环 境 遥 感
第 9 卷 第 2 期 REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT Vol. 9, No. 2
1994 年 5 月 CHINA May, 1994

对建立遥感估产模式的几点初步认识*

徐希孺 牛 铮 曹洪凯 方向法
(北京大学遥感技术与应用研究所 北京 100871)

摘 要 本文从分析遥感光谱参数的生物学意义着手，论证了正确建立遥感估产模型的可能途径。对几种有代表性的遥感估产模型作了分析，作者认为把可见光、近红外波段的遥感信息与热红外信息有机结合是解决遥感估产模型的最佳方案。对 NOAA-AVHRR 的第 1 通道与第 2 通道光谱数值进行非朗伯体特性的纠正是必要的。遥感估产模型不仅可以使估产的空间尺度大大缩小而且参数数目亦可大大减小，更有利于实际运行。

关键词 遥感估产模型，非朗伯体特性

引言

遥感估产问题很早就被列为遥感应用的主要论题，但是由于这一问题的复杂性，虽经 20 余年的努力，却仍然是当代科学家孜孜不倦地探讨对象。我们认为建立遥感估产模型的关键问题有 3 个，它们是：(1)遥感数据是怎样携带作物产量信息的？(2)如何从遥感数据中精确有效地获取作物产量信息？(3) 遥感估产方法与其它估产方法相比其真正的优势何在？

1 遥感数据是怎样携带作物产量信息的

在以往 10 至 20 年间，人们曾广泛地采用过这样一种方法去寻找遥感估产模型，即通过试验田，在实测光谱数据基础上，选择对作物最具有特征性的波段，比如红外与近红外波段，构成各种形式的光谱参数，最常见的有比值参数，标准差形式以及垂直植被指数形式。在产量与光谱参数间直接求统计相关关系。这种方法在探索遥感估产模型的初期起过积极作用，然而它的致命弱点是在没有弄清生物—物理机制前题下，所获得的统计规律各式各样，相关模型满天飞。但缺乏广泛的适用性。

如今人们认识到传感器所传递的遥感信息，本质上讲只是非朗伯体性质的作物层对入射阳光的散射光亮度大小的反应。影响它的因素较多，有太阳天顶角 (θ_0)，视线天顶角 (θ_v)，太阳光线与视线间的相对方位角 (φ)，叶面积指数 (LAI)，叶倾角分布函数 (LAD)，作物高度，作物垄的空间取向等，也就是说作物层的散射光亮度是一个多元函数。当 θ_0 取定值，θ_v 取零值，对一定的作物品种而言，在作物器官生长阶段光谱参数与叶面积指数间有较稳定的正变函数关系[1,2]。这可以说是光谱参数的第一类生物学意义。

* 本文的工作是在“八五”攻关课题“松辽平原玉米遥感估产”的支持下进行的。
收稿日期：1993 年 3 月 1 日，收到修改稿日期：1993 年 6 月 14 日

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从这点出发，我们再回过头去分析一下许多单纯性统计模型，往往发现它们不仅在使用光谱参数时十分粗糙，忽略了光谱参数是个多元函数的性质，而且往往与这样一个最基本的农学实践相矛盾。要想获得高产必须合理密植，即要有一个恰当的最大叶面积指数值。所以在光谱参数值与产量间构成任何形式的单纯性正变关系都是不恰当的。

人们在逐渐抛弃了单纯性统计模型之后，作物干物质产量预报模式得到了广泛的研究与讨论[3,4]。它的基本思路是通过遥感数据推断作物层对辐射能的截获量，从而预报干物质产量。在经济系数相对稳定不变前题下，由干物质量推断作物产量。为了正确评价这种模式，我们应当注意到 C. J. Tucker 等人的工作[5]。他们从辐射传输方程出发，基于作物理想条件下光合作用产物与直射辐照度间的实验规律，从理论上论证了以辐照度为参数条件下，干物质产量与比值光谱参数、垂直植被指数间有近似线性规律(图 1)，换言之，不同辐照度条件下，相同的光谱参数值可以获得不同的理想干物质产量。实际干物

