

作物生长模型 PGROWTH 微气象 模块的实验验证*

贺东祥 王天铎**

(中国科学院禹城综合实验站, 山东禹城, 251221)

提 要 以生长在中国科学院禹城综合实验站的蒸散计里的小麦和玉米为材料, 测定和收集了运行生长模型 PGROWTH^[1]所需的参数, 对小麦和玉米分别进行了四天和两天运算, 将从北京时间 6:00 到 18:00 每两小时观测一次的蒸散、气温和各种辐射值与相应计算结果做了对比。结果表明上述各测定项的模拟结果与实验结果吻合良好。

关键词 模拟; 小麦; 玉米; 蒸散; 模型验证

尽管已有许多作物生长的数学模型, 如荷兰的 de Wit(1978)等建立的 BACROS 和美国的 Ritchie 等建立的 CERES(包括小麦、玉米、花生、土豆等十多种作物), 但由于各模型建立的目的不同, 模型内所用的许多经验参数变化较大等原因, 将这些模型有效地利用还比较困难。PGROWTH 是一个机理模型。它只需一般气象台站能够提供的每日气象资料、数次生长分析数据和土壤含水量(或水势)剖面的实测值, 就能够估算出作物生长过程中的任一时段的光合速率、各器官的生长速率、根系吸水速率和土壤含水量等变量。其主要特点是对土壤-植物-大气连续系统(SPAC)各过程不做过分的简化假设, 而且机理性强; FORTRAN 源程序的模块化程度高, 且各模块具有高内聚低耦合的特点^[1]。前一特点使该模型既适用于较详细的田间实验结果的拟合和分析, 又适合于较粗略、长期的产量等的模拟。后一特点使得该模型整体或单个模块都易于运行。然而, 由于该模型对实际过程多少做了些简化, 这会引入多大误差, 还有待于实验的验证。

PGROWTH 的微气象块的主要功能是计算群体光能分布、冠层温度、单位面积土壤上的显热和潜热通量(相当于蒸散量)。该块的模拟的准确程度对于光合速率和土壤水热输送的模拟至关重要; 而土面蒸发是不与光合耦合的水消耗, 所以它的估算也是计算群体水分消耗效率的关键一项。

我们在中国科学院禹城综合实验站, 测定了种植在蒸散计里小麦的苗期、拔节期及成熟期和玉米拔节期的模型运行所需的作物参数。使用这些参数值运行了该模型, 将用模型模拟所得的蒸散值与用蒸散计同步观测的蒸散值做了比较, 验证了模拟结果。

1 计算机程序及材料和方法

1.1 计算机程序

PGROWTH 主要由土壤、作物和微气象三个模块组成。它们计算的主要变量分别是:

* m 群体蒸散由禹城站刘世平测定, 文中气象数据由禹城站提供, 谨致谢忱

** 通讯地址: 中国科学院上海植物生理研究所, 上海 200032

收稿日期: 1993-04-24, 终审完毕日期: 1994-04-22

土壤含水量和水势的剖面; 作物光合速率、呼吸速率及各器官的生长速率; SPAC 的温度剖面, 蒸腾、蒸发速率等。土壤块对微气象块的影响只有土表蒸发阻力一项^[1], 而这个阻力是土壤类型和土表含水量的函数, 可以通过实测确定。作物块对微气象块的影响表现在作物生长和气孔导度两个方面。生长参数通过实测输入。由于模型只模拟数天, 作物生长本身可以忽略不计, 但气孔导度的耦合复杂些, 在 PGROWTH 中, 气孔导度的模拟为一个单独的 FORTRAN 子程序。本文在模型的运行中, 将该子程序移植到蒸散块中, 气孔导度的模拟在 1.2 节中详细说明。

关于 PGROWTH 的结构、公式等的更详细的说明请参阅[1]。

1.2 对气孔导度函数的模拟

在 PGROWTH 模型中, 气孔导度的模拟用刘萱、王天铎^[3]的模型, 在该模型中气孔导度被看作几个并不完全相互独立的因子(光强、叶温、大气饱和差和叶片水势)的函数。为了不使模型太复杂, 没有考虑这些因子的交互作用。影响气孔导度的因子中, 除叶片水势外均在微气象块内算出; 而叶片水势的计算方法是: 先计算叶片含水量, 然后用自变量为叶片含水量, 因变量为叶片水势的表格函数插值确定。叶片含水量的增减量由根系吸水量与作物蒸腾量的差值确定, 这就提高了 PGROWTH 三模块之间的耦合程度。有很多实验证明气孔导度与叶片水势的相关性远不如与土壤水势的相关性^[5,6,7], 所以本文用土壤水势代替叶片水势, 而土壤水势可以通过实测的土壤含水量计算得到, PGROWTH 原程序中已有。气孔导度的计算公式如下:

