

大面积小麦遥感估产模型的构建 与调试方法的研究

王乃斌 周迎春 林耀明 邓坤枚

(中国科学院自然资源综合考察委员会, 100101)

1993年6月2日收稿

摘 要

本文重点研究大面积冬小麦遥感估产模型构建及其调试方法。通过分析冬小麦生长发育过程,对光、温、水、肥等必须条件需求规律研究的基础上,提出了以绿度指数、温度和绿度变化速率等因子,构建大面积冬小麦遥感估产模型。为了适应大面积遥感估产运行系统的需要,在变量获取及模型调试等方面进行了一些新的探索。

关键词 遥感估产 绿度指数 叶面积指数 亮度温度

引 言

关于估产模式的研究,早在遥感估产技术产生之前就已在农业管理部门开始构建,并应用其估算农作物产量。开始只是以单项因子建立产量模型,如产量-降雨关系模型等。在早期研究小麦估产模型的众多学者之中,最有成效是加拿大的 Beier, W, 他先后研制了“经验统计模型”;“作物-天气产量预测模型”;“作物-生长模拟模型”,时至今日,仍然有很多学者借鉴贝尔的建模思想,构建农学-气候估产模型。

70年代后期,遥感估产技术出现,使农作物估产模型研究产生了新飞跃,为了适应遥感技术的需要,很多学者在构建估产模型时,将遥感信息作为变量加入到模型中,产生了遥感估产模型。从生物学原理出发,农作物的产量实质是绿色植物利用光能将二氧化碳和水转化成碳水化合物。对于粮食而言,生物产量多时,其籽粒产量也高。而叶绿素是植物产生干物质的基础,因此在单位面积内,绿色体及叶绿素的多少与产量有直接关系。这种生物学特征,遥感光谱反映是十分敏感的。很多学者在充分利用遥感光谱信息的同时,特别强调气象、土壤等辅助资料,对农作物进行长势与产量预报,于是便产生了光谱-产量模型;绿度-产量模型等。

随着遥感技术的进步,遥感估产模型的研制也不断地开拓、进展。在“七·五”期间,我国的徐希孺、朱晓红等人,根据小麦各生育期对于形成产量的贡献及与 PVI、LAI 关系,建立了冬小麦遥感估产地面模型,并确定了各因子的权重系数。近期一些文献中,常常提到 SAIL 模型。SAIL 模型在模拟植冠反射,特别是修正植冠分布差异,得到令人满意的结果。但是模型所用参数很难采集。如叶面方向角分布 (LAD) 和单叶反射率 (ρ) 及叶面积指数 (LAI) 等。

美国农业部 (USDA) 利用长序列遥感信息,估算世界粮食产量,其主要手段是根据

当年遥感信息与前一年相同时期比较,估算各种粮食的年际变化波动趋势和波动差异,其结果尚好。

从上述各种估产模型构成分析,除美国农业部的方法以外,均需要大量的地面数据采集工作,这对于大面积遥感估产运行系统的运行十分不利,特别是我国幅员如此广大,更难于实时采集数据。因此,必须研制既适宜遥感估产实用,又合乎我国国情的农作物估产模型。

一、估产模型因子分析

影响冬小麦产量的因子众多,其中主要有光、温度、水、肥等因子。上述各种因子中,一些是受人类控制的因子,而另一些则是受自然条件的影响,在构建估产模型时必须加以分析。

(一) 光、温条件分析

光是小麦进行光合作用的主要能源。小麦的生物产量有 90—95% 都是来自光合作用形成的光合物质。

我国大陆部分地处北纬 15—55° 之间,光能资源较为丰富。根据一些学者对于光合潜力的计算,冬小麦产量距光合潜力产量相差甚远,目前光能的利用率仅占总辐射能 1.15%,这说明光能供给充分。当前影响小麦产量主要是光照的时间与空间分布问题。当小麦扬花、灌浆时期,阴天多,光照不足,影响籽粒形成。在小麦起身之后,冠层受光与群体下层受光强度差异较大,特别是叶面积指数达到 5m²/m² 以上,严重影响群体下层的光合作用。