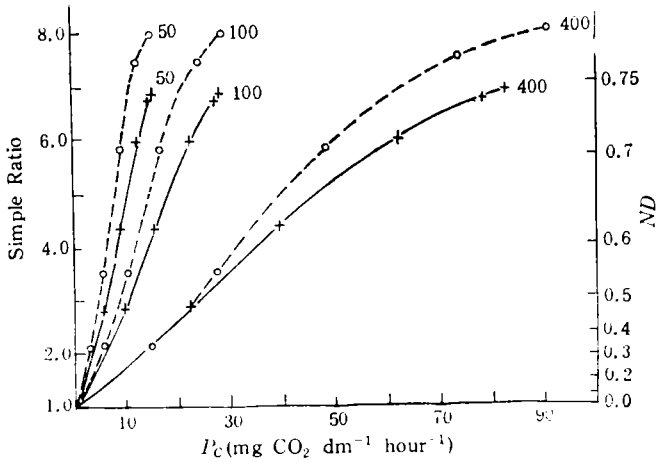

图 1　干物质产量 (Pc)与光谱参数间的关系[6]

Fig. 1　The relationship between dry biomass and spectral parameters

质产量还必须乘以温度、湿度等不同要素的修正函数，C.J. Tucker 等人的工作揭示了光谱参数与作物理想干物质产量间的函数关系，这可称之为光谱参数的第 2 类生物学意义。由此可见，光谱参数必须配合相应的辐照度数据才能获得理想条件下的干物质产量。要获得与遥感数据相匹配的有效辐照度数据，以及获得温度、湿度等要素的修正函数是十分复杂而困难的。其次高干物质产量是高产的必要条件，但不是充分条件，也就是说高产必须以高干物质量为前题，但其逆定律并不成立。实际上经济系数是受各种自然灾害的影响而变化不定的。

事实上作物产量的形成经历了一个复杂的变化过程。但就冬小麦、水稻、玉米等主要作物产量来说它们都决定于 3 个构成要素：穗数、每穗平均粒数，和穗粒重。冬小麦穗数取决于有效分蘖数。因玉米没有分蘖问题，它的穗数取决于每亩成活的苗数。这就是所谓群体大小问题，而粒数与粒重则取决于植株的个体强壮程度。农学家用群体与个体间的相互矛盾与制约的理论辩证地论证了高产的规律。人们可以依靠群体大而取胜，亦可争

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

取粒数多、籽粒重而获高产。可以说自出苗到收获影响产量的因素众多，植株自出苗始就向最终产量飘忽不定地走去。以冬小麦的有效分蘖数为例，它的形成经历了一个复杂多变的过程。首先与冬前播种量有关，如果播种量太大，由于植株过密彼此争阳光、争水肥将会影响每一植株的分蘖数；过稀则直接影响到每亩的总株数。冬前分蘖程度又直接受地温、水肥、阳光等条件的控制。返青后冬小麦将再次分蘖达到某个极值，再经历“两极分化”过程，弱苗死亡，从最大分蘖数跌落下来。抽穗期结束穗数固定不变。显然确定穗数对正确估产是个关键步骤，但从跟踪冬小麦分蘖过程达到确定有效分蘖数的目的是十分困难的。就拿“两极分化”为例，它无法用数学函数描述，最大分蘖数如何确定？跌落下来，跌多少？当然我们不能期望从遥感数据中获得每块地的播种量，也无法获得分蘖状况及“两极分化”信息，但是冬小麦每株一穗，到达抽穗期，每株的平均叶面积数对某一品种是稳定的，因此穗数与最大叶面积指数成正比关系。我们可以期待利用遥感光谱参数去正确估算最大叶面积指数，可以完全不必过问穗数的复杂形成过程。

