

WOFOST 模型的发展及应用

谢文霞, 王光火, 张奇春

(浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310029)

摘 要 :作物生长模拟模型已经成为一门新兴的科学,可以为农业资源的管理利用、农业最大收益的获取提供科学的依据。WOFOST(World Food Studies)模型是荷兰瓦根宁农业大学和世界粮食研究中心共同开发研制的,是模拟特定的土壤和气候条件下一年生作物生长的动态的、解释性模型。WOFOST 模型已经在欧洲、非洲以及亚洲的一些地区得到了运用和验证,可用于水稻、玉米、小麦等多种一年生作物的模拟。WOFOST 模型可用来分析作物产量风险,不同年份产量的变化,土壤类型及气候变化对产量变化的影响,确定播种策略以及农业机械使用的关键时期,该模型还可用于估计某种作物最大潜在产量,提高灌溉和施肥的增产效益,对生长在不利条件以及地区的作物产量进行预测等。该模型对可持续农业的发展具有积极的指导作用。

关 键 词 :WOFOST,作物生长模拟模型,一年生作物

中图分类号 :S242. 1

文献标识码 :A

文章编号 :0564-3945(2006)01-0154-05

作物生长模拟是近 30 年来迅速发展起来的一门新兴学科,它综合了计算机技术、作物生理学、作物生态学、农业气象学、土壤学、农艺学、系统学等多学科的知识,将作物及其生态环境因子作为一个整体,定量描述作物生长、发育、产量形成及其与环境和技术之间的动态关系^[1]。

WOFOST 模型是荷兰瓦赫宁农业大学和世界粮食研究中心共同开发研制的作物生长模拟模型^[2]。该模型在特定的土壤和气候条件下对一年生作物进行生长模拟,模拟的基础是作物生理生态过程,主要包括同化作用、呼吸作用、蒸腾作用、干物质的分配等。该模型能够对作物进行三种水平的产量评估,一种是潜在产量,另外两种分别是水分限制条件下的产量和营养限制条件下的产量,而对于生产过程中杂草、害虫等的影响,则不予以考虑。

1 WOFOST 模型的结构

1.1 WOFOST 模型的结构

WOFOST 模型是一个动态的、解释性模型。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、土壤三个模块完成。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的生产力^[3]。WOFOST 的描述主要过程^[4]如图 1 所示。

1.2 WOFOST 模型的理论基础

潜在的和水分限制的作物生长模拟是以一天为一个时间段的动态模拟。而营养限制的作物生长模拟则是静态的,它以土壤特性和水分限制的作物生长模拟作为基础。

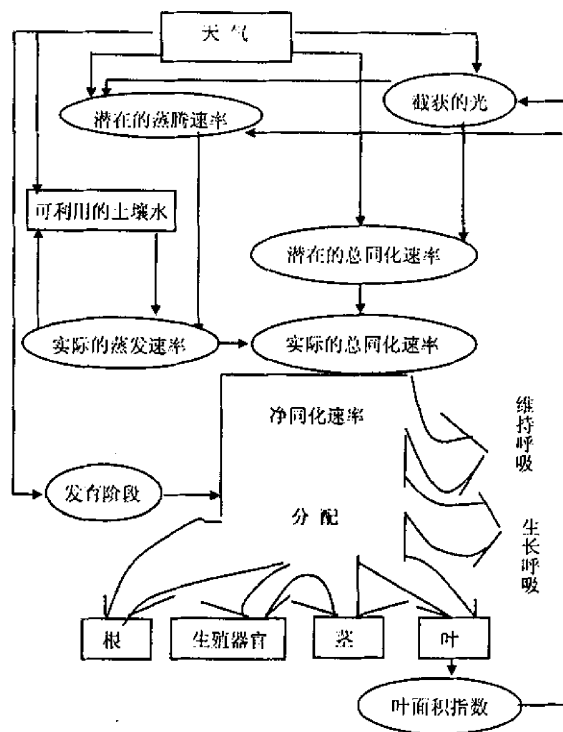


图 1 作物生长模型的简化结构

Fig. 1 Simplified general structure of a dynamic, explanatory crop growth model

收稿日期 2004-11-10, 修订日期 2005-01-09

基金项目 欧共体国际合作项目资助(ICA4-CT-2001-10055)