表 1 是我国主要产麦区的冬小麦光合有效辐射量。从表 1 统计结果分析,光合有效辐射量多少,主要和冬小麦生育时间长短有关,而与冬小麦各个发育阶段无明显关系。温度是小麦生长发育的不可缺少的生存条件之一,小麦植株内各器官的生物化学变化和新陈代谢都需要一定的温度条件,当温度条件适宜,并能持续一定的时间,小麦生长发育各个阶段便能很好地完成;如果在小麦生育期内温度条件超出了它生理忍受的极限量,生长发育便会停止。如在灌浆期遇到干热风,常常发生“逼熟”,灌浆便停止,千粒重下降,造成小麦减产。

冬小麦的整个生长发育过程经历秋末、冬季、春季和初夏,其温度变化呈马鞍形,即播种期高,越冬期低,成熟期又高,温度条件是决定冬小麦各个生育阶段的关键因素,从图 1 和表 1 中可以看出,我国冬小麦的生育期,南方与北方可相差一倍以上,而积温却相差无几,一般都在 2000—2200℃,个别地

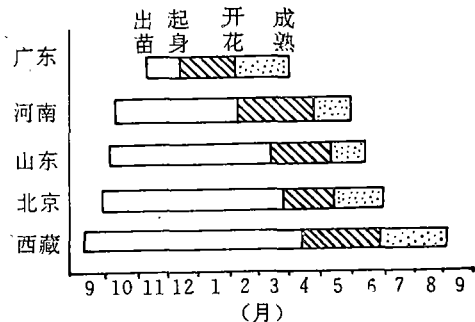


图 1 我国各地小麦生育期
Fig. 1 Wheat growth period of difference area in China

表 1 冬小麦生育期地面温度与光合有效辐射量
Table 1 Ground temperature and photosynthetic effective radiation quantity during winter wheat growth period

地 点		出 苗	起 身	开 花	成 熟	合 计
广东	日期	11 月 15 日	12 月 17 日	2 月 3 日	3 月 31 日	
	地温累加(°C)		626.0	771.3	1027.5	2424.8
	光合有效辐射 (兆焦耳/平方米)		161.0	205.0	228.2	595.0
河南	日期	10 月 10 日	2 月 14 日	4 月 25 日	5 月 31 日	
	地温累加(°C)		684.9	774.9	849.1	2308.9
	光合有效辐射 (兆焦耳/平方米)		505.2	405.0	295.0	1205.2
山东	日期	10 月 10 日	3 月 19 日	5 月 5 日	6 月 10 日	
	地温累加(°C)		757.8	777.6	976.8	2512.2
	光合有效辐射 (兆焦耳/平方米)		754.5	365.8	351.6	1471.9
北京	日期	10 月 1 日	4 月 2 日	5 月 12 日	6 月 25 日	
	地温累加(°C)		400.0 (735.4)	752.0	1186.1	2338.5
	光合有效辐射 (兆焦耳/平方米)		870.0	366.1	433.9	1670.0
西藏	日期	9 月 15 日	4 月 12 日	6 月 22 日	8 月 31 日	
	地面温度累加(°C)		1063.5 (1128.6)	1205.9	1330.7	3600.1
	光合有效辐射 (兆焦耳/平方米)		1660.9	772.0	688.0	3120.0

注: 本表温度条件没用积温, 而用地面温度累加表示, 这是根据最新遥感研究结果, 地面温度可以从遥感信息中反演获得。

区达 2400°C, 江南局部地区也有 1800°C 的地方(西藏除外)。由此可见, 冬小麦在各个生长发育阶段, 只要温度条件达到一定指标, 就会转入到下一个生长阶段, 这一点是我们应用温度构建估产模型的重要依据。表 1 是冬小麦生育期地面温度与光合有效辐射统计。

