

作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究

邬定荣^{1,2} 欧阳竹¹ 赵小敏² 于强^{1*} 罗毅¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 江西农业大学, 南昌 330045)

摘要 简要介绍了荷兰瓦赫宁根大学开发的 WOFOST 模型, 为了评价其在华北平原的适用性, 2000~2001 年在中国科学院禹城综合试验站进行了水分处理实验。水分池分为 8 个处理, 分别是: $\geq 40\%$ 、 $\geq 50\%$ 、 $\geq 60\%$ 、 $\geq 70\%$ 、 $\geq 80\%$ 田间持水量及返青-拔节受旱、抽穗-灌浆受旱、灌浆-成熟受旱, 每个处理重复 1 次, 共 16 个实验小区。其中 2001 年的实验数据用于参数校正, 得到一套模型的参数值, 2000 年的实验数据用于模型的验证。主要结论如下: 1) WOFOST 模型适于描述作物的光合作物过程, 对潜在生长的模拟较好, 用于华北平原的作物生长与水分利用的研究是适宜的; 2) 华北平原的光温生产潜力为 $8\ 100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右, 目前冬小麦的产量仅相当于潜在产量的 65%; 3) WOFOST 模型在一些细节问题上考虑较粗, 比较适合于大面积、区域范围内的模拟; 4) WOFOST 存在不少需要改进的地方, 如干物质分配系数考虑可能过于简单、未计算冬小麦发育后期茎叶干物质向籽粒的转移等。

关键词 WOFOST 生产潜力 作物生长模型 华北平原

THE APPLICABILITY RESEARCH OF WOFOST MODEL IN NORTH CHINA PLAIN

WU Ding-Rong^{1,2} OUYANG Zhu¹ ZHAO Xiao-Min² YU Qiang^{1*} and LUO Yi¹

(1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract Crop growth modeling, which was developed very quickly in recent decades, is a forceful tool in scientific research. Many crop growth models, such as CERES series, WOFOST and RZWQM and the like, have been developed and applied widely, but few of them have been introduced in China. This research was aimed at evaluating the suitability of WOFOST model for the North China Plain. WOFOST is a mechanistic crop growth model developed by Wageningen Agricultural University, the Netherlands. It was summarized briefly and then validated by using experimental data in North China Plain. This experiment was conducted in two successive years (2000-2001) in Yucheng Comprehensive Experiment Station, the Chinese Academy of Sciences (CAS), located at Yucheng, Shangdong Province of China. Water treatment pools have eight water treatments with two replicates: 1) treatments 1-5: water was supplied close to 40%, 50%, 60%, 70%, 80% of field water capacity; 2) treatment 6: water stress was set from turning green to shooting; 3) treatment 7: water stress was set from earing to filling; 4) treatment 8: water stress was set from filling to harvest. Each treatment was under a movable rain-shelter. Water content was measured using a neutron probe every five days; an additional measurement was taken before and after rainfall and irrigation. Crop growth was examined every five days, including tiller number, leaf area index, fresh and dry weight of all organs, filling rate and plant height. Leaf area was measured by LI-3100. The model was calibrated to get values of parameters using the experimental data in the year 2001, and then it was validated by data in 2000. The following crop growth simulation results (on a per-hectare basis) were examined: potential production, water limited production, potential total above-ground dry matter and water limited total above-ground dry matter, potential and water limited leaf area index, potential and water limited stem weight. Comparison between measured values and simulated results shows their correlation is close. The main conclusions of this study were as follows: 1) WOFOST model is suitable for similar research in North China Plain. It describes crop photosynthesis in detail and is good at simulating crop potential growth; 2) WOFOST treated some aspects simply and often uses a simple formula instead of a complex one to simplify input; 3) the potential production in North China Plain is about $8\ 100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and present production achieves only about 65% of this; 4) WOFOST has some problems that need to be improved. It disregards dry matter transportation from leaves and stems to seeds and describes dry matter partitioning too simply.

Key words WOFOST, Potential production, Crop growth model, North China Plain

作物生长模型是动态表达作物生长过程的计算机程序,目的是模拟并解释作物生长、发育、产量、质量和环境、管理措施或遗传变异的关系(Sinclair & Seligman, 2000)。它与静态的统计回归模型有显著的差别。统计模型是“暗箱”操作的过程,作物生长模型则描述了作物生长的机理(尽管有些方面还是应用了统计公式),以此为基础,作物生长模型才有别于回归统计模型。作物生长模型可用于估算光、温、水、土等资源的生产潜力,筛选出品种与管理措施的优化组合,揭示当地潜力开发中的主要障碍因素(于强等,2001)。它的研究虽然只有 30 年左右的历史,但已经显示出广阔的前景。荷兰、美国、澳大利亚、日本、英国等都在加紧进行这方面的工作,并已取得不少成效(严力蛟等,1996)。

WOFOST(World food studies)模型是荷兰开发的一个著名的作物生长模型,它已经在世界各地得到了应用,其普适性已经得到了基本肯定,国内尚未见应用 WOFOST 做类似研究的报告。本文将利用 WOFOST 模型,验证其在华北平原的适用性,得出一套适用于华北平原的参数,为以后的区域应用作准备。