作者简介 谢文霞(1978-) 女, 山东省淄博市人, 在读博士, 从事利用各种模型来对农业资源进行综合管理方面的研究。

1.2.1 同化作用和呼吸作用 一种作物每天总的 CO_2 的同化速率可以用作物吸收的辐射(I_a)和单个叶片的光合响应曲线进行计算。响应曲线又由叶面积和温度决定, I_a 则是由总太阳辐射和叶面积计算而来。由于光合作用与光的强度呈非线性变化,所以辐射的水平也要考虑进去。辐射流增加的多少与叶面积成指数关系。

$$I_f = (1 - \rho) \cdot I_0 \cdot e^{-kL} \quad (1)$$

其中 I_f 是叶层 f 的净辐射流 ρ 为反射系数 I_0 为晴天植物冠层的辐射水平 k 为消光系数 L 是叶面积指数。辐射流的减少可以用叶层吸收的光来进行计算。叶层吸收的光又可用方程(2)进行计算。

$$I_{af} = k \cdot (1 - \rho) \cdot I_0 \cdot e^{-kf} \quad (2)$$

其中 I_{af} 代表叶层 f 吸收的辐射。

最大总同化速率可以用方程(3)进行计算。

$$A_L = A_m \cdot (1 - e^{-\varepsilon \cdot I_{af}/A_m}) \quad (3)$$

其中 A_L 总同化速率 A_m 是最大同化速率 ε 是单叶原始光能利用率。

1.2.2 作物物候学 作物营养器官和生殖器官的状态和发育的快慢表现了某种作物的物候学发展的状况。其中作物的状态是受外部环境因素影响的,作物发育速度在很大程度上决定于温度和日长^[5]。在 WOFOST 模型中,生物物候学是通过无因次状态变量发育阶段 D 来描述的。对于大多数一年生作物来说,我们假定出苗时期的 D 值为 0,开花期为 1,成熟期为 2。

温度对作物发育阶段的影响,可以用方程(4)进行计算

$$D = \frac{\int T_e}{T_{req}} \quad (4)$$

其中 T_e 代表每天作物生长的有效积温 T_{req} 代表营养生长和生殖生长分别所需的积温总和。

日长对发育阶段的影响可以用方程(5)、(6)进行计算

$$F_{pr} = \frac{P - P_c}{P_0 - P_c} \quad 0 \leq F_{pr} \leq 1 \quad (5)$$

$$D = F_{pr} \cdot \frac{\int T_e}{T_{req}} \quad (6)$$

其中 P 代表日长 P_0 代表最佳日长 P_c 代表临界日长 F_{pr} 代表日长减少因子。

1.2.3 蒸腾作用 陆生植物吸收的水分,只有一小部分(1%~5%)用于代谢,绝大多数以蒸腾作用的方式散失到体外^[6]。为了补充损失的水分,作物必须从土壤中吸收水分,以达到供需平衡。在 WOFOST 模型中,有一个最佳的土壤含水量的范围,在该范围内蒸腾

损失的水分能够很好的得到补充。超出了这个范围,土壤就会太干或者是太湿。这两种情况都会减少根对水分的吸收,因为太干的土壤中水分短缺,太湿的土壤中氧气会不足。

在作物吸收的水分不足的情况下,叶片的气孔会关闭,大气和作物之间 O_2 和 CO_2 的交换就减少,因此 CO_2 的同化速率就会降低。同化速率可以用方程(7)进行计算。

$$A = \frac{T_a}{T_p} A_p \quad (7)$$

其中 A 为同化速率 T_a 代表实际的蒸发速率 T_p 代表潜在的蒸发速率 A_p 代表潜在的同化速率。

潜在的蒸发速率的计算是选择一种参照作物,不同作物之间有一个校正因子,大部分作物的校正因子是 1.0,需水少的作物一般是 0.8,需水多的作物一般是 1.2。

1.2.4 土壤水平衡 土壤水含量由水平衡计算得来,在 WOFOST 模型中有 3 种不同的土壤水子模块。第一种是最简单的一种,假定土壤水能够充分满足作物生长的需要,在模拟作物潜在产量的情况下运用。第二种是在模拟水分限制产量并且土壤排水性能好的情况下运用的。土壤地下水影响不到作物的生长。作物根部土壤缺水时,不能进行地下水的毛细管上升。第三种与第二种的区别在于,作物根部土壤缺水时,地下水能够沿毛细管上升进行补充。

