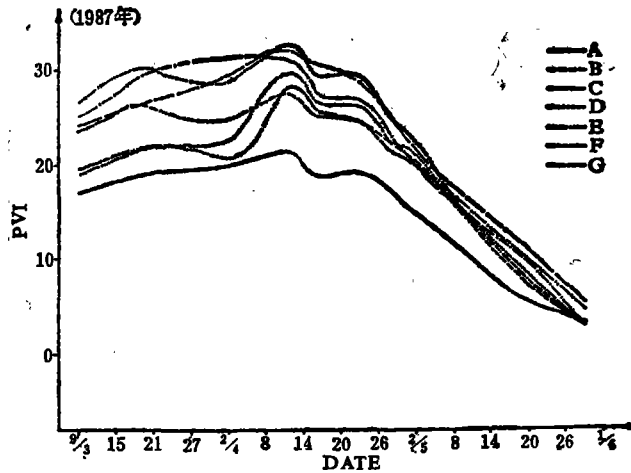


图 2 (b) PVI 随时间变化曲线 (1987 年)

Fig. 2 (b) The variation of PVI with time in 1987

$$\Delta\phi_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \tau(\lambda) \cdot \rho_0(\lambda) \cdot M_0(\lambda) \cdot d\omega \cdot S \cdot \Delta\lambda \tag{1}$$

再将光谱仪对准冬小麦, 读出测量值  $V_1$ , 则光谱仪此时接收的光通量为:

$$\Delta\phi_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \tau(\lambda) \cdot \rho_1(\lambda) \cdot M_1(\lambda) \cdot d\omega \cdot S \cdot \Delta\lambda \tag{2}$$

当分别测量时间间隔很短的  $V_0$  与  $V_1$  时, 可认为此期间天空光和太阳光的照度不变, 即二者的  $E(\lambda)$  相等, 将二者相比, 可得出冬小麦的反射率  $\rho_1(\lambda)$ :

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_0} = \frac{\frac{1}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_1(\lambda) \rho_1(\lambda) M_1(\lambda) d\omega \cdot S \cdot d\lambda}{\frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) \rho_0(\lambda) M_0(\lambda) d\omega \cdot S \cdot d\lambda} = \frac{\rho_1(\lambda)}{\rho_0(\lambda)} \tag{3}$$

则:

$$\rho_1(\lambda) = \frac{\rho_0(\lambda)}{\tau(\lambda)} \cdot \frac{V_1}{V_0} \quad (4)$$

当测量距离很近(几米至十几米)时,可认为光谱仪与被测物体之间的  $\tau(\lambda) = 1$ , 所以公式(4)可简化为:

$$\rho_1(\lambda) = \frac{V_1}{V_0} \cdot \rho_0(\lambda) \quad (5)$$

在上述各式中:  $M$ ——从表面发出的辐射通量密度,即出射率;  $\tau$ ——大气透过率;  $d\omega$ ——光谱仪的立体视场角;  $S$ ——光谱仪探测器的有效接收面积;  $\rho$ ——反射率。

叶面积系数  $LAI$  的测量方法是,在每块实验地中,选择 10 株小麦进行定期测量,在测量中采用了“长宽乘法”,即测量单株上每片叶子的长和宽,单片叶面积=叶片长度×最大宽度/1.2,然后将单株上所有叶片的面积累加起来,按下式求得亩面积的叶面积系数  $LAI$ :

$$\text{叶面积系数} = \frac{\text{单株叶面积 (cm}^2\text{)} \times \text{基本苗 (10}^4\text{/Mu)}}{666.7(\text{m}^2)} \quad (6)$$