综上所述, 光、温度都是小麦生长发育的必要条件。但是, 一般来说光、温度条件很难做到人为控制, 即使运用某种栽培技术可以改善一些光、温度条件, 也难于大面积推广。

(二) 水、肥条件分析

水分条件既是气候因素, 又是土壤因素的组成因子, 它在土壤和空气里的数量多少, 直接影响小麦的生长发育。小麦通过根系吸收土壤中的水分, 输入到蒸腾器官。在蒸腾作用过程中, 又把水分失掉, 保持植株内水分收支平衡, 以达到正常生长的目的。

中等产量水平的麦田, 每亩需耗水 300—350 立方米, 折合田间降水约 500 毫米左右, 按此种降水指标衡量, 我国广大冬麦区, 除长江中、下游不缺水外, 淮河以北和南岭以南以及新疆、云南、贵州、西藏等地区均为缺水区。虽然有些地区可以通过灌溉来补充, 但是, 就全国范围来说, 在冬小麦生育期内, 干旱缺水是主要影响产量的因素。

肥料, 也可以说是小麦的养分条件。小麦在生长发育过程中, 所必需的营养元素很

多,其中氮、磷、钾、碳、氢、氧、钙、镁、硫等,尤其是对氮、磷、钾的需要量最多,每年必须施用肥料给以补充。根据有关试验资料证明,在自然条件与管理水平相似的情况下,施肥情况不同,产量相差很大。

从表 2 中可以看出,冬小麦产量的高低与它的各种营养元素有较大的关系。因此,我们在遥感估产构建模型时,必须综合考虑水、肥对小麦产量的影响。另一方面,水、肥条件,对于灌溉地区来讲,尚能人为控制,所以在数据采集上也较为容易。

表 2 不同施肥情况产量比例

Table 2 Crop yield proportion with difference fertilizer

试验地点	施肥情况	产量比例 ¹
山东禹城	不施肥: N · P: N · P · K	1:1.659:2.292
山东禹城	N · P: N · P · K	1:1.382

二、大面积小麦遥感估产模型的构建

在构建大面积遥感估产模型时,首先研究农作物形成产量过程中各阶段的生物学特性。其次是所用的因子对产量形成的影响,以及变量获取的难易程度。

(一) 绿度指数与叶面积指数的关系

很多学者运用遥感数据中的绿度指数与作物叶面积指数建立联系,构建估产模型,这是无可非议的,因为绿度指数与叶面积指数之间确有良好的相关关系。但是应当明确指出这种关系不是在小麦全生育期内都存在。图 2 是冬小麦绿度指数曲线和叶面积指数曲线。如图中所示,绿度指数与叶面积指数仅在三月初至四月中旬,相关性较好。如果用小麦发育阶段来说,就是小麦“起身”至“抽穗”之间,两者相关性最好。在此之后,其相关性就不十分明显了,因为叶面积指数达到 $5\text{m}^2/\text{m}^2$ 以上时,绿度趋于饱和,叶面积指数再增长,