$$g_s = g_{s1} g_{s2} g_{s3} g_{s4} \quad (1)$$

$$g_{s1} = \frac{g_{\max} I}{BRN + I} \quad (2)$$

$$g_{s2} = 1 - \left(\frac{TCP - T_{opt}}{BDT} \right)^2 \quad (3)$$

$$g_{s3} = \frac{BDL}{BDL + VPD} \quad (4)$$

$$g_{s4} = \frac{1}{23} \int_0^{zrd} f_s(ps) \exp\left(\frac{-z}{23}\right) dz \quad (5)$$

$$f_s(ps) = \begin{cases} 1 & ps > faio \\ \left(1 - \frac{ps - faio}{1.5}\right)^2 & -1.5 < ps < faio \\ 0 & ps < -1.5 \end{cases} \quad (6)$$

其中: g_s : 气孔导度 (m/s), g_{s1} , g_{s2} , g_{s3} , g_{s4} 分别是 I , TCP , VPD 和 ps 单项对气孔导度的影响函数; I : 光合有效辐射 ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$); TCP : 冠层温度 ($^{\circ}C$); ps : 土壤水势 (MPa); VPD : 水气饱和差 (MPa); z : 土壤深度 (cm); zrd : 最大根深 (cm)。其它均为参数。 $BDL = 0.069$, $BDT = 18$, $BRN = 286$, 对于小麦 $g_{\max} = 0.01641$, 对于玉米 $g_{\max} = 0.025$, $faio = -0.006$, $flk = 2$, $T_{opt} = 27^{\circ}C$ 。

以上各式中的(5)和(6)是本文作者给定的。在(5)式中, $\exp(-z/23)/23$ 是指在土深 z 处单位深度中的根长占总根长的比例。这个描述根在土壤中的分布函数是人为给定的。公

式 (6) 的意义是: ps 使 gs 占它在没有土壤水分胁迫时的分数。

1.3 实验材料与方法

群体蒸散速率用一个面积为 3m^2 的称重蒸散计测定。测定材料是种植在蒸散计里的小麦 (品种是鲁麦 8 号) 或玉米。每天测定 7 次, 时间分别是北京时间 6 点, 8 点, …… , 18 点。蒸散计测得的是两小时内的总蒸散量。在比较模拟值与实测值时, 把蒸散计的观测值除以观测时间间隔所得的值当做中间时刻的即时速率。如 12—14 点的平均值看成是 13 点的即时速率; 18 点以后的蒸散值从 18 点与第二天 6 点的测定结果中平均得到。测定群体叶面积指数和冠层高度。

气温、辐射及叶温等观测值均由禹城站提供, 观测时间同上。叶温测定使用红外测温仪。模拟各时刻温度所需的日最高、最低气温和水汽压也由禹城站提供。土壤水分含量剖面用中子仪测定, 深度为 $0.05\text{—}1.65\text{ m}$, 测定 16 个点。3 天一次, 每次 3 个重复。

2 模型的运算与验证

2.1 模型的运算

应用禹城站观测的气象资料 (包括日最高、最低气温, 水气压, 风速等), 用中子仪测定的群体蒸散仪内土壤含水量数据和叶面积指数, 植株高度等资料, 输入 PGROWTH, 在 IBM 或 AST 微型计算机上运行。对小麦进行了 4 天运算, 日期是 1989 年 4 月 30 日, 5 月 1 日, 5 月 23 日和 5 月 25 日。玉米进行了两天的运算, 日期是 1989 年 7 月 23, 7 月 25 日。

2.2 模型的验证

限于篇幅, 将以上 1.3 和 2.1 两节的部分结果绘图对比于下, 各图中的实线为模拟值, 方框为实测值。

图 1 为气温和冠层温度的模拟与实测值的对比。气温的模拟用一经验公式^[4], 该公式需要输入模拟前一天的日最高气温、模拟当天的最高、最低气温和模拟后一天的最低气温, 详细公式也见^[1]。可以看出气温和冠层温度的模拟结果与实测值符合程度都很好。

图 2 是辐射通量各组分 (直射辐射、散射辐射) 的对比, 这些辐射的计算用常见的方法^[1]。图 3 是蒸散值的对比, 叶片蒸腾、土表蒸发及图 1 中的冠层温度值是通过估算气孔阻力、空气动力学阻力、边界层阻力等后, 解能量平衡 (没有考虑光合作用的耗能) 方程等到的, 它们的计算是蒸散块的重点, 用到公式较多, 比较复杂。