### 三、光谱参数的选择

众所周知,红光波段(MSS-5, TM-3, AVHRR-1)是植物叶绿素的吸收波段,而近红外波段(MSS-7, TM-4, AVHRR-2)是植物特征性的反射峰波段,它们是植物最富有特征的两个波段。而光谱仪的测量视场内包括了冬小麦和土壤,因此所测得的是冬小麦与土壤的混合光谱。由于植物叶片对红光波段的吸收率高达 90% 以上,所以对于红光波段,所测得的混合光谱反射率可以近似表达为:

$$\rho_R = \rho_{V,R} \cdot x + (1-x) \cdot \rho_{S,R} \quad (7)$$

其中:  $R$ ——红光波段;  $V$ ——冬小麦;  $S$ ——土壤;  $x$ ——冬小麦的覆盖度。

叶子对近红外光具有较好的透射性能,所以对近红外波段的混合光谱反射率可以近似地表达为:

$$\rho_{IR} = \rho_{V,IR}(n) \cdot x + (1-x) \cdot \rho_{S,IR} + x \cdot \tau_{V,IR}^n \cdot \rho_{S,IR} \quad (8)$$

其中:  $IR$ ——近红外波段;  $\tau_{V,IR}$ ——单片叶子的透过率;  $n$ ——平均叶片的重叠数;  $\rho_{V,IR}(n)$ ——表示叶子在近红外波段的反射率为叶片重叠数的函数。

如令  $G = \rho_{IR}/\rho_R$ , 则光谱参数  $G$  能较灵敏地反映叶面积系数的增减和植被有效光合作用能量的大小,但它有明显的混杂有土壤背景信息和对大气效灵敏的缺点。

光谱参数  $PVI$  是这样构成的: 首先,我们测得实验土壤在不同状态下(含水量、有机质含量、颗粒度、表面粗糙度等等)的光谱反射率,在  $\rho_R - \rho_{IR}$  的坐标系中获得土壤线性回归线方程:

$$\text{对于 TM: } \rho_{S,IR} = 2.470 + 1.140\rho_{S,R} \quad (9)$$

$$\text{对于 AVHRR: } \rho_{S,IR} = 2.790 + 1.190\rho_{S,R} \quad (10)$$

$$\text{对于 MSS: } \rho_{S,IR} = 3.706 + 0.973\rho_{S,R} \quad (11)$$

其相关系数均为  $r > 0.940$ 。

如果取土壤回归线及其垂线为新的坐标系,并称之为  $x-y$  坐标系(即对  $\rho_R-\rho_{IR}$  坐标系转动  $\theta$  角度),那么我们把混合光谱反射率在  $y$  轴上的投影值,称为垂直植被正交指数,即  $PVI$ :

$$\begin{aligned} PVI &= \rho_{IR} \cos \theta - \rho_R \sin \theta \\ &= x(\rho_{V,IR} \cos \theta - \rho_{V,R} \sin \theta) + (1-x)(\rho_{S,IR} \cos \theta - \rho_{S,R} \sin \theta) \\ &\quad + x \cdot \tau_{V,IR}^2 \cdot \rho_{S,IR} \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (12)$$

公式(12)的第二项可以近似为零。当叶片对近红外光的透射可以忽略时,则  $PVI$  值只与植物特性有关,而与土壤背景特性无关;在对冬小麦的产量构成起重要作用的时期内,冬小麦的叶面积系数均高于“1”,所以对冬小麦估产来说,舍弃公式(12)中的第三项也是允许的。

我们的实践证明,冬小麦各产量构成因素与  $PVI$  值的相关系数比其它形式的参数(如  $G$ )要高, $PVI$  值对大气效应的敏感程度比其它形式的光谱参数要小得多。使用  $PVI$  值作大面积估产时,有利于消除背景影响,故在冬小麦的估产问题研究中,我们采用  $PVI$  作为基本的光谱参数。

根据 K. P. Gallo<sup>[1]</sup> 等人的实验结果, $PVI$  值与植被实际光合作用能量有很好的统计相关性,  $r = 0.980$ 。因此可以认为  $PVI$  反映了冬小麦的有效光合作用能量的大小,它必定与光合作用所产生的干物质量成正比。