1 试验研究方法

验证实验在中国科学院禹城综合试验站进行,该站位于鲁西北黄泛区南部,116°36' E,36°57' N,海拔 21.2 m,属暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 13.1 °C,极端高温 42.2 °C,极端低温 -25.0 °C,四季分明,光能资源充足。降水偏少而集中,多年平均降水量 593.2 mm,降水季节差异大,夏季(6、7、8 月)降水量占全年总量的 68%,冬春降水量只占

15%,春旱尤为突出。

1.1 土壤水分处理与测定

实验在禹城站的水分池进行,连续进行两年(2000、2001 年)。水分池面积为 6.67 m²,深 1.5 m,无底,上下连通,小区用水泥抹面的砖质墙分隔,可防止水分侧渗。水分池种植冬小麦(*Triticum aestivum*),分为 8 个处理,分别是: ≥40%、≥50%、≥60%、≥70%、≥80% 田间持水量及返青-拔节受旱、抽穗-灌浆受旱、灌浆-成熟受旱,每个处理重复 1 次,共 16 个实验小区。采用 III-Ⅱ型智能中子水分仪测定实验小区的土壤水分剖面,120 cm 土层以上每 10 cm 1 个层次,以下 20 cm 1 个层次,总观测深度为 200 cm。土壤含水量不足实验设置时灌水补足,灌水量用水表控制。土壤水分每 5 d 观测 1 次,下雨及灌水前后加测 1 次。

1.2 作物要素测定

冬小麦每 5 d 观测 1 次,每次取长势均一的 10 个单茎,分别测定其叶片、叶鞘、茎秆、穗的鲜重和干重,总重量计为地上部分总干物质重。

1.3 气象要素测定

其项目包括:最高最低温度、湿度、降雨量、风速和太阳总辐射,气象资料均来自于试验站的自动气象观测站。

用 WOFOST 模型模拟冬小麦的生长过程,取模拟结果中的叶面积指数、茎重、穗重、地上总干物重与实测值进行比较。实验中 ≥80% 田间持水量处理的实测结果与模拟结果中的潜在生长进行比较,≥40% 田间持水量处理的结果与水分限制生长进行比较。根据比较结果来确定模型的适用性,并对 WOFOST 作一综合评述。

表 1 观测项目
Table 1 Observation items

观测项目 Observation items	测定方法 Method
生物量 Biomass	取长势均一的单茎,分别测定其叶片、叶鞘、茎秆、穗的鲜重和干重,每 5 d 观测 1 次,每次 10 茎 Take out 10 uniform stems, measure the fresh and dry weight of leaves, stems, sheaths and spikes every five days
旗叶光合速率 Photosynthesis rate of flag leaf	采用 CID301PS 光合作用测定系统,选择晴天好天气和长势均一的植株旗叶进行测定。每个处理重复两个 Measure photosynthesis rate in a clear day by CID301PS with two repeats
生长状况调查 Investigation of crop growth	返青后开始,考察其分蘖数、株高、绿叶数。每 5 d 观测 1 次 Measure crop height and count number of tillers, stems and green leaves every five days after turning green
叶面积指数 Leaf area index	LI-3100 活体叶面积测定仪每 5 d 观测 1 次,每次 5 茎 Measure the leaf area index of five stems every five days by LI-3100
灌浆速率 Filling rate	不同处理抽穗后标定长势均一的小穗 100 株,每次取 5 穗,测定其鲜重和干重,每 3 d 观测 1 次 Mark uniform 100 ears and take out 5 spikelets of them every 3 days too measure their fresh and dry weight

2 模型介绍

WOFOST起源于世界粮食研究中心(CWFS)组织的多学科综合的世界粮食潜在产量的研究项目,由荷兰瓦赫宁根大学开发,它是一个根据气象和土壤条件模拟作物根、叶、茎、穗生物量及土壤水分动态的模型。模型模拟的过程有叶片的碳同化、同化物的分配、作物的营养和生殖生长,以及在降水、植物蒸腾、地表蒸发以及土壤底层渗漏、地下水供给共同作物下土壤水分的动态消长等。模型假设作物的生长仅由辐射、温度、水分和土壤养分状况控制,影响作物生长的其它条件都处在最佳状况。

WOFOST模型自面世以来得到了极大的发展,模型从WOFOST 3.1发展到WOFOST 7.1,应用范围不断扩大,它的适应性及应用研究在世界各地进行,反馈的结果反过来又促进了模型的发展(Supit *et al.*, 1994)。WOFOST的各个版本及其派生模型应用在许多研究中(van Diepen *et al.*, 1987; Huygen, 1992; Lanen *et al.*, 1992; de Rötter, 1993; de Ruijter *et al.*, 1993; Wolf *et al.*, 1989; Wolf, 1993; Wolf & van Diepen, 1991)。模型已被用于产量预测、土地的定量评价,如评价区域潜在生产力水平、评价通过灌溉和施肥可获得的最大经济收益、评价作物种植的不利因素等。有人还将模型进行扩展,使之能够用于森林和牧草的模拟;还有的对源程序进行修改,用更详细的子程序代替原有的子程序,达到对某个方面进行更详细的模拟的目的。目前,WOFOST在许多方面发挥作用,如教学、验证、试验等等,成了一个广泛的应用平台。