从以上各图可以看出: 叶温、辐射各项及蒸散的模拟值与实测值的吻合程度良好, 即该模块的主要输出结果较好。

3 讨论

PGROWTH 对蒸散速率的模拟是建立在可靠的物理学基础上的。从前面的结果可以看

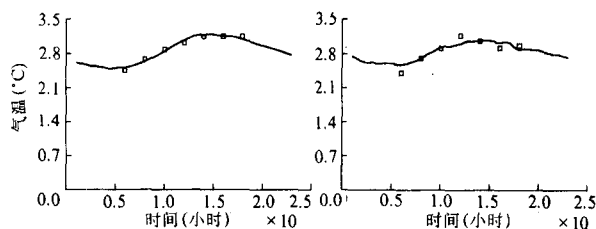


图 1 实测 (□) 和模拟 (—) 气温 (TA) 和冠层温度 (TCP) 的日变化对比

Fig.1 The comparison of the diurnal courses of air (TA) and canopy (TCP) temperatures between measured (□) and simulated date (—)

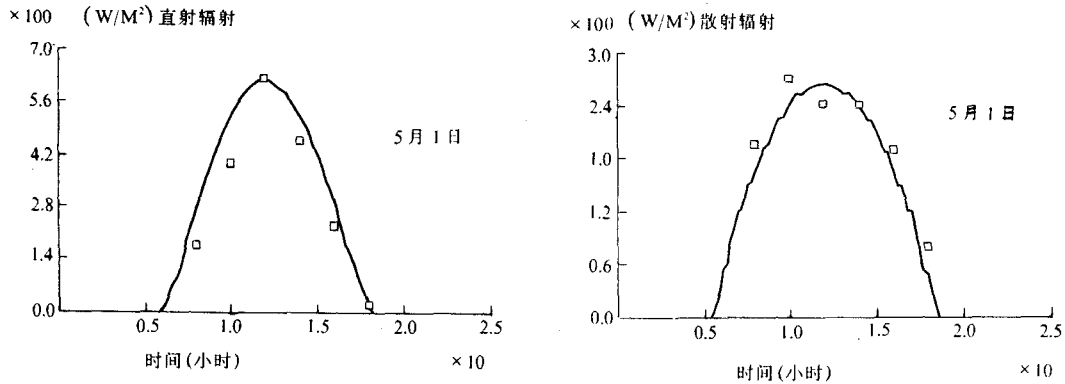


图2 实测(□)和模拟(—)辐射通量各组分的对比

Fig. 2 The comparison of the diurnal courses of some components of radiation between measured (□) and simulated date (—)

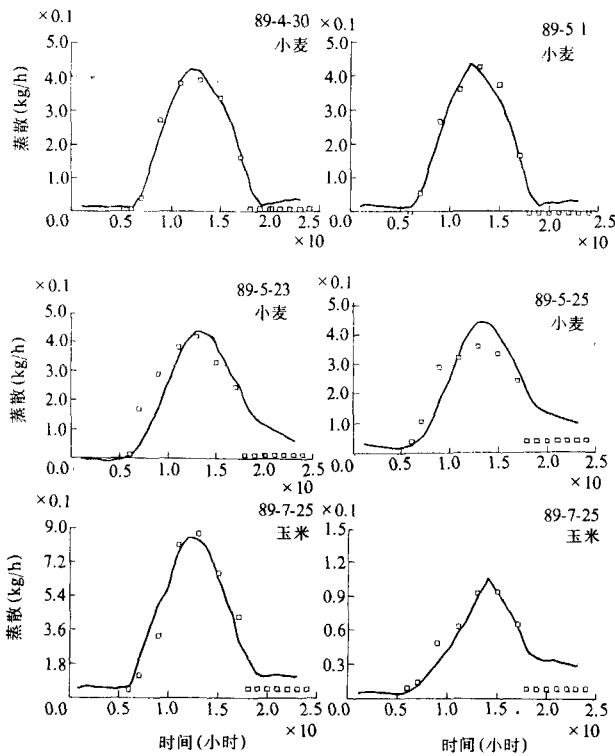


图3 实测(□)和模拟(—)蒸散(ET+ES)值的对比

Fig. 3 The comparison of the diurnal courses of evapotranspiration rate (ET+ES) between measured (□) and simulated data (—)

出, 在小麦生长的两个时期的四天里和玉米的拔节期的两天里的 PGROWTH 对蒸散的模拟结果都比较好。这些时期又是作物生育期耗水较多的时期。该模型需要的输入参数数据比较少, 所以, 运用 PGROWTH 分析禹城试验站所在的黄淮海平原的水分利用是较方便的途径。图 4 是我们把用 ADC-LCA 测定的叶片蒸腾速率简单地按叶面积加权求和, 得出的总蒸腾速率和用蒸散计测定的结果的比较。和图 3 比较后看出, PGROWTH 模拟的结果要比简单累加的结果更接近蒸散计实测数据。这说明模型中对群体中下层叶由于空气传输阻力大于上层叶这个因素的考虑是必要的。但是, 群体蒸散的模拟值和实测值之间仍不完全相符。这两个可能的原因, 一是 PGROWTH 对冠层阻力或空气动力学阻力的模拟不够详细准确, 在本文的实验中虽然有气孔导度的测定, 但用 ADC-LCA 测定的气孔导度是单叶的, 而 PGROWTH 是大叶模型, 测定值和