#### 四、冬小麦的产量构成因素及实例分析

冬小麦的产量构成因素是单位面积上的平均穗数、每穗平均粒数和千粒重,分别用符号  $S$ ,  $L$  和  $T$ ,  $W$  来表示。这 3 个因素在形成的时间上是有差别的。穗数主要取决于有效分蘖数。冬小麦进入起身阶段后,一般不再增加新的分蘖,随后出现的分蘖进入激烈的两极分化期,一些较弱小的无效分蘖停止生长并死亡;到抽穗期,两极分化进入后期,群体穗数基本确定。所以,冬小麦的穗数是在拔节到抽穗阶段形成的,这个阶段亦为穗数的主要决定期。叶面积系数在抽穗期达到极大值,从此叶面积系数趋于稳定和缓慢下降。抽穗以后,冬小麦的生长重心由叶子转向茎干和麦穗。

从抽穗到扬花期,是每穗粒数的决定性时期,这一时期的肥水条件以及光合作用的强弱对每穗的粒数起决定性作用。扬花期结束时,每穗的粒数便已经确定。

千粒重取决于麦粒的灌浆强度和灌浆的持续时间。一般地说,灌浆的强度呈“S”形,即先弱后强,再弱到结束。灌浆物质的来源有两个方面,从扬花到乳熟期,灌浆物质主要来自于当时的光合作用产物;从乳熟到蜡熟期,小麦的茎、叶、叶鞘内部的部分有机物质重新分解,再转运到籽粒上。这两部分的比例各说不一,一般地说前后二者的比例约为 2:1。这两部分之间有较明显的阶段界线,这就是叶面积系数发生显著转折性下降的日期。这是因为,如果后一阶段是以倒三叶重量下降和第二节茎干重量下降为起始标志的话,那么崔金梅等人的实验<sup>[2]</sup>证明倒三叶重量骤降发生在开花后的第 17—18 天,第二节茎干重量发生转折性下降的时间则在开花后的第 23 天,这与图 1 所示的叶面积系数发生

转折性下降的日期是一致的。

实验样地 G 的叶面积系数从抽穗到乳熟前期这段时间 1986 年超过 8, 最大值达 9, 1987 年亦超过 8; 而实际亩产 1986 年为 303.05 kg, 1987 年为 393.61 kg, 产量并不太高。其原因是: (1) 分蘖过多, 群体过大, 穗数 1986 年达  $53.98 \times 10^4/\text{Mu}$ , 1987 年达  $71.83 \times 10^4/\text{Mu}$ , 致使个体弱, 在抽穗到扬花期每株冬小麦的平均光合作用能量小, 因此每穗的平均粒数少, 1986 年仅 14 粒, 1987 年也不过 29 粒。(2) 由于个体弱, 所以灌浆强度弱, 灌浆持续时间短, 造成千粒重下降, 实测千粒重 1986 年为 39 g, 1987 年为 36 g。总之, 实验地块 G 冬小麦的每穗平均粒数和千粒重均为 7 块实验样地中的最低值。由于穗数多, 所以其平衡结果达到中产偏高的水平。实验地块 G 是群体过大造成减产的典型。

实验地块 D 从抽穗到乳熟期, 平均叶面积系数 1986 年为 6 左右, 最大值达 7, 1987 年为 8 左右。穗数 1986 年为  $36.33 \times 10^4/\text{Mu}$ , 1987 年为  $51.53 \times 10^4/\text{Mu}$ 。每穗平均粒数 1986 年和 1987 年均 36 粒。4 月底和 5 月初的两次灌水起到了增强灌浆强度和延长灌浆时间的作用, 这可以从 5 月 6 日到 5 月 10 日它的叶面积系数不仅不下降反而有所增加得到证实。所以, 样地 D 冬小麦的千粒重为 7 块实验样地中的最高者, 1986 年达 51.05 g, 1987 年为 46.59 g。穗数适中, 平均粒数多, 千粒重就高, 致使 1986 年亩产达 485.05 kg, 1987 年亩产达到 432.78 kg。