2.1 模型的主要结构

WOFOST是个机理性模型,它描述作物基本生理过程,如光合作用、呼吸作用等,并描述这些过程如何受环境的影响。计算过程主要通过气候、作物、土壤3个模块完成。气候与作物模块的计算可以得出潜在生产力,再考虑土壤养分与水分的动态就可算出水分限制生产力。它应用的公式较多,也较复杂,下面仅对3个模块进行简略说明。

2.1.1 气候模块

计算作物冠层的蒸散、裸土和水面蒸发。

蒸腾的驱动因子是蒸发面与空气的水汽压差,蒸发面的水汽压基本上等于当前温度下的饱和水汽压,空气中的水汽压是环境温度与相对湿度的函数。蒸发的速率与蒸发面与空气间的扩散阻力有关,扩散阻力的大小取决于风速。相对湿度、风速这两个参数决定了空气的“蒸发需求”。蒸散量主要通过

Penman公式来计算。它由两部分组成,一是热力学部分,计算吸收的净辐射,二是空气动力学部分,计算空气的蒸发需求。两部分合成后可以用来计算水面、裸土面的潜在蒸发和作物冠层的潜在蒸散。蒸发 1 m^2 上 1 mm 的水层需要 2.4 MJ 的能量,因此可以通过能量平衡来计算蒸发。蒸发所需的能量由净辐射提供,净辐射是入射的太阳短波辐射减去散发的长波辐射后的值。空气乱流所产生的能量交换忽略不计。光合作用只消耗 $5\% \sim 8\%$ 的净辐射,因此在蒸发的能量平衡中也被忽略。呼吸作用所产生的能量对于蒸发所需的能量来说也是微不足道的,也应被忽略。因此为了简化计算,WOFOST假定蒸散只由太阳辐射、蒸发需求两个因素决定。

2.1.2 作物模块

WOFOST根据作物的品种特征参数和环境条件,描述作物从出苗到开花、开花到成熟的基本生理过程。模型以 1 d 为步长,模拟作物在太阳辐射、温度、降水、作物自身特性等影响下的干物质积累。干物质生产的基础是冠层总 CO_2 的同化,它根据冠层吸收的太阳辐射能量和作物叶面积来计算。通过吸收的太阳辐射和单叶片的光合特性计算出作物的日同化量。部分同化产物——碳水化合物被用于维持呼吸作用而消耗,剩下的被转化成结构干物质,在转化过程中又有一些干物质被消耗(生长呼吸作用)。产生的干物质在根、茎、叶和贮存器官中进行分配,分配系数随发育阶段的不同而不同。叶片又按日龄分组,在作物的发育阶段中,有一些叶片由于老化而死亡。发育阶段的计算以积温或日长控制。各器官的总重量通过对每日的同化量进行积分得到。基本流程如图1所示。

2.1.3 土壤模块

作物生长通过叶片开启气孔,空气中的 CO_2 进入气孔实现光合作用而完成。在这个过程中,植物散失了吸收的大部分水。假如作物失去的水分得不到补充,作物就会逐渐失水,并最终枯萎。作物通过控制叶片气孔开启与关闭来适应这个胁迫,从而影响了光合作用的速率,从而也影响产量。WOFOST通过水分平衡方程来计算土壤水势,并据此计算出何时、在多大程度上作物感受到水分胁迫。WOFOST在水平衡的计算上有两种,一种是考虑地下水的影响,另一种是不考虑地下水的影响,二者在计算公式上稍有不同。在考虑土壤的下渗性、饱和导水率、土壤水分含量等多个参数后,模型可以计算作物的实际蒸散。

