

基于遥感反演作物冠层温度的作物生长模拟和预报

宇振荣¹ Driessen P. M.²

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094; 2. 荷兰瓦格宁根大学)

摘要 利用作物冠气温差可以计算作物生长水分胁迫系数。用遥感信息估算作物冠层温度并且利用气象站的气温资料,通过冠气温差计算作物水分胁迫系数,并引入作物生长模拟模型,就实现动态和连续的作物监测及预报作物产量。本文对建立遥感-作物模拟复合模型的基本原理进行了探讨,并提出建立遥感-作物模拟复合模型所涉及的计算方法,但整体研究方法还有待进一步的验证。

关键词 作物冠层温度;作物生长模型;遥感反演

中图分类号 S 161.21; TP 79

文章编号 1007-4333(2003)S0-0071-05

文献标识码 A

Crop growth simulation and yield prediction based on the estimation of crop canopy temperature with remote sensing

Yu Zhenrong¹, Driessen P M²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Wageningen University, The Netherlands)

Abstract The difference between canopy temperature and ambient temperature is an indicator of the degree of stomata closure and the actual assimilatory activity of the crop. Crop water stress index can be calculated through combining the difference and climatic data. If canopy temperature can be estimated with using remote sense data, water stress factor based on the canopy temperature can be introduced into crop simulation model to continually simulate the actual rate of crop growth and yield prediction. This paper presents a methodology for calculating actual crop production on the basis of remotely sensed canopy temperatures. However, further work is required to validate the methodology on the field.

Key words crop canopy temperature; crop growth simulation; remote sensing retrieval

利用遥感技术估算实际产量,并与作物生长模型模拟的潜在生产力对比,可分析出潜在生产力与实际产量间的差距,称为产量差分析^[1]。同时,还可以通过土壤/土地以及遥感反映的地面空间信息的分析,揭示影响产量差的因素^[2],进而提出改善的管理措施。但是,这仅仅是对各种技术体系输出结果的对比分析,缺乏动态预报功能,不能完成数据的实时采集和影响作物生长因素的诊断。因此,如何将所获得的实时遥感信息与作物生长模拟模型相耦合,实现作物生长的动态模拟和灾害预警,已受到国内外广泛的关注。Bouman^[3]将雷达后向散射的水云模型 Cloud、可见光冠层辐射模型 EXTRAD 与作物生长模型 SUCROS 相结合应用于对作物生长的监测,通过模拟值与实测值的比较来调整参数,减少了误

差;王人潮等^[4]研究了水稻叶面积指数及叶片含氮量与光谱变量的相关性,并将光谱参数引入水稻生长模拟模型;Maas^[5]探讨了遥感信息与作物生长模型结合的方法。本文将探讨建立遥感-作物模拟复合模型的问题、原理、方法和过程。

1 遥感和作物生长模拟模型的结合原理

1.1 作物生长模拟模型和水分胁迫系数

从上世纪 60 年代以来,国内外已建立了大量的作物生长模拟模型^[6]。其中最著名的有 CERES 和 COSSYM 模型,以及基于共同的作物生理过程,将作物的参数特性化,用于区域土地(作物)生产力分析的 WOFOST 和 PS123 模型等^[7]。以作物生长影响因子为变量,已发展的作物生长模拟模型,能够动态模

收稿日期:2003-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270776);荷兰 SAIL 基金会的中荷合作资助项目(SAIL-SPP 299.399);国家攻关课题资助项目

作者简介:宇振荣,教授,主要从事景观生态及信息系统研究,E-mail:yuzhr@vip.sina.com

拟如下生产力水平^[7,81]:

潜在生产力模型(PS - 1): $P(y) = f(\text{光、温度、C3/C4、假设其他因素最优})$;

水分限制生产力模型(PS - 12): $P(y) = f(\text{光、温度、C3/C4、water、假设其他因素最优})$;

养分限制生产力模型(PS - 123): $P(y) = f(\text{光、温度、C3/C4、water、氮限制、其他因素最优})$ 。

但是,即使目前较完善的作物生长模拟模型也很难真实模拟农民田间的实际作物产量^[2,91],主要原因是影响作物产量的其他因素(如磷钾、病虫害、杂草等因子)在模型中未加以考虑,或是仅仅进行统计分析和推理,很难实现动态模拟和预测;再者,现有模型中考虑的水、氮因子,很多仍然是用经验统计公式,变异性较大;另外,参数短缺以及气候和土壤的空间变异性也在一定程度上影响着模型在区域上的应用。换句话说,要准确、真实地模拟一个区域的实际产量,只能通过观测和实地调查获得^[10]。