实验样地 A 由于模拟干旱状态, 1986 年仅浇过 3 次水, 而 1987 年仅浇过 2 次水, 因而在抽穗到乳熟期的叶面积系数很小, 1986 年为 3 左右, 1987 年亦为 3 左右。由于干旱, 影响了冬小麦的正常生长机制, 整体与个体均很弱。穗数少, 1986 年为  $27.75 \times 10^4/\text{Mu}$ , 1987 年为  $29.19 \times 10^4/\text{Mu}$ ; 粒数亦少, 1986 年为 26 粒, 1987 年为 28 粒; 千粒重小, 1986 年为 40.25 g, 1987 年为 39.56 g。灌浆强度弱, 灌浆持续时间短 (A 地的冬小麦一般要比其它实验地块的冬小麦早成熟 10 天左右), 是造成减产的主要原因, 1986 年 A 地亩产为 289.30 kg, 1987 年由于减少了一次灌水, 亩产仅为 246.02 kg。

实验地块 C, B, E, F 各个的穗数、粒数和千粒重均有差异, 但从数据中可看出, 在相同的光合作用条件下, 穗数多则每穗的平均光合作用能量就少, 这将导致每穗平均粒数下降或灌浆强度下降, 从而使千粒重减小。当然, 有许许多多的内外因子直接影响着冬小麦的有效光合作用能量的大小, 所以“相同的光合作用”这一条件实际上总是达不到的。由此可见, 冬小麦的三个产量构成因素之间, 是具有较强的相对独立性的。

应当指出, 我们所做的实验样地虽然不多, 却具有一定的代表性。

## 五、冬小麦的光谱参数与产量构成因素之间的关系

### 1. 每穗平均粒数信息的获取方法

*PVI* 值是反映当时单位面积上植被有效光合作用能量大小的物理量, 这不仅为 K. P. Gallo 等人的实验所证实, 亦与我们的实验结果相一致。实验样地 A, B, C, D, E, F 1986 年在拔节到扬花这一时期遭到了麦蚜虫的侵害, 致使这段时间内的 *PVI* 值产生不规则的波动现象。但这种波动现象并不能掩盖确定的规律性的存在, 用公式  $PVI/S$  来表示每株冬小麦所获得的平均光合作用能量的大小, 其合理性是显而易见的。对每块实验

样地取从抽穗到扬花期  $PVI$  的累加值,并用  $(\Sigma PVI)_2$  来表示,那么  $(\Sigma PVI)_2/S$  与实测的每块实验样地的每穗平均粒数之间的关系可表达为(图 3):

$$L = 4.724 \cdot e^{0.2588(\Sigma PVI)_2/S} \quad (13)$$

虽然这段时间内冬小麦光合作用的产物大部分用于茎、叶的建造,仍可以设想  $(\Sigma PVI)_2/S$  值应与单位长度茎干重量成正比。正如文献[3]所指出的那样,扬花期平均单位长度茎干重量与每穗平均粒数间呈良好的线性关系,相关系数高达  $r = 0.998$ ,所以图 3 所示的实验结果是不足为奇的。

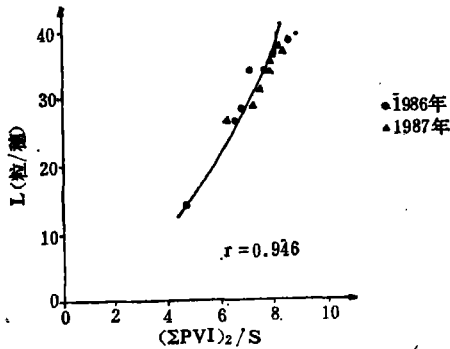


图 3 平均粒数与  $(\Sigma PVI)_2/S$  的相关曲线

Fig. 3 The statistical relationship between average grain number and  $(\Sigma PVI)_2/S$

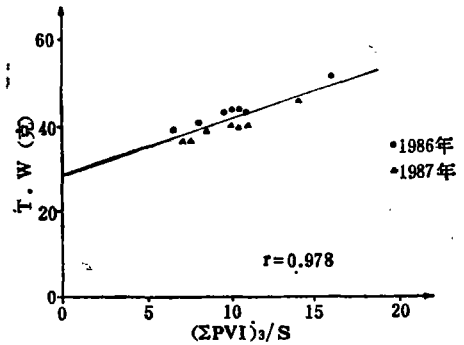


图 4 千粒重与  $(\Sigma PVI)_3/S$  的相关曲线

Fig. 4 The statistical relationship between grain weight and  $(\Sigma PVI)_3/S$

## 2. 千粒重信息的获得方法

我们将冬小麦扬花至叶面积系数发生转折性下降的那一天间的  $PVI$  值累加起来,用  $(\Sigma PVI)_3$  表示,并算出  $(\Sigma PVI)_3/S$  值,那么  $(\Sigma PVI)_3/S$  与千粒重的统计相关性可用下式表达(图 4)