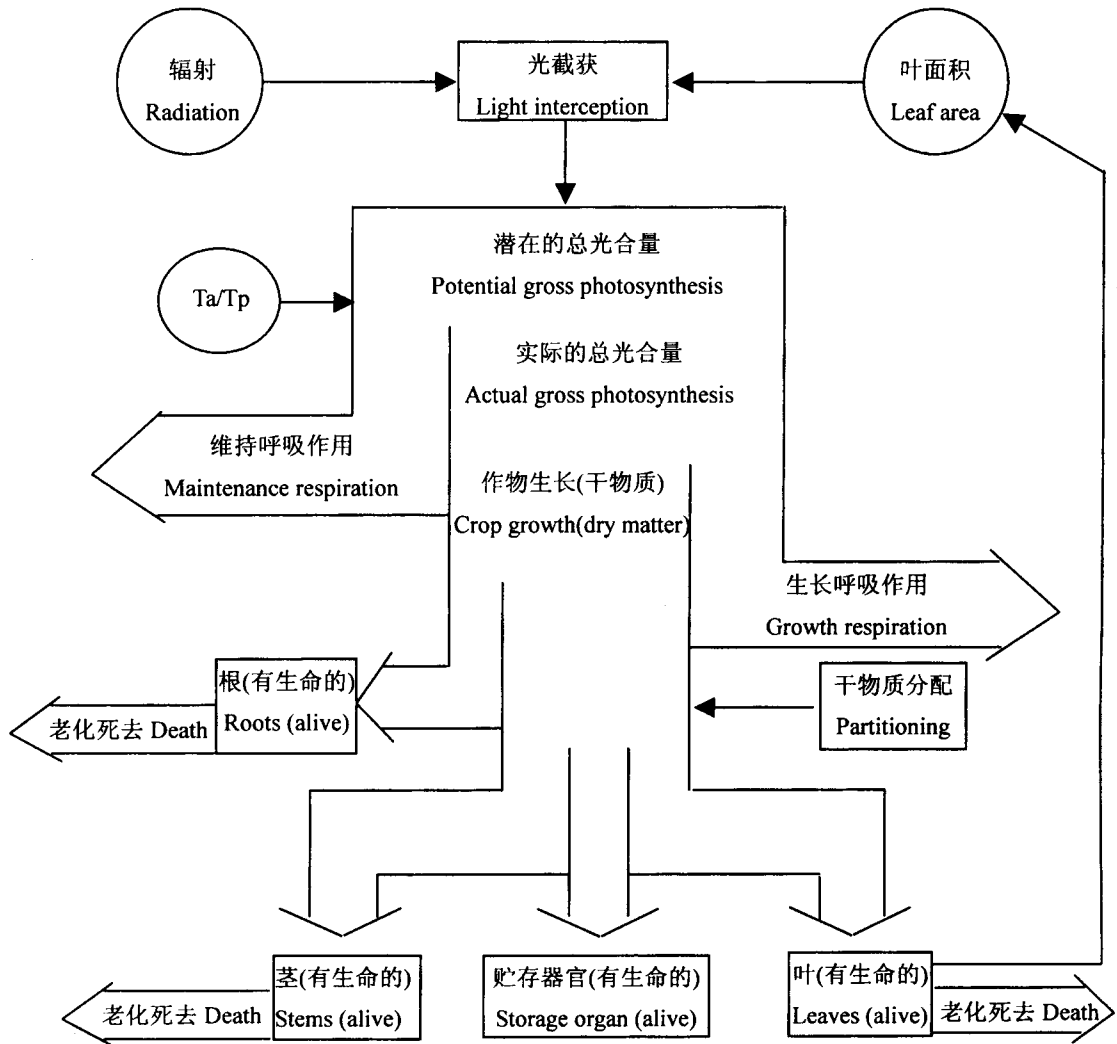


图1 作物生长流程图(T_a 和 T_b 分别为实际、潜在蒸腾速率)
Fig. 1 Flow chart of crop growth process (T_a and T_b are actual and potential transpiration rate)

2.2 模型参数与使用的数据

使用的参数与数据相应地分为3种:气候数据、作物参数、土壤参数。分别介绍如下:

2.2.1 气象数据(逐日)

主要包括:太阳辐射($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),最高、最低气温($^{\circ}\text{C}$),水汽压(kPa)(早8:00),200 cm高平均风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、降雨量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)、降雨天数。

气象数据直接从禹城站自动气象观测站得到。

2.2.2 作物参数

作物参数主要是描述作物生态特性的参数,包括发育期各阶段所需的积温、干物质在作物各器官上的分配、光合速率及受水分影响等各种过程的参数。其中最主要的有积温、比叶面积(单位重量鲜叶的叶面积)、分配系数、叶片光能利用率等等。

实验阶段即考虑了参数如何确定的问题,因此针对参数的确定做了相应的实验测定。积温主要是

通过累加作物各发育期阶段零度以上的温度得到,比叶面积根据观测数据中的鲜叶重、叶面积计算得到。通过计算每次取样中增加的总干重及各器官增加的干重可以得到分配系数。叶片光能利用率通过查阅禹城站前人实验数据得到,另外有些参数根据冬小麦的生物特性确定。