基于冠层温度的作物缺水指标,国内外已开展了大量工作^[11,12]。但主要集中在田间尺度上,其技术体系的核心是利用红外辐射仪研究冠层温度或冠气温差与作物生长和缺水指标的关系,通过对作物水分胁迫指数(CWSI)的经验模式和理论模式的研究,提出反映作物缺水状况的指标,用于农田水分灌溉和管理^[13]。从20世纪90年代后,我国在利用NOAA/AVHRR资料进行土壤水分或干旱的宏观监测研究方面取得了很大进展^[14],特别是依据土壤水分平衡及能量平衡的原理,通过遥感图象获得的数据和地面气象站资料估算农田蒸散,进而计算作物缺水指数来监测旱灾^[15]。但其研究工作主要是利用NOAA/AVHRR资料和GIS进行土壤水分的监测和作物水分胁迫指数(CWSI)的估算和区域空间分析^[16],没有实现遥感和作物生长动态模拟模型的耦合。

1.2 利用作物冠层温度计算作物水分胁迫系数

加热冠层的能量等于冠层截获的净辐射能减去用于同化和蒸腾水汽化需要的能量。气温与作物冠层温度的瞬时差异近似于能量平衡方程中的显热通量(sensible heat flux)^[17,18]。能量平衡方程为:

$$INTER = INRAD + TRLOSS + MISCLOSS \quad (1)$$

式中: $INTER$: 冠层截获的净辐射能 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $TRLOSS$: 作物冠层蒸腾引起的空气潜热通量 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $INRAD$: 作物冠层与空气之间的显热通量 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $MISCLOSS$: 其他能量传递项(同化),

$MISCLOSS$ 表示的部分相对较小,在方程中通常忽略不计^[8,19]。因此能量收支可近似表示为:

$$INRAD = INTER - TRLOSS \quad (2)$$

冠层截获的净辐射等于冠层表面水平面的总入射辐射($CANRAD$)减去长波辐射的损失量和反射量部分,以及未完全覆盖的表面所引起透射的能量损失。净长波辐射($LWLOSS$)是到达地表的长波辐射和地表向大气的长波辐射之差。向外短波和长波辐射部分可用各日平均波段的地表反射率来估算^[8,20,21]。

$$INTER = (CANRAD \times (1 - REFLCROP) - LWLOSS) \times CLEAF \quad (3)$$

式中: $CANRAD$ 为冠层上总辐射量 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$], 参见Driessen和Konijn^[8]一书计算方法; $INTER$ 为净截获辐射能 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $REFLCROP$ 为冠层反射系数,平均波段反射率转化为日平均值 = 0.27^[8,22]; $LWLOSS$ 为净长波损失 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $CLEAF$ 为冠层覆盖率 [0 - 1], $CLEAF = 1 - \text{EXP}(-ke \times LAI)$, LAI 为叶面积指数 [m^2m^{-2}]; ke 为消光系数 [0 - 1]。

公式(3)中的净长波损失($LWLOSS$)的计算方法为^[22,23]:

$$LWLOSS = BOLTZ \times (TDAY(DAY) + 273)^4 \times (0.56 - SQR(VPA) \times 0.079) \times (0.1 + 0.9 \times SUNH(DAY)/DL) \quad (4)$$

式中: $LWLOSS$ 为24h大气和作物冠层交换的净长波辐射 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; $BOLTZ$ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; $TDAY(DAY)$ 为日平均白天温度(计算参见[8]); VPA 估算的实际水气压(mbar)(计算参见[8]); $SUNH(DAY)$ 为日照时数(h); DL 为日长(h)。

显热通量($INRAD$, sensible heat flux)是指那些温度比周围环境高的物体向大气传输的能量,或者是从大气向温度较低的物体传输的能量。热传输过程可以是平流式的,象傅立叶定律中的传导或对流;湍流热传递可以用欧姆定律近似表示。因此,热传递速度是由温度差和热移动阻力决定:

$$INRAD = T \times \frac{VHEATCAP}{AERODR} \quad (5)$$

式中: $INRAD$ 为冠层向空气的显热传输量 [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; T 为冠层与空气的温度差(k); $VHEATCAP$ 为空气容积热容量 [$\text{Jm}^{-3}\text{k}^{-1}$]; $AERODR$ 为热传输中的空气动力学阻力 (sm^{-1})。