$$T. W = 29.246 + 1.292 \cdot (\Sigma PVI)_3/S \quad (14)$$

$(\Sigma PVI)_3/S$  并不包括冬小麦灌浆的第二个阶段的特征,然而相关系数仍相当高。对此我们可作如下解释:从扬花到乳熟期是冬小麦干物质总重量迅速上升的时期,乳熟期达到极大值,虽然穗重在总重量中的比重,在整个过程中是与日俱增的,但钱维朴等人的实验数据<sup>[4]</sup>表明,到达乳熟阶段,不同产量等级的冬小麦的干物质总重与穗重可以相差很多,而各部分的相对比重却比较稳定;数据表明,冬小麦茎、叶、叶鞘等平均占总重的 70%,而穗重占 30%。这说明,增加单株的总重量才能增加粒重,亦即个体越强才能使灌浆强度大、持续时间长,使随后的茎、叶和叶鞘的干物质转移量多,除非遇到倒伏、干热风等破坏正常干物质转移的现象发生。而  $(\Sigma PVI)_3/S$  却正是表达了这一时期冬小麦个体有效光合作用强弱的物理量,因此冬小麦灌浆的第二个阶段的特征,在一般条件下已包含在  $(\Sigma PVI)_3/S$  之中了。

按照传统观念,每穗的平均粒数会影响千粒重的值,似乎用  $(\Sigma PVI)_3/(S \cdot L)$  代替  $(\Sigma PVI)_3/S$  来与千粒重相关更合理。但实践证明,  $(\Sigma PVI)_3/(S \cdot L)$  与千粒重几乎谈不

上什么相关性, 这表明每穗的平均粒数并不参与千粒重的决定过程。对这一现象可作如下解释:  $(\Sigma PVI)_3/S$  表达的是每株冬小麦平均有效光合作用能量, 它的绝大部分被用于维持植株的生命活动而消耗掉了, 仅有少部分可以积累下来构成干物质, 而籽粒又是这个小部分中的少数, 所以直接用于籽粒重的那部分光合作用能量, 在总光合作用能量中所占的比例是很小的。虽然至今我们还不能确切知道这个比例值是多少, 但从文献 [4] 所提供的实例数据中充分证明上述论点: 亩产为 452.4 kg 的 3 号试验田, 由乳熟到蜡熟期每株小麦平均茎、叶、叶鞘、分蘖节的总失重为 4.955 g, 同一时期每株小麦平均穗增重为 1.285 g。如果把穗的增重设想为由茎、叶等物质转移而来, 那么根据物质不灭定律, 将有 3.670 g 干物质不知去向。显然, 植株要维持生命活动就必须消耗能量, 约占总失重 74% 的那部分物质必定是用在了维持生命活动。事实上, 这段时间内光合作用并没有停止, 因为光合作用的停止就意味着生命的终止, 更谈不上物质转移了。所以, 在估计这段时间内总消耗的能量有多少时, 还必须把这段时间内光合作用所产生的能量加进去。可以肯定地说, 这段时间内总消耗的能量必然比直接作用于穗增重的那部分能量大得多。因此, 我们认为粒数的形成虽然先于千粒重的形成, 但它却不参与千粒重的形成过程, 即用于籽粒增量的那部分能量不构成对同一时期总有效光合作用能量  $(\Sigma PVI)_3/S$  的影响。