主要作物参数的取值见表2。

2.2.3 土壤参数

土壤参数通过对禹城土壤采样分析得到。主要是指土壤的物理性质,如枯萎系数、田间持水量、土壤水分下渗速率等等。

3 模型的应用与结果分析

将以上参数值输入模型,经模拟得到输出结果,取叶面积指数、茎重、穗重、地上部分总干物质重分别与2001年的实测值进行比较,主要结果如下。

表 2 参数的取值
Table 2 Value of some crop parameters

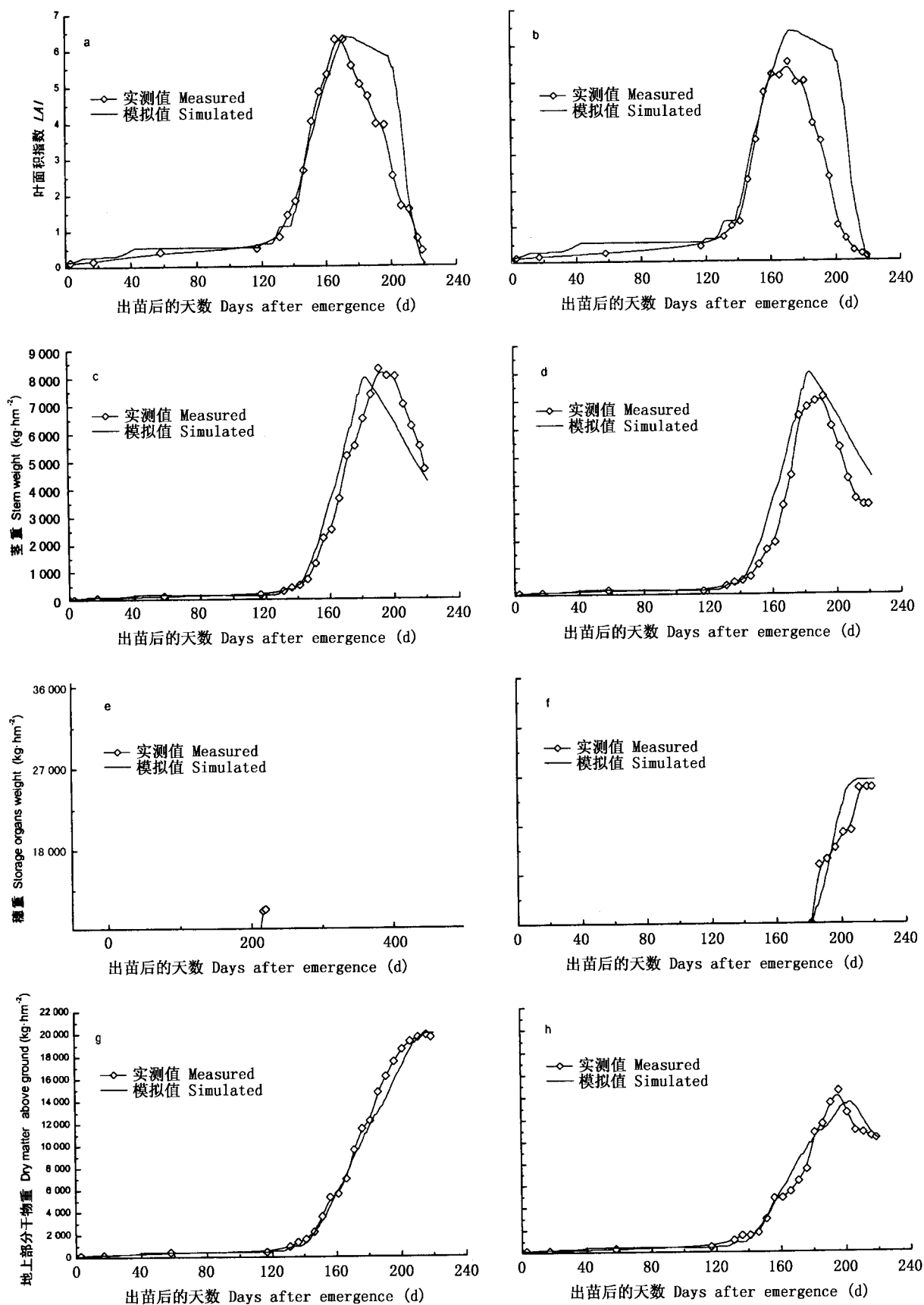
参数 Parameter	定义 Definition	取值 Value (单位 Unit)
TBASEM	出苗最低温度 Lower threshold temperature for emergence	0.0 (°C)
TEFFMX	出苗最高有效温度 Maximum effective temperature for emergence	30.0 (°C)
TSUMEM	播种到出苗的积温 Temperature sum from sowing to emergence	107.9 (°C·d ⁻¹)
TSUM1	出苗到开花的积温 Temperature sum from emergence to anthesis	1 047.7 (°C·d ⁻¹)
TSUM2	开花到成熟的积温 Temperature sum from anthesis to maturity	739.0 (°C·d ⁻¹)
LAIEM	出苗时叶面积指数 Leaf area index at emergence	0.13
RGRLAI	叶面积指数最大日增量 Maximum relative increase in LAI	0.008 2 (d ⁻¹ ·°C ⁻¹)
EFFTB	单叶片光能利用率 Light-use efficiency of single leaf	0.47 (kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)/(J ⁻¹ ·m ⁻² ·s ⁻¹)
AMAXTB	最大二氧化碳同化速率 Maximum leaf CO ₂ assimilation rate	45.00 (kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)
CVL	干物质转化成叶片的效率 Efficiency of conversion into leaves	0.690 (kg·kg ⁻¹)
CVO	干物质转化成贮存器官的效率 Efficiency of conversion into storage organs	0.720 (kg·kg ⁻¹)
CVR	干物质转化成根的效率 Efficiency of conversion into roots	0.720 (kg·kg ⁻¹)
CVS	干物质转化成茎的效率 Efficiency of conversion into stems	0.690 (kg·kg ⁻¹)
Q ₁₀	温度变化 10 °C 时呼吸作用变化的速率 Relative increase in respiration rate per 10 Celsius temperature increase	2.0
RML	叶的维持呼吸作用速率 Relative maintenance respiration rate of leaves	0.025 0 (kg CH ₂ O·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)
RMO	贮存器官的维持呼吸作用速率 Relative maintenance respiration rate of storage organs	0.009 0 (kg CH ₂ O·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)
RMR	根的维持呼吸作用速率 Relative maintenance respiration rate of roots	0.010 0 (kg CH ₂ O·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)
RMS	茎的维持呼吸作用速率 Relative maintenance respiration of stems	0.015 0 (kg CH ₂ O·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)
PERDL	水分胁迫引起的叶片死亡速率 Maximum relative death rate of leaves due to water stress	0.030