空气动力学阻力($AERODR$)的量化远非易事,在理论上,可表征为风速、地表粗糙度的函数。

在地表/冠层温度接近气温的条件下, Jackson 等^[20]提出:

$$AERODR = \{ \ln[(z - d)/z_0] / k \}^2 / U \quad (6)$$

式中: z 为参考高度(m); d 为冠层位移高度(m) (指冠层中风速为零的高度); z_0 为粗糙度(m) (指引起湍流的区域); k 为 von karman 常数; U 为日平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。对完全密闭的作物冠层, d 、 z_0 可看成是作物高度的函数, $d = 0.13 \times \text{高度}$, $z_0 = 0.63 \times \text{高度}$ 。 h 为作物高度(m)。

在方程(6)中,当风速近于0时,热传输阻力无限大,这是不合理的。为此, Jackson 等^[11]提出了低风速条件下的半经验方程^[22,24]:

$$AERODR = 4.72 \{ \ln[(z - d)/z_0] / k \}^2 / (1 + 0.54U) \quad (7)$$

将式(5)代入能量平衡方程式(2)^[21],得出以下公式:

$$TRLOSS = (INTER) - \left[\frac{T \times VHEATCAP}{AERODR} \right] \quad (8)$$

$TRLOSS$ 表示作物实际蒸腾时水分汽化所需要的能量:

$$TRLOSS = TR_{act} \times LATHEAT \quad (9)$$

式中: TR_{act} 为实际蒸腾速率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); $LATHEAT$ 为蒸发潜热($2.46 \times 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

TR_{act} 作为冠层与气温温差 T 的函数,可推导出:

$$TR_{act} = (INTER - T \times VHEATCAP / AERODR) / LATHEAT \quad (10)$$

并与最大可能蒸腾速率比较^[8],

$$TR_{max} = TR_0 \times CLEAF \times TC \quad (11)$$

式中: TR_{max} 为最大蒸腾率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); TR_0 为 Penman 参照冠层潜在蒸腾率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $TR_0 = ET_0 - 0.05 \times E_0$; $CLEAF$ 为冠层覆盖率[0 - 1]; TC : 湍流系数。

根据上面公式可推导出作物生长胁迫系数 cf (water):

$$cf(\text{water}) = \frac{INTER - T \times VHEATCAP / AERODR}{LATHEAT \times TR_0 \times CLEAF \times TC} \quad (12)$$

利用实时遥感红外波段的数据,与作物模型模拟的最小时间步长相匹配,可估算冠层温度、计算冠气温差 T 和水分胁迫系数。将 $cf(\text{water})$ 代入作物模型,就可模拟作物产量。用遥感数据反演的冠层温度和实际蒸腾率,不仅受水分(主要是水分),也受

养分、病虫害、管理等因素对作物的影响^[25]。病虫害会降低作物气孔的功能和数量,导致蒸腾和同化减少^[26];钾的缺乏也能引起气孔功能失调和作物萎蔫^[27]。这样估算的胁迫系数主要反映了水分胁迫的大小,但同时也也在一定程度上反映了其他因素对作物生长的影响。因此,将基于遥感反演的冠层温度,建立的作物生产力模型称为 PS- n ,以便与上文提到的基于作物-土壤水分平衡的模拟的水分限制生产力模型 PS-12 有所区别,并且它可能接近区域的实际田间产量。通过作物生长模拟模型,可以分析 PS-1、PS-12、PS-123 和 PS- n 模拟的产量差,对它们的比较分析可以揭示导致产量差的原因。

2 利用遥感估算冠层温度的方法

利用遥感进行表面/冠层温度反演方法是一个很前沿、复杂的研究课题^[28,29],还有大量的基础性问题有待解决,但是,通过与作物模型耦合应用,也可以为进一步研究表面/冠层温度反演提供新的思路和方法。目前比较流行的研究方法有:单通道法、多通道法(劈窗法 split-window algorithms)、多角度法、多通道多角度法等。其中,劈窗法为海面设计,但因为劈窗法在海面上获得成功,且简单易行,在对其进行改进和发展后,应用于陆地表面^[30]。Caselles, et al^[31-34]、Qin and Karnieli^[28]和 Parodi^[22]对此进行了详细的阐述。劈窗法应用于冠层温度反演步骤主要包括大气校正、比辐射率确定、地面温度反演、非密闭情况下作物冠层温度的计算。辛景峰^[38]和 Rugege^[10]对该方法在黄淮海平原的应用进行了初步的研究,他们综合利用 NOAA AVHRR 遥感图像、植被分布图、土壤分布图及植被形态结构数据,对邯郸地区地表比辐射率进行了计算,进而反演大面积地表温度,并估算了夏玉米冠层温度。