下面我们进行分析,把土层分为三个部分:实际根区 RD_{act} ,最大根区 RD_m ,地下水位的深度 Z 。土壤水分的计算包括降雨 R ,地表存贮 SS ,表面径流 SR ,土壤表层蒸发 E ,作物蒸腾 T ,从实际根区渗透到底层的 PC ,通过毛细管上升进入实际根区的 CR 。在 WOFOST 模型中,灌溉和从高坡流下的水忽略不计,具体如图 2 所示。但是也可以建立一个专门的降雨文件来对灌溉的水进行计算。

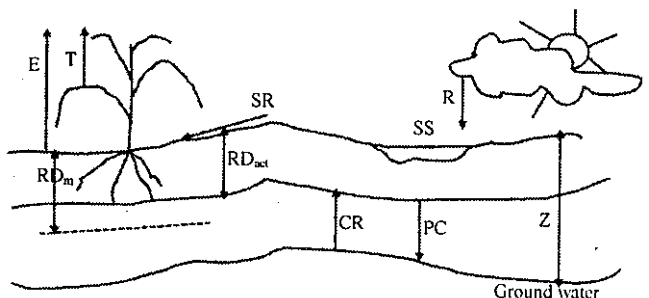


图 2 土壤水日平衡的组分示意图

Fig. 2 The components of the daily soil water balance

1.2.5 营养元素 在 WOFOST 中,营养限制产量的

计算主要是采用 QUENFITS 模型^[7],该模型是在 1990 年综合到 WOFOST 当中的。模型只考虑了 N、P、K 三种大量元素。其中一种元素的实际吸收量由该种元素和其它两种元素的供给量共同决定。在 P 定量的情况下,N 的吸收情况如图 3 所示^[8,9]。

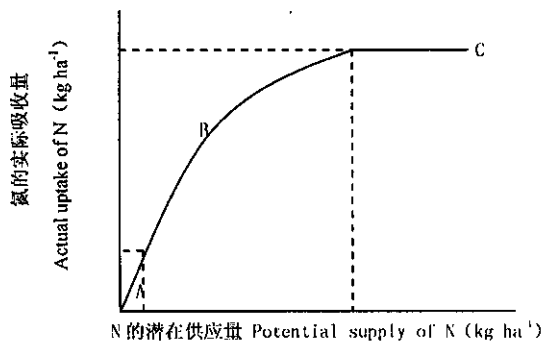


图 3 第二种养分影响下氮的实际吸收与氮潜在供应量之间的关系

Fig. 3 The relation between potential supply and actual uptake of nitrogen as affected by second nutrient.

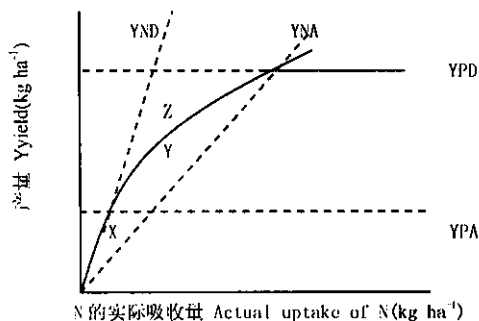


图 4 同磷供应的影响下,作物产量与氮的实际吸收量之间关系

Fig. 4 Relation between actual uptake of nitrogen and yield as affected by the yield range of phosphorus.

从图 3 可以看出,在 A 段 N 的潜在含量相对于 P 来说非常低,因此,N 的实际吸收量等于 N 的潜在含量。在 C 段 N 的潜在含量相对于 P 来说已经非常高,随着 N 潜在含量的增加,N 的实际吸收量保持不变。而在 B 段,随着 N 含量的增加,作物吸收的 N 也在不断增加。

在营养元素的实际吸收量确定以后,对产量的影响如图 4(以 P 和 N 为例)所示^[9]。由图中我们可以看出,在 X 段,P 元素达到最大的积累水平,N 元素限制产量。在 Y 段,N 和 P 均限制作物的产量。在 Z 段,N 达到最大的积累水平,只有 P 限制作物的生长。

对于一对营养元素来说,能够以两种方式来计算作物的产量。例如 N 和 P,P 的供给足够时,计算 N

对作物产量的影响,N 的供给足够时,计算 P 对作物产量的影响。如果一种元素给定了最大的积累水平和最大的稀释水平,那么另一种元素对产量就有 6 种评估结果^[9]。