由图 2 a 可见,潜在生长模拟中模拟值与实测值非常接近,曲线在出苗和越冬期基本吻合。返青后,冬小麦生长迅速,模拟与实测的误差开始增大,但趋势仍保持一致。二者在叶面积指数的最大值上略有差异,这可能是由于 WOFOST 没有考虑养分、病虫害和耕作措施所致。另外可能还有一个原因就是 WOFOST 没有计算冬小麦无效分蘖的死亡。在每年的 4 月初都有大量的无效分蘖开始死亡,平均每 5 d 分蘖数下降 150 万茎·hm⁻²左右。4 月初换算成出苗后的日期就是 180 d 左右,正是模拟值与实测值的差距开始增大的时期。因此导致模拟结果不很理想。水分限制生长的模拟值与实测值的比较结果如图 2b。水分限制生长模拟曲线实测值与模拟值也比较一致。曲线的问题类似于潜在生长的比较问题,问题产生的原因可能是 WOFOST 模型仅考虑水分而其它条件处于最优状况下作物的生长,而实际情况是养分、病虫害和耕作措施等对作物的生长起着重要作用。由于这些因素的作用,实际生长条件,如养分、病虫害、耕作措施等,作物生长不可能达到处于模型假设的最优状况,所以模拟值高于实测值。

图 2 c~f 分别是茎、穗重的比较。从以上结果中可以看出,除茎重的差异较大外,其余结果都较好。茎重差异大的原因在于实测时茎的取样方法。实测的茎重不包括鞘重,而模拟的茎重包括茎与鞘重,所以模拟值比实测值普遍要高。模拟值穗重比实测值普遍要小,原因是实测的穗重包括了籽粒、穗轴与麦壳。而 WOFOST 模拟的是籽粒的重量,仅是实测穗重的一大部分。由于穗重向籽粒重的转化可能会产生一定的误差,故这里不作转化,仍然用实测穗重进行对比,所以存在一定的大小差异。

由于 LAI 曲线形状较好,所以总干物质曲线也拟合得较好,见图 2 g~h。

基于以上结果,可以认为这套参数基本上适合华北平原的研究,下面对参数进行验证(Validation)。将 2000 年的气象数据输入模型,使用不同的积温进行模拟。因为品种间积温值存在一定的差异,实验期两年水分池的栽培品种不同,如果用同一套积温数据,模拟时必然产生较大误差。模拟的播种日期为 2000 年实际的播种日期,成熟期由程序根据积温计算。模拟结果见图 2 i~p。