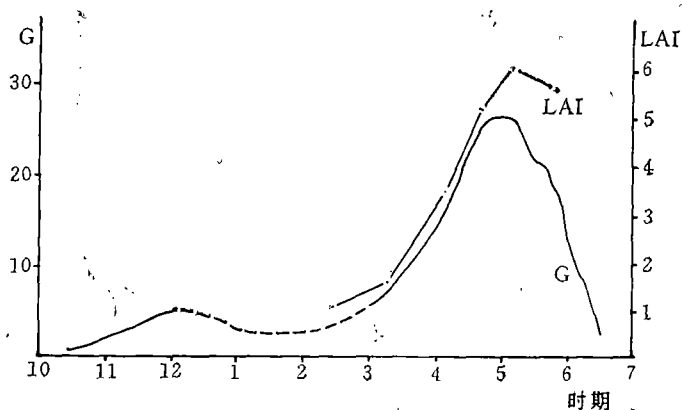


图 2 冬小麦绿度,叶面积指数曲线

Fig. 2 Greenness and leaf area index curve of winter wheat

绿度指数不会有太大的变化了。因此,在抽穗以后的小麦长势状况,再以绿度指数为指示变量就显得有些不适合了。所以,必须选择更适合的因子来构建估产模型。

(二) 大面积小麦遥感估产模型的构建

通过各地冬小麦生长发育特征分析,从形成产量的三要素(亩穗数、穗粒数、千粒重)观点出发,采用分段相关建模。

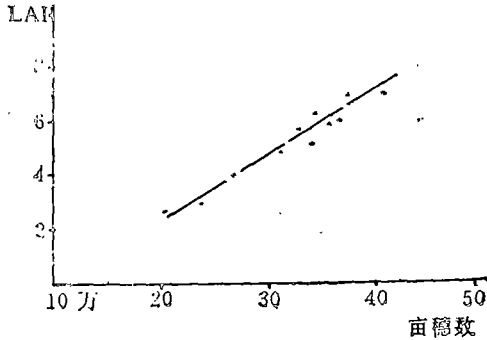


图 3 叶面积指数和亩穗数

Fig. 3 Leaf area index and wheat ear's number per mu

亩穗数 叶面积指数与亩穗数之间有较好的线性关系(图 3),而绿度指数在冬小麦形成亩穗数阶段又与叶面积指数有比较好相关关系(见图 2)。因此,在确定亩穗数时,应考虑以绿度为因子。

穗粒数 冬小麦穗粒数的多少取决于拔节至灌浆初期生长状况,因为这一时期是小麦幼穗分化,从护颖分化到花粉粒形成阶段。它是以颖片和雌雄分化为主,并逐步进入配子体分化形成期。该阶段的发育状况,直接影响受精粒的形成,以致于直接关系到每穗粒数。因此,冬小麦在此

阶段对温度要求严格,如果温度较高,发育便加快小花退化就多,因而形成小穗数多,而小穗粒数少的状况。反之温度适宜可以增加小穗的粒数。这是用温度因子作为建模依据。

千粒重 影响小麦千粒重形成的时间主要在灌浆期。该时期正处在入夏,气温迅速上升。如果水肥条件不佳,遇到连续三天 30℃ 高温,就会造成“逼熟”,叶子干枯,停止灌浆,形成瘪粒,千粒重下降。因此,构建千粒重模型时应综合考虑水、温、肥等条件。山东禹城地区,在相同的条件下浇灌浆水和麦黄水,一般能提高 7—20% 产量。蜡熟末期,旗叶变黄,干物质积累已经停止,所以在形成千粒重过程中,绿度的变化速率是很有意义的指标。它既能体现小麦后期水、肥条件的性状,也能表示小麦后期的生命过程。

基于上述分析,采用绿度指数-温度-绿度变化速率来构建大面积小麦遥感估产模型。

$$\hat{Y} = a \Sigma G \cdot b \frac{T_0}{T_i} (D_0 - D_i) \cdot \left[Q / \left(\frac{\Delta G}{\Delta T} \right) + C \right] + W$$

式中:

\hat{Y} : 估算的单位面积产量(公斤/亩)

G : 返青至抽穗绿度累加以 ΣG 表示

T_0 : 拔节后期至灌浆始期小麦品种需要的积温或多年平均地温累加(℃)

T_i : 当年拔节后期至灌浆始期积温或当年地温累加(℃)

D_0 : 小麦灌浆起始日期(天)

D_i : 拔节后期日期(天)

Q : 小麦品种标准千粒重(克)

ΔG : 灌浆始期至灌浆终止的绿度差

ΔT : 灌浆始期至灌浆终止日期差

a, b, c : 试验常数

w : 自由项(专家意见)