模拟值很难比较, 所以本文没有给出它们的结果, 二是两小时的平均蒸散值可能并不等于中

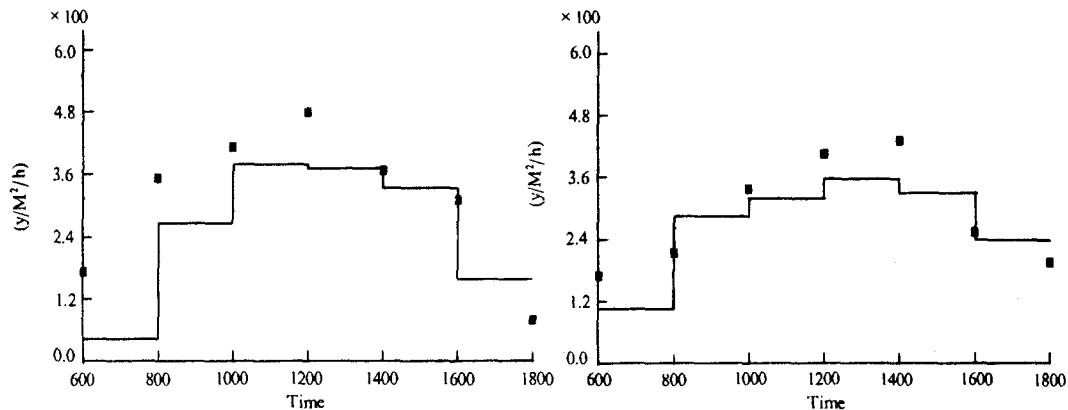


图4 叶片蒸腾按叶面积加权后所得总蒸腾速率(TR)与实测蒸散(ET)的比较(引自文献[2], 但 TR 经重新计算)

Fig.4 The comparison between evapotranspiration rate (ET) measured with the lysimeter and canopy transpiration (TR) calculated as weighted sum of transpiration of different layers measured with ADC-LCA (from Ref.[2], but recalculated)

间时间的即时值。

从图2可以看出, 散射辐射、直射辐射, 在一天内的模拟总是光滑对称的。这是由模型的假定决定的, 给标准晴天的辐射值乘以一个实际日照时数与理论日照时数的比值得到实际辐射值。这个假定对于模拟晴天或阴天的辐射较好, 但多云天气的辐射的变化很不规则, 不过对于模拟较长时期的辐射来说, 这不会引起很大误差。

参 考 文 献

- 1 陈家麟, 1994, 黄淮海平原作物耗水量与水分利用效率实验, 陈志雄等编; 科学出版社 (在印刷中)。
- 2 王天铎、马立望、贺东祥, 1991, 中国科学院禹城综合试验站年报 1988—1990, 4—13。
- 3 刘董、王天铎, 1988, 植物生理学报, 14: 136—144。
- 4 王琦, 1984, 硕士论文, 中国科学院上海植物生理研究所。
- 5 Bate, L.M., A.E., Hall, 1982, Oecologia, 54:304—307。
- 6 Gollan, T., J.B. Passioura, R., Munns, 1986, Aust. J. Plant Physiol., 13, 459—464。
- 7 Gollan, T., N.C. Turner, E.D., Schulze, 1985, Oecologia, 65, 365—362。

Experimental Validation of Micrometeorological Subroutines of the PGROWTH Model

He Dongxiang Wang Tianduo

(Yucheng Comprehensive Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Yucheng, Shandong 251221)

Abstract The PGROWTH model is mechanistic and well structured^[1], and each subroutine of it covers a separate physical or physiological process and can be run separately to give meaningful outputs which can be checked with experimental data. By changing the functions representing stomatal conductance into a variable dependent on soil water potential (equations 5 and 6) and inputting the parameters needed for its microclimate module and measured for wheat and maize grown on a 3 m² lysimeter at Yucheng station, the model was then run for four and two days for wheat and maize, respectively. Evapotranspiration, air and canopy temperatures, as well as direct and diffuse radiation were measured at every two hours from 6:00, to 18:00. The simulated and measured values of these variables were found to agree reasonably well.

Key words Simulation; Wheat; Maize; Validation; Evapotranspiration