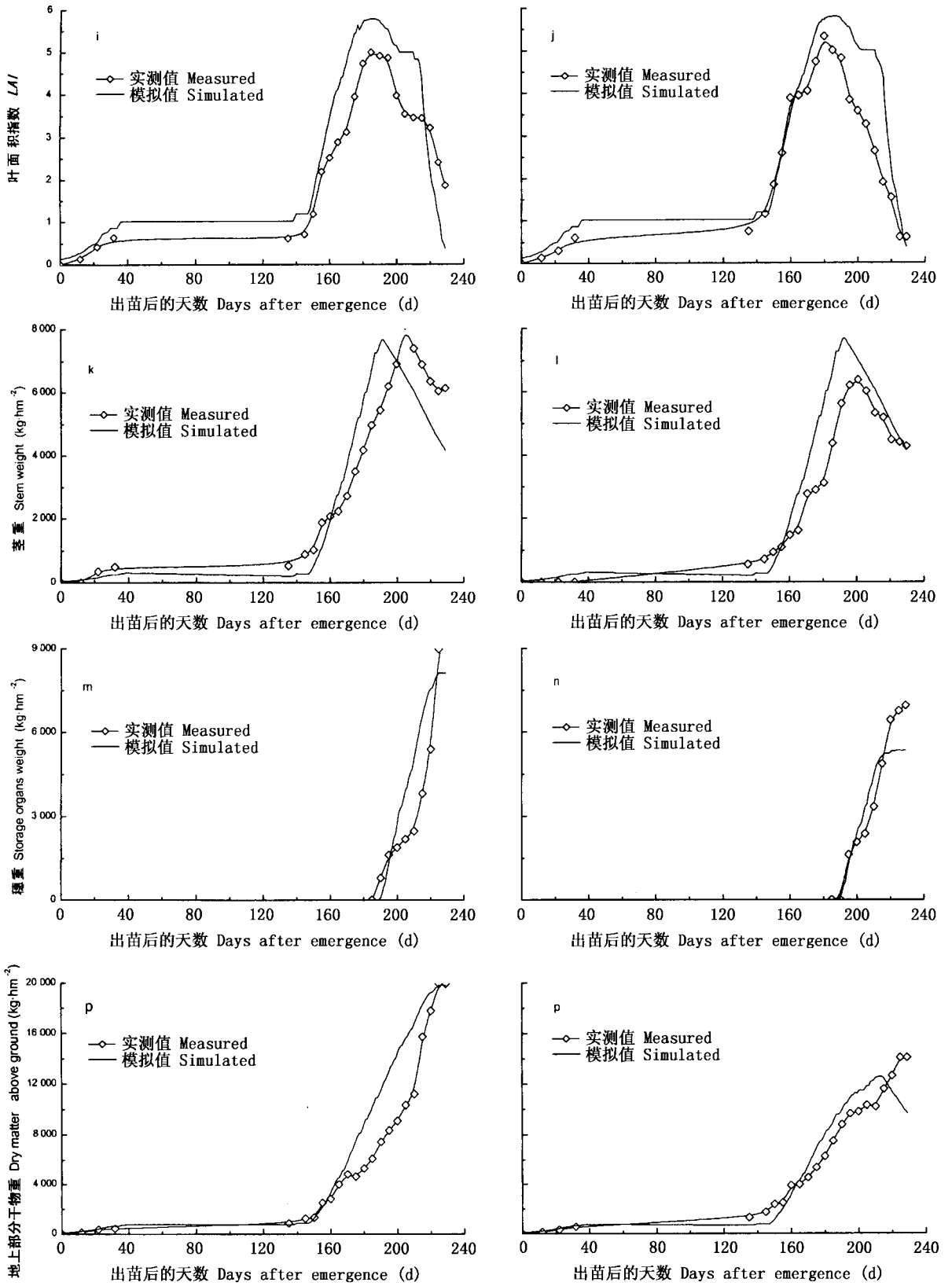


图2 潜在生长和水分限制生长模拟值与实测值的比较

Fig.2 Simulated (potential growth and water limited growth) results and measured values

a~h是校正结果,采用禹城2001年实验数据;i~p是验证结果,采用2000年实验数据。a, c, e, g, i, k, m, o是潜在生长的模拟;b, d, f, h, j, l, n, p是水分限制生长的模拟

a-h are the results of calibration and i-p are validation. a, c, e, g, i, k, m, o are the results of potential growth simulation and b, d, f, h, j, l, n, p are the water limited growth

潜在生长的条件下的总干物质重比较结果后期趋势稍微不一致。原因是 WOFOST 总干物质重与实测的干物质重含义不同。准确地说, 模拟值中的地上部分总干重和实测值中的地上部分总干重并不是一个含义。模拟结果中, 潜在生长模拟结果中地上部分总干重, 包括活着的和已死亡的器官。因此地上部分总干重的模拟值是随生育期逐渐增加的, 不会减少。而实测的地上部分总干重是指从田间采样回来后, 对其地上部分进行干重的测量。取样过程中不包括老化并开始腐化的器官, 仅收集一些新鲜的枯叶, 因此其值开始时随生育期而增加, 但在生育末期某个时候, 当同化能力大幅度下降时, 增加的重量不足以补偿老化死亡器官的重量, 其值可能会下降, 如图 2 p。

水分限制生长模拟中的地上部分总干重的意义更不一样。在水分限制模拟结果中没有地上部分总干重这一项, 这里仅用叶重、茎重、穗重三者之和来代替, 不过由于三者均为活的器官, 不包括已经死亡的部分重量。因此它们的总和趋势与实测值中的地上部分总干重趋势有些不同。水分限制生长模拟中的地上部分总干重的趋势是后期一定下降, 而且最大值比实测值要小很多, 因为叶重、茎重、穗重三者并不是同时到达最大值。通常叶重、茎重先到达最大值(即在开花前后), 然后缓慢下降而穗重逐步上升。往往是穗重到达最大值时叶重、茎重下降到了最低点(即成熟期)。所以对这三值进行求和时, 其值往往比实测值要小, 因为实测值中包括了部分死亡器官的重量。这可能是图 2 p 两条曲线的趋势不一致的原因。

从以上比较中可以看到, WOFOST 模型在模拟中显示出良好的适应性, 模拟值与实测值的差距基本上在允许范围内, 且模拟中的潜在产量也与近年来高产记录相近。从整个模拟结果来看, WOFOST 基本适合华北平原的冬小麦模拟研究。但是由于多种原因, 模拟值与实测值的某些结果差异仍较大, 因此 WOFOST 不能用于华北平原比较细致的研究。

4 结论与讨论

1) WOFOST 模型擅长于描述作物的光合作物过程。WOFOST 以 1 d 为步长, 详细地模拟作物总干物质的日积累过程, 对潜在生长的模拟较好, 用于华北平原的作物生长与水分利用的区域研究是适宜的。

2) 华北平原的光温生产潜力为 $8\ 100\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

左右, 目前冬小麦的产量仅相当于潜在产量的 65%, 增加水的供给可以较大幅度地提高产量。因此提高华北平原的冬小麦产量大有潜力可挖。

3) 任何模型的建立都是为原定建立目的服务, WOFOST 建立之初就把它定位为区域生产力的模拟, 因此模型在一些细节问题上考虑较粗, 比较适合于大面积、区域范围内的模拟。模型的输入因子获取难易度与尽量完善模型输入之间存在矛盾, 如何调和这对矛盾是个比较难的问题。WOFOST 对这个矛盾的处理较简单, 没有对模型的输入考虑得过于仔细。

4) WOFOST 虽然适用, 但还存在不少需要改进的地方, 如计算年降雨量存在问题; 绘制的模拟图扭曲; 提供与 Excel 接口不完善; 对水分利用的处理考虑不够完善; 所建的土壤类型库和作物文件库不符合华北平原的实际等等。如果能改进上述问题, WOFOST 将更适合于华北平原的实际。

5) WOFOST 没有考虑冬小麦后期其它器官结构干物质向籽粒的转移并在模拟中导致了一定的误差, 但是并不是所有的作物都存在干物质的转移, 如禹城站的玉米观测数据表明, 在 2000 年和 2001 年没有明显的干物质转移。在以后进一步的研究中, 可以将干物质的转移考虑进去以更好地模拟冬小麦的生长。