### 3. 穗数信息的获得方法

要获得每穗平均粒数和千粒重信息都需要知道穗数, 所以, 如何独立地获得穗数信息并有足够的精度, 就成为解决问题的关键。

冬小麦从返青到抽穗期(河南一般是 2 月 25 日—4 月 10 日左右), 是小麦的两极分化时期, 在抽穗期最终达到稳定的有效分蘖数。因为每蘖一穗, 所以抽穗期的有效分蘖数就是穗数。在这一段时间内光合作用的能量平均有 60% 用于叶子的增长, 光合作用累计能量越大, 最终的叶面积系数就越高。因为每一片叶的面积是基本相同的, 每一成穗蘖茎所包含的叶片数是稳定的, 所以穗数与叶面积系数和这段时间的累计光合作用总能量  $(\Sigma PVI)_1$  成正比。我们计算了  $(\Sigma PVI)_1$ , 它与穗数之间的相关性如下式所示(图 5)。

$$S = 2.66 \cdot e^{0.005(\Sigma PVI)_1} \quad (15)$$

### 4. 产量信息的获得方法

冬小麦的最终产量是由三个产量因素构成的。在完成了产量构成因素的分析与计算后, 就可以利用它们与产量之间的关系来计算产量。我们认为, 三个产量构成因素之积, 构成了最终的冬小麦产量。

$$\text{设: } S = S_0 \cdot e^{ax_1}, L = L_0 \cdot e^{bx_2/S}, T.W = T_0 + T_1 \cdot x_3/S$$

$$\text{根据: } x = S \cdot L \cdot T.W$$

$$\text{则: } x = e^{k \cdot x_2/e^{ax_1}} \cdot (x_3 + K \cdot e^{ax_1}) \quad (16)$$

式中:  $a = 0.005$ ,  $b = 0.258$ ,  $S_0 = 2.660$ ,  $L_0 = 4.724$ ,  $T_0 = 29.246$ ,  $k = b/S_0 = 0.097$ ,  $K = T_0 = 29.246$ ,  $x_1 = (\Sigma PVI)_1$ ,  $x_2 = (\Sigma PVI)_2$ ,  $x_3 = (\Sigma PVI)_3$ 。将  $x$  值与最终产量  $W$  进行统计回归, 得到冬小麦遥感估产的地面模型公式(图 6):

$$W = B_0 + B_1x$$

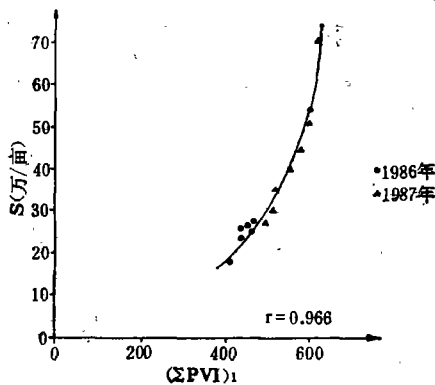
图 5 平均穗数与  $(\Sigma PVI)_1$  的相关曲线

Fig. 5 The statistical relationship between ear number and  $(\Sigma PVI)_1$

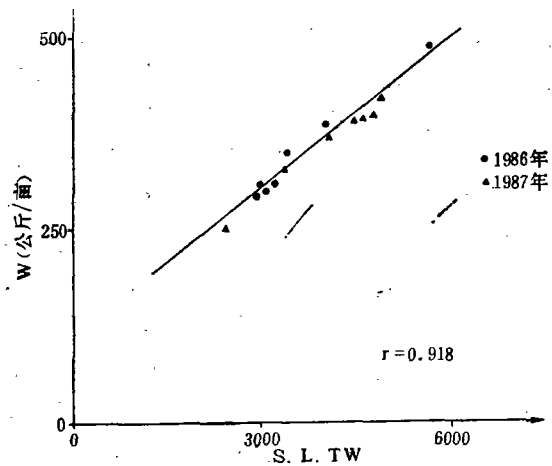


图 6 三个产量结构因子之积与实际单产之间的相关曲线

Fig. 6 The statistical relationship between yield and  $S \cdot L \cdot T \cdot W$

$$= 243.446 + 0.124 e^{0.007(\Sigma PVI)_2} e^{0.005(\Sigma PVI)_1} \cdot [(\Sigma PVI)_3 + 29.246 \cdot e^{0.005(\Sigma PVI)_1}] \quad (17)$$