2 WOFOST 模型的发展

WOFOST 模型从产生到现在经历了近三十年的时间。在这个过程中,它得到了不断的发展和完善。模型的每次发展都是由它在不同的研究领域的具体需要决定的。最初的 WOFOST 模型是 CWFS(the Center for World Food Studies)和瓦根宁农业大学在对世界粮食安全和生产研究的基础上建立的,后来成为瓦根宁模型家族中的一员。随后发展的有 SUCROS 模型^[10](Simple and Universal CROp growth Simulator),ARID CROP^[11,12],MACROS^[13],ORYZAI^[4]。最初的 WOFOST 模型由 Wolf 等在 1986 年进行了整理编写,接下来的 WOFOST3.0 版和 4.0 版分别由 Rappoldt 和 Van Diepen 等整理编写,而 6.0 版的记录文件是由 Supit 等,在 1994 年给出的,技术说明书则由 Hijmans 等进行编写。

WOFOST 最初作为作物生长模拟模型的应用是对热带国家的各种一年生作物进行潜在产量的评估^[14,15]。刚运用时主要是通过平均数值的输入来尽可能地限制输入的数据,但是不久就发现长期使用平均的气候数据、平均的播种日期和平均的土壤数据,会导致模拟结果不准确。因此模型要求尽可能的输入原始数据而不是平均数值。

到 1994 年,WOFOST 6.0 已得到了长足的发展,其成果之一就是 WOFOST 已经被合并到 CGMS(Crop Growth Monitoring System)中,通过获得客观的数据对作物生长进行动态监测和产量预测。在 CGMS 中,WOFOST 和 GIS(Geographical Information System)以及相关的数据库管理系统进行了充分的结合。然而,为了更好地满足多种需要,构建一个能够独立于 CGMS,在任何计算机平台下都能运行的 WOFOST 版本是必要的。在这种思想的指导下,1997 年,WOFOST6.0 在系统网络的基础上得到了进一步的完善,产生了 WOFOST7.1。后者较之前者的主要进步是图象的用户界面,克服了前者要在 MS-DOS 方式下才能运行,不但浪费时间而且灵活性不够的诸多缺点。

3 WOFOST 模型的应用

最近 20 年来,WOFOST 模型已在许多地区的许多研究领域得到了应用。

(1)作为一种分析的工具,WOFOST 模型被用来分析产量风险,不同年份间产量的变化,土壤类型以及施肥、灌溉等对产量变化的影响,播种的策略,气候变化对产量的影响,应用农业机械关键时期的确定等等。

WOFOST(3.1)的首次应用是在3个非洲国家,是CWFS在FAO的要求下进行的,目的是研究施肥量对粮食作物产量的影响。研究结果表明,在布基纳法索、加纳和肯尼亚3个国家,随着施肥量的增加,粮食产量持续提高,而额外的灌溉对产量影响不大。

1989年,为了了解土壤类型、作物品种、播种日期、降雨以及播种地块位置与作物干旱风险之间的关系,以便更好地指导农民进行生产决策,WOFOST在布基纳法索的AGRISK工程中被用来进行产量风险研究^[16]。1992年,Bakker运用该模型对雨量的安全范围进行了研究。

(2)WOFOST模型用于估计某种作物的最大潜在产量,估计灌溉和施肥量的最大收益,检测对作物不利的生长条件,地区产量预测等等。

1998年,有人建议把WOFOST作为产量评估的工具运用到赞比亚粮食安全的早期警报系统中。该系统主要由GIS、作物模型和获得气象数据的人造卫星组成^[17]。为了满足这个要求,对WOFOST模型进行了校正,并且运用玉米进行了检测^[7,18]。WOFOST(4.1)模型也曾经在秘鲁的安第斯山脉地区对灌溉和水分的保持进行了评价^[17],在很大程度上支持了该地农业的发展。WOFOST(5.3)模型在欧洲用来对主要大田作物进行潜在产量的评估^[19,20],评估之后,建立起一些作物比如小麦、玉米、马铃薯等的数据库,同时建立了一个对草地进行模拟的独立的模型。在这些研究中利用了GIS,便于整个地区模型输入数据和模型输出数据的综合,由此产生的数据决定了欧洲地区作物系统的投入产出系数。该系数被运用在GOAL(General Optimum Allocation of Land use)中。GOAL是荷兰科学委员会响应政府号召而建立的交互式多目标线性规划模型^[21],是用来探索农村土地的合理利用的。该研究的主要结果之一是:在欧洲,如果30%的农用地不用来进行粮食生产,也不会造成粮食危机。