参 考 文 献

- van Diepen, C. A., H. van Keulen, Penning de Vries, F. W. T., I. G. A. M. Noy & J. Goudriaan. 1987. Simulated variability of wheat and rice yields in current weather conditions and in future weather when ambient CO₂ had doubled. Simulation reports CABO-TT 14. Wageningen: CABO-DLO, WAU-TPE.
- Huygen, J. 1992. SWACROP2, a quasi-two-dimensional crop growth and soil water flow simulation model. User's guide. Wageningen: WAU, Department of Water Resources, DLO Winand Staring Center.
- Lanen, H. A. J., C. A. van Diepen, G. J. Reinds, G. H. J. de Koning, J. D. Bulens & A. K. Bregt. 1992. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities. *Agricultural Systems*, **39**:307 ~ 328.
- de Ruijter, F. J., W. A. H. Rossing & J. Schans. 1993. Simulatie van opbrengstvorming bij tulp met WOFOST. Simulation reports CABO-TT 33. Wageningen: CABO-DLO, WAU-TPE.
- Rötter, R. 1993. Simulation of the biophysical limitations to maize production under rainfed conditions in Kenya. Evaluation and application of the model WOFOST. Materialien zur Ostafrika-Forschung, Heft 12. Geographischen Gesellschaft Trier.

- Sinclair, T. R. & N. Seligman. 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*, **68**: 165 ~ 172.
- Supit, I., A. A. Hooijer & C. A. van Diepen. 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Brussels, Luxembourg: Joint Research Center, Commission of the European Communities.
- Wolf, J. 1993. Effects of climate change on wheat and maize production potential in the EC. In: Kenny, G. J., P. A. Harrison & M. L. Parry eds. *The effect of climate change on agricultural and horticultural potential in Europe*. Research report 2. Environmental change unit. Oxford: University of Oxford. 93 ~ 119.
- Wolf, J., J. A. A. Berkhout, C. A. van Diepen & C. H. van Immerzeel. 1989. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system. In: Bouma, J. & A. K. Brecht eds. *Land qualities in space and time*, proceedings of a symposium organized by the International Society of Soil Science (ISSS), Wageningen, the Netherlands, 22-26 August 1988. Wageningen: Pudoc. 209 ~ 215.
- Wolf, J. & C. A. van Diepen. 1991. Effects of climate change on crop production in the Rhine basin. Report 52. Wageningen: RIZA, SC-DLO.
- Yan, L. J. (严力蛟), J. S. Du (杜建生) & Z. M. Zheng (郑志明). 1996. Research and application of crop growth dynamic simulate model. *Crop Research (作物研究)*, **10**: 1 ~ 5. (in Chinese)
- Yu, Q. (于强) & T. D. Wang (王天铎). 2001. Agricultural ecosystem model and high efficient utilization of resources. *World Science and Technology Research and Development (世界科技研究与发展)*, **23**(5): 22 ~ 27. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 高琼 责任编辑: 张丽赫

《植物生态学报》“ICT”最佳论文奖及其赞助单位介绍

《植物生态学报》年度最佳论文由《植物生态学报》编辑委员会经两次投票从每年度本刊发表的论文中评出, 每年 1 篇, 从 1999 年开始实行。具体操作方法是先由每一位编委会成员每期评出 1 篇, 再由编委会从中投票选出 1 篇作为本年度的优秀论文(2/3 以上的编委投票)。对获奖文章颁发证书, 获选作者将获得一定的物质奖励(人民币 4000 元, 并向文章每一位作者赠送下年度期刊 1 套), 所需费用由澳大利亚 ICT 公司(ICT International Pty Ltd)赞助。

ICT 公司长期从事植物、土壤与环境仪器的销售与开发, 代理国外各种先进的专业仪器, 并提供各种技术咨询与服务。ICT 公司经营的主要业务有以下几个方面:

灌溉技术开发与应用 由 Peter Cull 博士结合土壤水分和植物生长状态的监测, 开发成功的一个农业灌溉管理系统 (PROBE)。该系统通过动态监测土壤水分和农作物的水分进行合理的灌溉和生产管理, 从而实现节水作物高产高效。

土壤监测仪器 主要有土壤含水量测定仪器 (503DR 中子仪、Trase 时域反射仪、MP406 精密土壤水分探头); 张力计; Guelph 入渗仪; 土壤水势仪 (WP4、Aqualab、Wescor、Thermolink 水势仪); 土化参数测量仪器 (盐桥、电导仪、反射式光度计) 和各种土壤物理参数测量仪器等。

植物生理生态仪器 主要有光合作用测定系统 (LCA-4, LGi)、叶绿素荧光仪、气孔计、植物压力室、植物液流计、叶面积仪、生长箱等。

环境监测仪器 全自动气象站、数据采集器、水质分析仪 (NOVA、U10)、红外 CO₂ 气体分析仪等。

ICT 公司和很多国外仪器厂商有着广泛的联系和密切的合作, 因此 ICT 公司自 1995 年进入中国之后, 对于推动中国农学、林学、生态学、土壤学与环境科学的发展起了很大的促进作用。

关于 ICT 公司进一步的情况可以直接与其联系。ICT 公司地址: 北京市德外大街甲 11 号美江大厦 303 室, 联系人: 陈耘、范春梅 电话: 010-82082353 传真: 010-82082341 E-mail: ictsales@ictchina.com