## 六、讨 论

(1) 以往国内外许多学者大多采用整个生长期或某一段时间内农作物的光谱参数(如  $G$ ,  $ND$ ,  $PVI$ ,  $RVI$  等)的积分值与其产量求相关<sup>[5-9]</sup>,并依此作为遥感估产的基本出发点。我们认为这样做不妥。显然,若按照那样的逻辑方法,则我们的实验样地  $G$  的产量应该是最高的;然而事实证明并非如此。其原因在于,任何光谱参数只是平均单位面积上植物总有效光合作用能量大小的量度,并不反应植物个体平均有效光合作用的强弱,具体到冬小麦来说,决定冬小麦粒数和千粒重的主要因素是后者而不是前者。

自然,决不能说冬小麦三个产量因素间毫无联系,但它们之间的相对独立性是很大的。因此我们认为,要比较正确地估算冬小麦的产量,就必须分别获得三个产量构成因素,才有可能实现。笼统地把三个产量构成因素包括进光谱参数的累加值(如  $\Sigma G$ ,  $\Sigma PVI$  等)中,是不能达到精确估产的目的。

(2) 7 块实验样地虽然处在相同的气候条件下,但由于农艺措施不同(如灌水量不同),它们各自的抽穗期、扬花期和乳熟期并不完全一致,而确定这三个时期对于遥感估产是十分重要的。有无可能凭借光谱参数本身的变化来确定这三个时期呢?回答是肯定的!在正常条件下(如没有病虫害的严重侵蚀),冬小麦的抽穗期对应的叶面积系数达到极大值,因而光谱参数亦相应地达到极大值;扬花距抽穗期一般可确定为 12—14 天;与乳熟期对应的是光谱参数发生转折性下降的日期。因此,用遥感方法来确定冬小麦抽穗、扬花、乳熟这三个时期,从原则上讲是完全可以达到的。

(3) 如何把上述方法与遥感的现实条件结合起来,还有以下几方面的问题需要解决:

(1) 由于大气是地面光谱信息传递到星载传感器所必经的中间通道, 大气效应的修正问题是一个不可回避的难题。虽然这方面的理论研究已有若干进展, 但至今尚未形成一个较为成熟的能进行逐点大气修正的经典方法, 这样, 地面模式就难以应用于卫星资料的定量分析处理。(2) 冬小麦产量构成的关键时间很短, 以河南省为例, 仅 4, 5 两个月。陆地卫星的重复周期为 16—18 天; SPOT 卫星虽可采用斜视方法使重复周期缩短为 2.4 天, 然而斜视将给光谱数据的处理带来新的复杂问题, 而且价格昂贵。所以估计在本世纪末之前, 将主要依靠陆地卫星的高分辨率影像提供冬小麦的播种面积信息, 而依靠 NOAA 气象卫星重复周期短的优势提供适时的光谱信息, 并把二者结合起来, 以达到精确估产的目的。但二者各自的分辨率相差甚远, 如何将其有机地结合起来, 乃是一个急需解决的问题。(3) 由于天气和卫星重复周期等条件的限制, 我们不可能获得每天的光谱信息, 在整个冬小麦生长周期内, 只能获得有限的几次数据。那么, 如何正确地计算  $\Sigma PVI$ , 就成为一个现实问题。(4) 在前面的分析中, 我们所用的概念在某些情况下过于绝对化, 如求取  $\Sigma PVI$  值的起止日期就是绝对化的。而冬小麦生理发育的每个时期, 如抽穗期、扬花期、乳熟期等等, 往往是经历一个短过程, 没有绝对的界线。另外, 每日的光合作用能量值  $PVI$  所起的作用亦不尽相同, 而我们是用简单的累加来求取特征参数, 显然这与植物生长服从罗吉斯特规律<sup>[10]</sup>是不相符的。

## 七、结 论

(1) 遥感估产是可行的。用遥感估产方法可以把三个相对独立的产量构成因素估算出来, 并能达到一定的精确度。其所以可行, 是因为遥感估产所依靠的光谱参数能正确地反映冬小麦的有效光合作用强度, 而冬小麦的穗数、粒数及千粒重都是光合作用的产物。因此, 抓住了光谱参数, 就是抓住了解决问题的关键。