上式中 T_0, D_0, D_i, Q 具有地域性规律, $G, T_i, \Delta G$ 和 ΔT 为动态变量, a, b, c 和 w 可根据实际情况调整。

以禹城县石屯乡为例计算单位面积产量:

$$\Sigma G = 172.1; T_0/T_i = 1.06; \Delta G/\Delta T = 0.89; Q = 53;$$

$D_0 - D_i = 46; w = 0$; 缺苗断垅需减去 15%(根据农学家的意见)。

$$\hat{Y} = 0.85 \times 32.7 \times 29.26 \times 46.6 \times 0.01 = 378.99$$

计算中试验常数 $a = 0.19; b = 0.6; c = -13$; 石屯乡(5号抽样点)实测亩产 381.7kg, 其误差较小。

(三) 模型因子的获取

模型的优劣一方面取决于它本身的实用价值, 另一方面也要看构建模型的因子(变量)是否能够较方便地获取。本模型所用的变量有绿度指数、温度和小麦生长后期的绿度变化速率。根据最新遥感技术研究成果^[4], 上述因子均可从遥感信息中获取。

1. 绿度指数的获取

在遥感估产工作中, 需要用同步的绿度指数来监测作物长势, 估算农作物产量。这就说明用长周期的卫星数据不可能做到实时监测和估产。NOAA-AVHRR 数据信息具有时频高, 覆盖面积大, 波段范围宽、成本低等特点, 适宜于遥感估产应用。为了准确地获取模型因子, 必须对 AVHRR 数据进行辐射校正, 由于没有得到 TOVS 资料, 我们用 Jeffery 方法进行辐射校正 (ch_1, ch_2)

$$R = (d^2/Z) \cdot (a + b \cdot c)^{[2]} = d^2 \cdot a/Z + d^2 \cdot b \cdot c/Z$$

式中 R 为反射率; d 为日地距离(天文单位); Z 为太阳天顶角余弦; a 为截距; b 为增益系数 ($ch_1 = 0.09325; ch_2 = 0.08475$); c 为象元值。用 1、2 波段的反射率值就可以计算各种绿度指数。

2. 温度因子的获取

获取准确的温度因子, 是比较困难的, 特别是在大面积估产时, 要想采集各种类型麦地温度几乎是不可能的。在试验中我们用气温因子构建的模型, 而在大面积估产时将要采用地温作为模型因子。

A. 气温是通过估产区域内各地气象台站观测资料和本专题所设各样点实测资料中获取。

B. 地温, 如果用常规方法, 地温数据采集比气温还要困难, 因地温涉及面更广, 更不易采集。但是, 根据最新遥感技术研究成果表明, 地温可以从 NOAA 的 4、5 通道信息反演获得。

$$T_g = g_1(T_b) + g_2(T_b)^{[3]}$$

T_g : 地面温度

g_1, g_2 : 任何形式的函数

T_b : 通道中心波长处转换的亮度温度

ε : 波段平均发射率。

用上述方法获得地温,对 US-1976 标准大气拟合结果,其误差小于 0.1°C ,对全部七种模型大气拟合表明,误差不大于 0.2°C 。对于大面积遥感估产来说,这样精度已完全符合要求了。

(四) 因子的量化与取值

本模型在因子获取时要求有一定的时间性,如果偏离这个时间,因子在模型中的作用就不明显了,因此,必须保证在小麦生育期内的任何时刻都能取得所需因子。其做法是:将在小麦生育期内所接收 NOAA 系列图像数据经辐射校正计算的绿度指数绘制成绿度指数曲线,然后取其指定时间内的累加值(积分值)。同样,也可将温度指标绘制曲线,并取其值。应当指出,当所需因子时刻尚未有 NOAA 图像数据,只要在以后若干日内能够获得图像数据,将绿度指数曲线连续绘出来,同样能够取到因子值。这样取得因子值才能与小麦生育期各阶段联系起来,达到因子在模型中的预期作用。