作物模型需要逐日的实际蒸腾速率 TR_{act} 和水分胁迫系数,这意味着不能用卫星过境时计算的瞬时冠气温差 T 值,必须将其转换为等量的日值;另一难点是:在作物生长周期中,并不能得到每天的 T 值,因为它只能在卫星过境时完全无云的情况下才能得到需要的遥感数据。我们可采用以下两个步骤估算作物生育期内等价的冠层温度值:

- 1) 在 NOAA-AVHRR 数据所反演的 2 次瞬时冠层温度间,用线性内插方法计算研究期任一天的冠层温度瞬时值。
- 2) 根据白天的实际情况,将反演的瞬时冠层温

度转换为等价的日值,即通过瞬时冠层温度乘以转换系数(即日照时数与 20% 的有云影响的部分之和与总日长的比值,假定在阴天,由于云的影响仍有 20% 的辐射)。

基于以上两步转换,在作物生长模型中,作物生长各时期的每天的等价冠层温度近似于:

$$INTERTcan(\text{adjusted}) = INTERTcan \times CONVAC \quad (13)$$

式中: $INTERTcan$ 为内插的 NOAA - AVHRR 数据所推导的冠层温度瞬时值; $CONVAC$ 为实际白天条件下的转换因子为:

$$CONVAC = (SUNH + 0.2 \times (DL - SUNH)) / DL \quad (14)$$

式中: $SUNH$ 为日照时数, DL 为日长。

3 模型的验证和讨论

表 1 是 Rugege^[10] 利用 1999 年曲周实验站周围 9 个有代表性的 AVHRR 像元反演的玉米地表温度,并代入作物生长模拟模型(PS- n) 计算的玉米储存器官干物质。统计均值为 8 151 kg · hm⁻² (干物质),观测的平均产量为 8 453 kg · hm⁻²,二者误差在 4% 之内。

表 1 利用 AVHRR 像元反演的玉米地表温度代入作物生长模拟模型(PS- n) 计算的玉米储存器官干物质与观测值比较

Table 1 Comparison of SOM simulated by the PS- n model using the AVHRR-derived temperatures with SOM values observed at Quzhou experimental fields (storage organ mass, SOM) kg · hm⁻²

AVHRR 像元点	PS- n 模型模拟干物质
36 52 N; 115 00 E (Quzhou Auto - Weather Station)	8 066
36 38 N; 115 05 E	8 023
36 42 N; 114 53 E	8 790
36 47 N; 115 02 E	7 862
36 49 N; 114 58 E	7 907
36 50 N; 114 58 E	7 948
36 43 N; 114 52 E	8 344
36 44 N; 114 58 E	8 357
36 46 N; 114 57 E	8 059
PS- n 平均值	8 151
实测值	8 453
误差	302