由于冬小麦的三个产量构成因素, 在形成的时间上是可以区分开来的, 所以能够估算出它们各自的值是理所当然的。

遥感估产方法优于其它估产方法, 如气象因子统计方法。气象因子统计法是力图把众多影响冬小麦产量的因子, 诸如温度、水分、日照等, 与产量间求取稳定的多因子统计回归关系。然而, 统计的因子越多, 寻求稳定的统计规律就越困难, 而且有些因子是无法用数字确切表达的, 如土壤肥力、病虫害、干热风的影响等, 因而它们很难恰当地进入统计公式。而遥感方法与之不同, 它抓住了能反映有效光合作用强弱的光谱参数做为依据, 一切影响产量的因子都通过“有效光合作用”这一关口对产量起作用。比如, 1986 年我们的部分实验地块, 遭到麦蚜虫的侵害, 但并没有使我们的统计规律发生动摇。因此, 用光谱参数作为估产的基本特征参数, 具有因素单一、数值稳定、精度高的优点。

(2) 本研究表明, 仅用光谱参数累加值做为基本特征参数是不妥的, 采用光谱参数累加值与穗数的比值作为获取冬小麦粒数和千粒重信息的基本手段更为合理和可靠。这就为从遥感数据中正确地提取冬小麦的产量信息指明了方向。

(3) 这项研究工作仍存在问题, 即在时期选择上的绝对化以及求和方法上的平均化, 使本项研究结果带有明显的物候性限制。看来, 要使冬小麦遥感估产模式更接近客观实

际,采用新的数学手段是势在必行的了。

### 参 考 文 献

- [1] K. P. Gallo. etc., *Remote Sensing of Env*, 17(3), 221—232, 1985.
- [2] 崔金梅等,小麦生长发育规律与增产途径, 79—91, 河南科学技术出版社, 1980 年。
- [3] 张锦熙等,小麦生长发育规律与增产途径, 1—11, 河南科学技术出版社, 1980 年。
- [4] 钱维朴等,小麦生长发育规律与增产途径, 18—28, 河南科学技术出版社, 1980 年。
- [5] C. T. Tucker, *Photog. Eng. and Remote Sensing*, 46, 657—666, 1980.
- [6] S. B. Idso., *Remote Sensing of Env.*, 9(1), 87—91, 1980. S. B. Idso., *Remote Sensing of Env.*, 7(1), 273—276, 1978. S. B. Idso., *Nature*, 266, 624—628, 1976.
- [7] J. E. Chance, *Inter. J., Remote Sensing*, 2(1), 1—4, 1981.
- [8] P. L. Pinter, *Inter. J., Remote Sensing*, 2(1), 43—47, 1981.
- [9] G. D. Badhwar, *Remote Sensing of Env.*, 12(1), 57—79, 1982.
- [10] 牛文元,农业自然条件分析, 259—266, 农业出版社, 1981 年。

## THE STRUCTURE ANALYSIS OF WINTER WHEAT YIELD AND THE PRINCIPAL OF REMOTE SENSING ESTIMATION OF WINTER WHEAT YIELD

Zhu Xiaohong Xie Kunqing Xu Xiru Cheng Jicheng  
(*Institute of Remote Sensing Technology and Applications, Peking Univ.*)

Zhu Baoben  
(*Academy of Sciences of Agriculture, Henan Prov.*)

### Abstract

This paper tells some experimental results of remote sensing estimation of winter wheat yield under the condition of controllable sample fields. The controllable sample field means that winter wheat was grown on a cement pool with 3.25 meters long, 2.37 meters wide and 2.00 meters in depth to enlarge the span of yield by controlling fertilizer and watering. During the growing season necessary agronomic parameters, such as LAI, the ear number, average grain number and the grain weight, etc., were measured, at the same time we measured spectral parameters. Based on finding the relationship between spectral parameters of different stages and three basic factors which form winter wheat yield an integral formular for remote sensing winter wheat yield estimation was found. An analysis and discussion was made for the principal of remote sensing estimation of winter wheat yield.