在MARS(Monitoring Agriculture with Remote Sensing)工程^[22,23,24]中,欧洲联合研究中心把WOFOST6.0作为“产量预测的模型”。该研究的目的是建立作物生产指示器,对当年和以往年份的作物生长动态进行比较,同时对整个地区和国家进行产量预测。自此以后,WOFOST被合并到CGMS中,与相关数据库以及ARC/INFO GIS联合使用,并在计算机的

SUN-UNIX操作系统下运行^[25,26]。

近来WOFOST6.0被合并到SWAP版本2.0中,SWAP是一个完整的作物模型,该模型能够在土壤-水-大气-植物环境下对水的流动、溶质的运移和作物的生长进行模拟。还有一些WOFOST模型的使用者把模型运用于森林和草地,并且通过更多的子模块代替土壤水模型。

2000-2001年中国科学院地理科学与资源研究所的邬定荣和欧阳竹等人,在其科学院禹城综合试验站进行了小麦的水分处理实验,来评价该模型在华北平原的适用性。结果证明WOFOST模型适于描述作物的光合作用过程,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。但是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^[3]。

2002年,浙江大学的王光火,谢文霞等人根据中国浙江具体情况对WOFOST模型的部分参数进行了修改,对该地区的部分一年生作物进行了产量评估,并用于该地区投入产出分析,为当地农村资源的综合管理提供了依据。遗憾的是,由于用来交流经验的网络和通讯设施的缺乏,目前我国还没一个关于WOFOST模型的全面的介绍,这在很大程度上阻碍了WOFOST模型在我国的进一步应用和发展。

(3)还有一些WOFOST的使用者把模型运用于森林和草地,并且通过更多的子模块代替土壤水模型。

4 结 论

综上所述,WOFOST模型具有使用地区广泛和作用的多样的优点,但是目前在我国的应用还不太广泛,我国农作物生产面临着资源短缺、环境恶化、产量不稳、效益下降等诸多问题,作物生产的科学管理已经势在必行。但是,由于作物生产系统的复杂性,受环境、品种、管理技术等因素的错综影响,简单、片面的方法已越来越不能解决问题,而必须从环境资源利用、品种的适应性以及管理技术的系统分析等方面进行综合研究,才能达到作物生产的高产、优质、高效和农业可持续发展的要求。因此,WOFOST模型在我国的进一步推广是有必要的。

任何一个模型的应用都必须有准确的试验数据来支持。要实现WOFOST模型的各项功能,其参数化过程非常重要,由于不同地区和不同国家气候格局、土壤特征都有所不同,因此应用WOFOST模型进行不同地区农业生产结构调整和管理,还需要对部分参数进行修正。

WOFOST 模型的应用,能为一年生作物的生产提供积极的指导作用,为农业资源的综合管理、农业最大效益的获取提供科学的依据。同时也对农业的可持续发展具有重要的意义。

WOFOST 模型仍需要不断的发展和完善,使它能更好的为人类服务!

参考文献:

- [1] 杜华平. 作物生长模拟研究浅析[J]. 上海农业科技, 1993 (3): 2-4.
- [2] Boogaard H L, Van Diepen C A, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 [M]. DLO Wageningen Winand Staring Centre, 1998. 1-40.
- [3] 邹定荣, 欧阳竹, 赵晓敏. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594-602.
- [4] Kropff M J, Vanlaar H H. Modeling crop - weed interactions [M]. Oxford: CAB - international, 1993.
- [5] Keulen H, Diepen C A, Crop growth models and agroecological characterization [A]. Scaife A. Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy [C]. CEC, ESA, INRA. Paris. 1990. 2: 1-16.
- [6] 曾光文, 蒋德安. 作物生理学 [M]. 成都: 科技大学出版社, 1998. 16-17.
- [7] Huygen J. Simulation studies on the limitations to maize production [R]. Report 27. DLO Winand Staring Centre, Wageningen. 1990.
- [8] Janssen B H, Guiking F C T, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soil (QUEFTS) [J]. Geoderma 1990, 46: 299-318.
- [9] Pulles J H M, Kauffman J H, et al. A user friendly menu and batch facility for the crop simulation model WOFOST v4. 3. supplement to WOFOST v4. 1 User's Guide [M]. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 1991.
- [10] Keulen H. Simulation of water use and herbage growth in arid regions [M]. Pudoc, Wageningen, 1975.
- [11] Keulen H, Seligman N G. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop [M]. Pudoc, Wageningen, 1987.
- [12] Stol W, Keulen H, et al. The FORTRAN version of the Van Keulen - Seligman CSMP - Spring wheat model [R]. CZBO - DLO, WAU - TPE, Wageningen, 1993.
- [13] Penning F W T, Jansen D M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [M]. Pudoc, Wageningen, 1989.
- [14] Keulen H. The collection and treatment of basic data [A]. In: Van Keulen and Wolf, Plant data [C]. 1986. 235-247.
- [15] Diepen C A, Rappoldt C, et al. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4. 1 [M]. Centre for world food studies, Wageningen, 1988.
- [16] Mellaart E A R. Toepassing van gewasgroei - simulatiemodellen voor risicostudies in Sahellanden (The application of crop - growth simulation models for risk studies in Sahelian countries) [A]. Huijbers C, Lingsma S P, et al. Informatica toepassingen in de agrarische sector [C]. 1989. 141-154.
- [17] Berkhout J A A, Huygen J, et al. MARS definition study. Results of the preparatory phase [R]. Report 17. DLO Winand Staring, Wageningen, 1988.
- [18] Wolf J, Berkhout J A A, et al. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information [A]. Bouma J, Brecht A K, et al. Land qualities in space and time, proceedings of a symposium organized by the international society of soil science (ISSS) [C]. Wageningen, 1989. 209-215.
- [19] Koning G H G, Janssen H, et al. Input and output coefficients of various cropping and livestock systems in the European communities [R]. Netherlands Scientific Council for Government Policy. The Hague. 1992.
- [20] Lanen H A J, Diepen C A, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the EUROPE communities [J]. Agricultural Systems, 1992, 39: 307-328.
- [21] Rabbinge R, Latesteijn H C. Long-term options for land use in the European Community [J]. Agricultural Systems, 1992, 40: 195-210.
- [22] Vossen P. Early crop yield assessment of the E. U countries: the system implemented by the Joint Research Center [M]. EUR Publication of the Office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [23] Vossen P, Rijks D. Early crop yield assessment of the E. U countries: the system implemented by the Joint Research Center [M]. EUR 16318 EN of the Office for the office for Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995.
- [24] Diepen C A, et al. Crop growth monitoring and yields forecasting at regional and national scale [M]. Publication EUR 16008 EN of the Official Publications of the E. C. Luxembourg, 1995. 143-158.
- [25] Hooijer A A, Wal T. CGMS version 3. 1, user manual [M]. Technical Document 15. 1. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1994.
- [26] Diepen C A. An agrometeorological model to monitor the crop state on a regional scale in the European Community: concept, implementation and first operational outputs [A]. Tosselli F, et al. Proceedings of the conference on application of remote sensing to agricultural statistics [C]. Brussels, Luxembourg, 1992. 269-277.

Development of WOFOST(World Food Studies)and its Application

XIE Wen - xia , WANG Guang - huo , ZHANG Qi - chun

(College of Environment and Resource , Zhejiang University , Hangzhou 310029)

Abstract Crop growth simulation model is an effective tool for providing decision on agricultural resource management. WOFOST (World Food Studies) was established on the framework of interdisciplinary studies by the Center for World Food Studies in cooperation with the Wageningen Agricultural University. WOFOST estimates the growth of an annual crop given a set of specific soil and weather conditions. The simulation of crop growth is based on physiological processes. Current literatures revealed that WOFOST could be applied in wide zone, including Europe, Africa, Asia, etc. many annual crops have been simulated well, such as rice and maize. WOFOST has been applied as a tool for the analysis of yield risk, yield variability over soil types, sowing strategies, effects of climate change, critical periods for use of agricultural machinery, and so on. The model has also been used for predictive purposes, such as regional assessments of crop yield potential in the form of maximum yield levels, estimation of maximum benefits from irrigation or from fertilizer use, detection of adverse growing conditions by simulation - monitoring the agricultural season, and regional yield forecasts as well.

Key words : WOFOST, Crop growth, Simulation model