如何获得“个体”信息呢？农学家已经证明了植株蒸腾是水分在植株内流动的原动力。植株受旱，它的根系从土壤中吸不到水分，轻则减产，重则枯死。同样如果植株始终处在饱和状态的空气中，它亦将“憋闷”而死。水分在植株内流动所起的作用犹如人体内的血液，是保证必要的养分输送及光合作用所产生的干物质输运到籽粒的前题。彭曼等人在能量平衡概念基础上研究了作物蒸腾与环境参数间的关系，提出用“缺水系数”概念科学地表达植株蒸腾状况[7]。作物的蒸腾状况是作物个体生理状况的一个综合。评定指标作物处于良好的蒸腾状况必然有较多的干物质产量使作物个体强壮，强壮的个体又反过来使作物植株在争水争肥争光的竞争中处于有利地位，并且具有更强的抗击自然灾害的能力，因此“缺水系数”对个体状况的描述具有综合性。但是长期以来彭曼的理论并没有付之实施，其根本原因在于在大面积范围的取得有代表性的植被冠层温度是很困难的。事实上国内外已有许多科学家通过实验证明作物产量与气温—叶温差（ΔT）有很好的相关性[6,8]。不过确切地说作物的热红外信息表达的是植株“个体”状况，并非群体大小。因此把可见光，近红外遥感信息与热红外遥感数据有机结合可以期望彻底解决遥感估产的模型问题。

2 作物产量信息的获取

如何从遥感数据中精确有效地获取作物产量信息？遥感信息的特点是空间上的广延性，时间上的瞬时性。任何遥感数据只表达了地表面的瞬间物理状况，而作物产量的形成是一个日积月累的慢变过程。以冬小麦、玉米为例，它们的穗数分别在抽穗期与抽雄期确定，但粒数，冬小麦要延迟至开花末期，而粒重则初步确定于乳熟期，最终决定于蜡熟期，由此可见单凭某个瞬间的遥感信息是不能完成正确估产任务的。在可以预见的将来，遥感估产只能依靠低空间分辨率高时频的遥感信息，例如 NOAA-AVHRR，而高分辨率的 TM 不仅在覆盖范围上满足不了要求，而且重复周期长，在整个作物生长期内得不到必要的关键时刻的数据而失去效力。

由于 NOAA 卫星特殊的扫描方式，它的星下点轨迹线具有 9.5 天的重复周期。换言

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

之，对某一固定地点，不同日期传感器对它的视角、天顶角、太阳高度角以及它们之间的相对方位角均会发生周期性的变化。这种周期性的变化将对 NOAA-AVHRR 的第一与第二通道的数据产生何种影响呢？我们于 1992 年春季监测了整个黄准海地区，发现了从 4 月 12 日到22日连续 10 天里唯有山东微山湖以西的一块地区始终保持晴天，我们在平原区选择了一条固定的路线，如图 2 左边图表达了这 10 天里该线上的第一通道值的振荡情况。由图可见，它的振荡幅度约为其平均值的 15—20%。图中所出现的最低值是由水体引起的。辛格博士曾发现过同样的现象，其振荡幅度约为平均值的 30%[9]，当然振荡幅度的大小是与地面状况密切相关的。4 月 12 日 —22 日正是山东、河南平原地区冬小麦的抽穗期，冬小麦封垄，叶面积指数值达到极大值，地表均一性相对较好。造成这种振荡的最主要的原因是地面的非朗伯体特性。我们应用了如下的经验公式使斜视条件下的亮度值转换到垂直视状态。

$$\frac{L(\theta_v, \varphi)}{L(0)} = 1 + \left[B_0 + B_1 \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + B_2\left(\frac{1}{\cos\theta_0}\right)\right] \sin\theta_v$$

其中 L（θ_v、ϕ）为传感器斜视条件下测得的亮度值，θ_v 为视线天顶角，ϕ 为视线与太阳直射光线之间的相对方位角，θ_0 为太阳天顶角，$L(0)$ 为转换到垂直视状态下的亮度值。