传统的作物生长模型很难模拟大田的实际产量,因为大量的数据、复杂的数学运算以及误差传递限制了作物生长模拟模型的运用。冠层温度与周围环境温度之差是作物气孔关闭的程度和与之相关的同化作用活性的一个指标,它不仅反映了土壤水分对作物生长的影响,同时也在一定程度上也反映了其他因素对作物生长的影响。利用遥感估算区域冠层温度,并计算水分胁迫系数,可以近似地估计作物实际生长速率和产量。本文仅介绍基于遥感数据估算冠层温度的方法,而遥感方法计算实际作物产量还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Bouman B A M, Van Keulen, Van laar, et al. The ' School of de Wit ' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 52: 171 ~ 198
- [2] Bie, C A J M de. Comparative performance analysis of agro-ecosystems[D]. The Netherlands: ITC Enschede and Wageningen University, 2000, 232
- [3] Bouman B A M. Linking physical remote sensing models with growth simulation models, applied for sugar beet[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13 (14): 2565 ~ 2581
- [4] 王人潮, 王珂, 沈掌泉, 等. 水稻单产遥感估测建模研究[J]. *遥感学报*, 1998, 2(2): 119 ~ 124
- [5] Maas S J. Use of remotely - sensed information in agricultural crop growth models[J]. *Ecological Modelling*, 1998, 41: 247 ~ 268
- [6] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 华文出版社, 2000
- [7] 宇振荣, 王建武, 邱建军. 土地利用系统分析方法及实践[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998
- [8] Driessen P M, Konijn N T. Land Use Systems Analysis[M]. WAU, Department of Soil Science and Geology, Wageningen, The Netherlands. 1992, 230
- [9] Roetter R, van Keulen. Use of crop simulation models and alternative yield estimation techniques for optimal agricultural land use[A]. In: Roetter R, Hbanh C T, Luat N V, et al, eds. Exchange of Methodologies in Land Use Planning[C]. SysNet Research Paper Series No. 1, IRRI, Los Baños, Philippines. 1998, 15 ~ 27
- [10] Rugege D. Regional analysis of maize-based land use systems for early warning applications [D] The Netherlands: ITC, Enschede and Wageningen University, 2001, 242
- [11] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A re - examination of the crop water stress index[J]. *Irrigation Science*, 1998, 9: 309 ~ 317

- [12] 石培华, 梅旭荣, 冷石林, 等. 冠层温度与冬小麦农田生态系统水分状况的关系[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 232~234
- [13] 袁国富, 唐登银, 罗毅, 等. 基于冠层温度的作物缺水研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 16(1): 49~54
- [14] 陈怀亮, 毛留喜, 冯定原. 遥感监测土壤水分的理论、方法及研究进展[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(2): 55~65
- [15] 田国良, 郑柯, 李付琴, 等. 用 NOAA - AVHRR 数字图像和地面气象站资料估算麦田的蒸散和土壤水分[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [16] 申广荣, 田国良. 基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究: 作物缺水指数模型的实现[J]. 生态学报, 2000: 20(2), 224~228
- [17] Barros J M. Quantitative Analysis of Selected Land - Use Systems[D]. The Netherlands: WAU, Wageningen, 1997, 169
- [18] Kalluri S N V, Townshed J R G. A Simple Single - layer Model to Estimate Transpiration from Vegetation using Multi - spectral and Meteorological Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 1037~1053
- [19] Rosenberg N J. Microclimate, the Biological Environment, Second Edition[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983
- [20] Jackson R D. Canopy temperature and crop water stress[J]. Advances in Irrigation, 1982, (1): 43~85
- [21] Soer G J R. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensing crop surface temperature[J]. Remote Sensing Environment, 1980, 9: 27~45
- [22] Parodi G N. AVHRR Hydrological Analysis System (AHAS) [M]. ITC Water Resources Division. Enschede, The Netherlands. 2000
- [23] Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation[M]. Toronto Canada: Academic Press, 1983
- [24] Bastiaanssen W G M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212~214
- [25] Rugege D. Regional analysis of maize-based land use systems for early warning applications [D]. The Netherlands: ITC, Enschede and Wageningen University, 2001, 232
- [26] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. Second Edition. New York: Academic Press, 1996
- [27] NSW Agriculture. Nutrient disorders of greenhouse Lebanese cucumbers [EB/OL]. www. agric. nsw. gov. au/ reader/ 7388. New South Wales Agriculture, Australia. 1998
- [28] Qin Z, Karnieli A. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA - AVHRR data[J]. Int J Remote Sensing, 1999, 20(12): 2367~2393
- [29] 张霞, 朱启疆, 阎祥军. 陆面温度反演算法: 劈窗算法的敏感度分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(1): 8~13
- [30] Caselles V, Martigao M, Hurtado E, et al. Mapping Actual Evapotranspiration by Combining Landsat TM and NOAA - AVHRR Images: Application to the Barrax Area, Albacete, Spain[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 63: 1~10
- [31] Coll C, Caselles V. A split - window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 16,697~16,713
- [32] Clevers J G P W, Van Leeuwen H J C. A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 25: 161~170
- [33] Kerenyi J, Putsay M. Investigation of land surface temperature algorithms using NOAA AVHRR images[J]. Adv Space Res, 2000, 26(7): 1077~1080
- [34] 辛景峰. 基于 3S 技术与生长模型的作物长势监测与估产方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001