三、模型调试方法

模型调试的目的主要是确定试验常数,而试验常数确定得是否正确,直接影响模型的应用与推广。以往在构建相关模型时,都是根据相关系数 r 的数值来衡量模型的估算精度,这实际上是一种误解, r 仅表示给出因子变量与拟合曲线之间相关程度,并不说明模型推广后估算精度。因此,这种模型常常有系统误差存在,给产量估算带来无法消除的影响。

本模型试验常数中,有乘因子常数,也有和的因子常数,从数理统计学原理分析,乘因子常数不正确直接影响模型误差函数曲线的形态,而和因子常数不正确则影响模型误差函数曲线分布的位置。因此,在模型调试过程中,必须设置有针对性限制条件,使之调试出正确的常数。

模型中有试验常数 a, b, c 三个,由于 a 与 b 是积关系,所以只调试其积即可,而 c 是和因子常数,则需单独调试。

(一) 和因子常数 c 的调试

首先选数十个测产样点,用建成的模型估算其产量,并与实测产量进行比较,求出测产的误差总和,看是否趋近于零。如果测产误差总和近似等于零,说明常数 c 确定的无误,否则需要进一步调整。具体方法有两种。

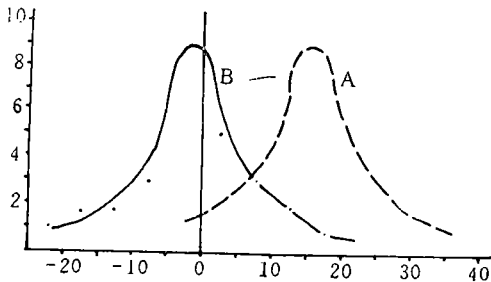


图 4 c 调试前后误差函数曲线对比

Fig. 4 Comparison of error function curve before and after c adjustment

1. 试验逼近方法,图 4 中的 A 是调试前的误差函数分布曲线,其峰值在 15kg 左右,经计算产生误差均值是 15.9kg, 误差总和为 477, 因此该模型有正的系统误差存在,按误差改正的法则,调整常数 c , 经过多次试验逼近,使其误差总和趋近于零为止。图 4 (纵座标为频率,横座标为误差)中的 B 为调整后的误差函数曲线,其误差总和为 -0.4kg。表 3 是调整后的计算表。

2. 反演方法,求出误差平均值,根据模型算法反演来确定 c 值。应该说明,用反演法确定的 c 值也需经过求和验证。因此,和因子常数 c 的调试限制条件为估产误差总和趋

表 3 试验常数调整后的实测产量与估算产量对比

Table 3 Comparison between measuring crop yield and estimating crop yield after adjustment of testing parameter

序 号	样地号	测 产	估 产	ΔY
1	4	257.9	288.5	-30.6
2	3	309.1	320.6	-11.5
3	10	322.4	310.1	12.3
4	12	418.4	420.2	-1.8
5	15	416.5	410.5	6.0
6	16	374.7	351.2	23.5
7	18	533.3	510.1	23.2
8	22	403.7	424.5	-20.8
9	26	331.7	330.5	1.2
10	30	303.5	310.2	-6.7
11	33	405.0	410.1	-5.1
12	37	461.1	457.5	3.6
13	40	410.6	412.5	-1.9
14	44	320.0	321.1	-1.1
15	47	327.6	326.8	0.8
16	49	346.9	350.2	-3.3
17	50	520.6	495.5	25.1
18	52	362.3	365.4	-3.1
19	54	381.7	379.0	2.7
20	56	398.3	381.5	16.8
21	59	259.4	271.2	-11.8
22	65	414.6	410.5	4.1
23	81	319.8	321.1	-1.3
24	91	259.9	260.5	-0.6
25	100	374.9	375.9	-1.0
26	101	439.6	446.1	-6.5
27	109	284.7	281.5	3.2
28	111	293.1	293.5	-0.4
29	115	277.6	298.7	-21.1
30	120	477.5	471.9	5.7