经上述修正后的 $L(0)$ 值见图 2 的右边。其中 B_0, B_1 与 B_2 为经验参数，可由实测数据推算出来。我们的经验表明要从 NOAA-AVHRR 的第一与第二通道数据中获得稳定可比的光谱参数值，从而正确推断叶面积指数值与穗数值，必须对原始数据进行非朗伯体修正。因为我们只进行了经验修正，工作是十分初步的，显然还可以进一步压缩其振荡幅度。

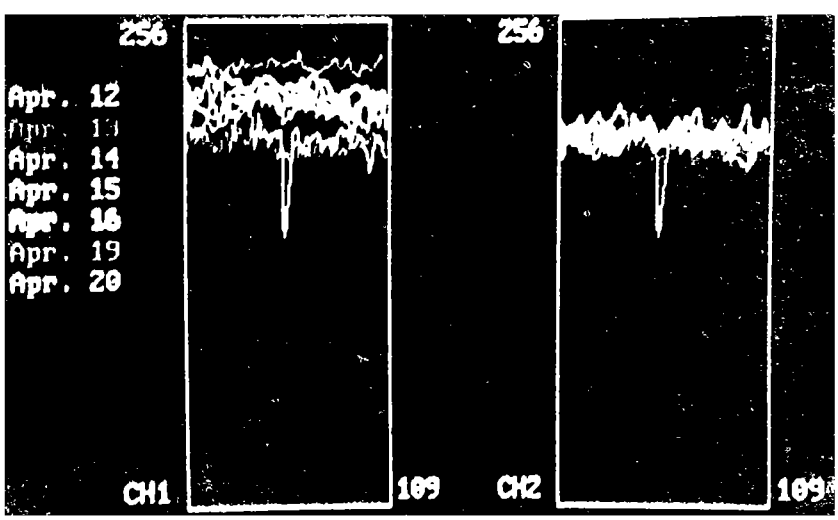

图 2　第一通道灰阶值的振荡及其压缩效果

Fig. 2　The variation of grey level of AVHRR channel 1 and its results after non-Lambert correction

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应用 NOAA-AVHRR 的第四与第五热红外通道的数据，能否获得陆面温度、植被冠层平均温度等也是当今人们所关心的热点问题。问题的难点，在于应用彭曼公式监测作物蒸腾状况，对温度测量的精度要求较高，最好精度能达到小于 1℃，起码也要达到 1—2℃。我们对这一问题的研究虽有进展，但仍需提高其精度，并有待实验验证[10]。

3 遥感估产与其它估产方法的比较

估产方法总体上可以分为两大类，一类为统计方法，另一类为遥感估产方法。统计方法又可分为抽样统计与相关统计两种。统计方法的特点是可以不过问作物产量形成的复杂过程，纯粹依靠统计规律进行估产。当然抽样统计方法需要有大量的实测数据，它的结果精确与否完全依赖于实测数据的准确性、代表性、样本数目是否足够。而相关统计方法的关键在于如何筛选相关因子及估计每一个相关因子的重要性。经验表明相关因子的筛选与产量预报的对象有关。如果以全国粮食产量为预报目标，那么陈希康教授的工作已经证明社会因素、农村政策的变动是起主导作用的，气象因子等对全国产量的影响就可能退居第二位。同样经验亦表明自然灾害(主要指与农作物产量有关的气象灾害)大致发生在一个或几个省范围内，所以如果以全省为产量估算对象，那么气象因素的变化对产量所构成的波动是不能不予以考虑的。解放以来我国各种粮食产量增长了一倍到几倍，这种增长是阶跃式的。每一个阶跃往往与农业政策的改善，新品种的推广，化肥的普遍使用，农业技术水平的普及有关。因此许多气象学家把作物产量预报看成是一个渐变过程与气象因子引起的扰动的叠加过程，以便于把更多的注意力集中在气象因子与产量波动的关系上。显然气象因子变动的空间尺度以及实测气象数据所覆盖的范围是以县为最小单元。因此气象因子估产模式所适用的范围不可能小于县，经验表明它更适用于省级或略大于省级的范围。