于零。

(二) 积因子常数 a 、 b 的调试

经过上述和因子常数的调试,测产误差总和已趋于零,这种模型还不能达到推广的目的,因为积因子常数确定的不精确,往往可以产生正、负两个方面的粗差,因此必须进行验证。图 5 中的 A 是积因子常数调试前的误差函数曲线,不论在正方向,还是负方向都有粗差存在,其最大误差达到 $\pm 45\text{kg}$ 左右,显然这种模型不宜推广应用。

积因子常数调试,我们是用反演法进行的。经过多次试算,取其估产误差平方和最小的一个。此时积因子常数,就是最后所确定的数值。图 5 (纵座标为频率,横座标为误差)中 B 是积因子常数调整后的误差函数曲线。

所以,调整积因子常数的限制条件是估产误差平方和趋于最小。

至此,模型调试工作才全部完成。当然,任何模型都不是万能的,由于地区自然条件、生产水平的差异性,在应用时还应增加一些区域性因子,才能推广应用。

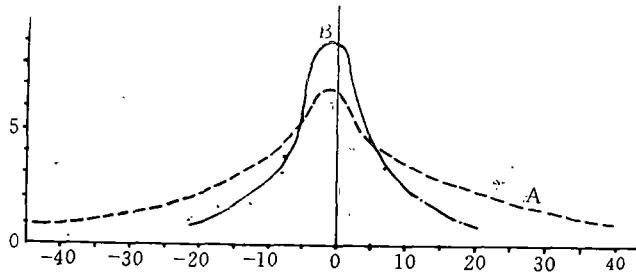


图 5 积因子常数调试前后误差函数曲线对比

Fig. 5 Comparison of error function curve before and after adjustment for parameter of product factor

四、结 束 语

本研究是从大面积小麦遥感估产应用的目的出发,在禹城县遥感估产试验的基础上,吸收了前人的科研成果,研究构建了的大面积冬小麦遥感估产模型。在建模过程中充分考虑了冬小麦生长发育的各种必要条件和遥感技术特点,试图在估产模型构建、变量获取以及模型调试等方面走出一条新路,并使模型具有较强的可操作性。由于建模试验基地只有 990 平方公里,因此,所建模型肯定会有很大局限性,有待于在今年大面积冬小麦遥感估产工作中进一步试验和完善。

参 考 文 献

- [1] 田国良主编,遥感动态研究,科学出版社,1990年。
- [2] Jeffery C. Eidenshink, The 1990 Conterminous U.S. AVHRR Data Set, PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING and REMOTE SENSING Vol. 58 No. 6, pp. 809-813, 1992.
- [3] 秦 益,田国良, NOAA-AVHRR 图像大气影响辐射校正方法研究及软件研制, 1992.7.

- [4] 徐希孺主编, 环境监测与作物估产的遥感研究论文集, 1991。
[5] D. J. Major, Accuracy and Sensitivity Analyses of SALL Model-Predicted Reflectance of Maize. REMOTE SENS ENVIRON 41, 61—70, 1992.
[6] 胡庭积, 杨永光主编, 小麦高、稳、低理论与技术, 农业出版社, 1985年。

A STUDY ON MODELLING WINTER WHEAT YIELD OF LARGE AREA USING REMOTELY SENSED INFORMATION

Wang Naibin Zhou Yingchun Lin Yaoming Deng Kunmei

(Commission for Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This paper centers on development and calibration of winter wheat yield remote sensing model. After analysing the requirement of necessity for wheat growth such as sun light, temperature, water and fertilizer, we developed a winter wheat yield remote sensing model for large area based on vegetation index, temperature change rate, greenness change rate, etc. To meet the requirement of operational system for estimating winter wheat production of large area using remotely sensed information, we developed several novel techniques in variable acquirement and model calibration.

Key words Crop Yield Estimation by remote sensing Greenness Index
Leaf Area Index Brightness temperature