遥感估产是以遥感数据为基础的，它的空间尺度是以像元为最小单元，与其它估产方法相比它应该可以提供空间尺度更小的监测数据。但是随着空间尺度的减小，实际产量的波动性也就越大，影响因子越多，产量形成的复杂性表现得越明显。随着粮食产量预报的空间尺度的减小，其难度迅速增加，那么遥感估产方法能否经得住这种考验呢？我们认为原则上讲遥感数据具有更高度的概括性，例如，我们可以不问冬小麦分蘖过程如何复杂多变，只要能通过遥感手段正确估算出最大叶面积指数值，那么正确估计穗数就不成问题。如果我们通过热红外遥感信息能够掌握作物生长全过程中的作物蒸腾状况，再配合必要的环境参数，正确估算粒数和粒重是完全可能的。总之只有群体和个体这对矛盾是决定作物产量的基本矛盾。如果人们通过遥感数据能确切掌握作物的群体与个体状况，那么我们可以完全不必过问群体与个体形成的复杂过程与原因，就可以应用少数遥感数据对作物进行估产。成熟的遥感估产模型其所用参数不是比其它方法更多，恰恰相反，是更少，而其监测的空间尺度却大大小于其它方法。这就是遥感估产模型的意义所在。不过，现在的问题是遥感数据是否具有足够的灵敏度以保证实际估产的需要，这个问题最终只能由实践来回答。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参　考　文　献

[1] 徐希孺主编. 环境监测与作物估产的遥感研究. 北京：北京大学出版社，1991.
[2] D. S. Kimes. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. Opt. Soc. Am. A. 1984, 1(7): 725—737.
[3] 项月琴，田国良. 遥感估算水稻产量——I. 产量与辐射截获量的关系的研究. 环境遥感，1988，3(4): 308—316.
[4] 田国良，项月琴. 遥感估算水稻产量——II. 用光谱数据和陆地卫星图像估算水稻产量. 环境遥感，1989，4(1): 73—79.
[5] C. J. Tucker. Satellite remote sensing of primary production. Int. J. Remote sensing 1986, 7(11): 1395—1416.
[6] Idso, S. B. Remote sensiny of crop yields. Science. 1961, 19—25.
[7] Penman H. L. Natural evaporation from open water. bare soil and grass. Proc Soc London 1948, ser. A 193, 120—145.
[8] 张仁华. 以作物光谱与热红外信息为基础的复合估产模式. 科学通报，1989，17: 1331—1334.
[9] S. M. Singh. The estimation of atmospheric effects for Spot using AVHRR Channel-1 data. Int. J. Remote Sensing. 1986, 7(3): 361—377.
[10] Xu, Xiru et al., On the feasibility of dynamic monitoring of temperature of vegetative canopy by NOAA-AVHRR data Inter. Archives of photogrammetry and remote sensing vol. XXIX part p7. 1992, 376—380.

The Establishment of Remote Sensing Model for Crop Yield Estimation

Xu Xiru　　Niu Zheng　　Cao Hongkai　　Fang Xiangfa
(Institute of Remote Sensing, Peking University)

Abstract Based on the analysis of biophysical meaning of spectral parameters, this paper discussed the possible correct way to establish the remote sensing model for crop yield estimation.

Authors believe that it is the best way to solve this problem by combining information contained in visible band, near-infrared band and thermoinfrared band data. Results show that it is a necessary step to eliminate non-Lambert effects of targets before AVHRR channel 1 and channel 2 data to be used. The space scale and the number of parameters of crop yield estimation will be reduced, if remote sensing model for crop yield estimation is successful. It means remote sensing model will be more practical than other models.

Key words Remote sensing model, crop yield estimation, non-Lambert characteristics

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net