

农牧业生产模拟研究

张建华 黄敬峰 薛建钢 主编



新疆科技卫生出版社(K)

序 言

20 世纪以来,相对论和量子力学的创立、分子生物学和生命科学的辉煌发展以及系统科学的形成,激发和催化了一系列高新技术的诞生和成熟,特别是计算机、遥测遥感、机械电子、图形图像、自动控制、网络、多媒体、人工智能系统等的组合技术——信息技术以及生物技术、环保技术等等的问世和应用,极大地促进了社会生产力的飞速发展。现代科学技术的巨大成就更引起了人们自然观的深刻变革,科技发展本身也出现了根本的结构性变化,科学技术在不断地分支,新的学科在不断地涌现,学科之间交叉、渗透、综合地发展,构成了本世纪末期科技发展的重要特点。

农牧业生产模拟亦可称作农牧业气象数值模拟,它正是以系统科学理论为指导,特别是以“事物作为系统而存在”这一基本观点为依托,掌握和应用系统的整体性、结构性、层次性、有序性、稳定性、动态性、阶段性和开放性特征以及系统分析、系统综合、系统评价等方法,从农业气象学、植物生理学、生态学、土壤学、栽培学等学科入手,以计算机和数学物理方法为手段,以大量田间试验及生产数据为基础,模拟作物光合、呼吸、蒸腾和有机质分配、转移、输送、积累等生理过程、各器官生长发育及产量形成过程及其与天气、气候、水分、土壤等生态环境的定量关系。新疆气象部门开展农牧业生产模拟研究虽然起步晚,但进展快,目前已开展小麦、玉米、棉花、天然草场等动态监测、预测和动态模拟研究,取得非常可喜的成果,并在数值模拟与卫星遥感技术相结合、建立作物生产管理与专家系统、探索作物生长规律和发育机制、改善数学模型等方面有所创新,有所前进。这项研究使新疆农气研究开始从定性描述到定量计算,从主要回答“是什么”到解释“为什么”,从揭露现象和事实到提出观点和理论模型,而且改变了传统的试验研究手段和面貌,大大缩短了农气试验研究周期,使整个农气学科获得了长足进步。

我是从事天气动力学分析和预报以及气象科技管理工作的,对于农业气象并非专家。但当我想到数值模拟和数值预报方法的快速进展

和数值预报产品的天气、动力、统计相结合的解释和广泛应用,对于天气动力学研究和业务预报水平的提高产生了多么大的作用,我为农业气象开展数值模拟研究并取得了可喜成果和初步的应用效益,感到由衷的高兴。因为高兴才写了前面几句不是内行的话,发点感慨而已。

“95”期间直到 2010 年,新疆的经济,首先是农业将会有巨大的发展,要建成全国最大的棉花基地、重要的粮食和畜产品基地,要发展高产、优质、低耗、高效的大农业,农业气象工作真正迎来了大有用武之地的“黄金”时期,农气研究的现代化必将带来农气业务技术的现代化和服务效益的大幅度提高,新的曙光已经显现,太阳又要升起来了!

张家宝

1996 年元月于乌鲁木齐

前 言

随着科学及技术的发展,计算机技术日新月异,70年代以来,美国、荷兰、前苏联、英国、澳大利亚、日本等国家已将计算机引入农业生产服务领域,逐步建立了土壤—作物—大气系统模式并研究了作物生长发育及产量形成的动态模拟,我国自80年代以来,对水稻、小麦、棉花等作物进行了数值模拟研究,取得了不少进展,但与国外相比尚存在一定差距,尚未达到大面积指导生产、投入农牧业生产服务的目的。

新疆是我国重要的粮棉基地,其中棉花产量已占到全国的六分之一,自治区已确定以农牧生产发展为主体的战略目标,因此进行农牧业生产模拟研究具有十分重要的意义。新疆在这方面的研究较为薄弱,主要原因在于研究手段、仪器设备跟不上。为了进一步促进这些新技术在我国农牧业生产中的应用,搞好新疆以粮食作物(小麦、玉米)、经济作物(棉花)、畜产品为主体的三个系列化服务工作,1991年8月我们提出了“新疆主要农作物与牧草生长发育动态模拟及应用”的项目方案,由新疆气象科学研究所向中国气象局气象科技教育司提出申请,并在1992年10月获得以气象科技应用开发研究项目形式的资助。

近三年来,我们运用系统科学的观点,从植物生理生态、农业气象、土壤、栽培等学科入手,以计算机和数理方法为手段,在大量田间试验及生产数据的基础上,用构造的数学模型来描述植物各生理过程、各器官生长发育及产量形成过程与环境条件的定量关系,通过调控模型参数,进行模拟试验,最后建立了农牧业生产动态(力)模拟模型。在以下几方面取得显著进展:模拟与遥感技术相结合、模拟与决策系统应用相结合、利用库源理论对作物生长模拟系统进行了补充解释、巧妙地将叶面积及茎蘖动态模式与作物生长模拟系统有机地结合在一起,在小麦茎蘖动态规律模拟研究中,强调了从生长和发育两方面来考虑小麦茎蘖动态全过程的思想等等。

本书内容主要取自该课题的研究成果,全书共分四个部分:1. 作物生长发育及产量形成动态模拟;2. 草地生产力遥感动态模拟;3. 作物生

产管理与专家系统;4. 试验与分析。共收集 31 篇论文,除 1 篇已在《新疆气象》上发表过外,其余 30 篇均未在国内外公开刊物上发表过,现汇编成册,以方便有兴趣的读者参考。

在这里,要特别感谢的是“新疆农田水分规律及节水灌溉方案”课题组,他们的宝贵试验资料是本书研究的基础。另外,本书自始至终得到新疆气象局、业务科技处、《新疆气象》编辑部及气象科学研究所有关领导及专家的大力支持和具体指导,在此特表示衷心的感谢!

由于农牧业生产涉及的问题较复杂,有关学科的发展水平直接制约着模拟研究的进展,另外,在观测取样中需要先进可靠的仪器设备和优化处理方法等等,再加上本研究工作以年青人为主,可能存在着很多工作经验上的不足之处,由于内容多,时间紧,错误和不当之处在所难免,敬请读者指正。

张建华
新疆气象科学研究所
1995 年 10 月

目 录

第一部分 作物生长发育及产量形成动态模拟

冬小麦光合生产的动态模拟研究	张建华(1)
冬小麦茎蘖动态规律的模拟研究	张建华(11)
小麦、玉米产量形成的模拟模式	张建华 李迎春(16)
小麦、玉米发育期动态模拟研究	张建华 马红斌(22)
玉米光合生产的模拟模式研究	张建华 马红斌(27)
玉米光合生产模拟模式对新疆复播玉米生长的适应性检验	张建华 李迎春等(33)
玉米生长模拟模式研究	张建华 李迎春(36)
棉花群体光合生产的动态模拟模式	张建华 李迎春(41)
棉花群体光合生产动态模式在南北疆的适应性检验	张建华 李迎春等(49)
棉铃生长发育的积温模式	张建华 李迎春(53)
棉花生长模拟模式研究	张建华 李迎春(57)
作物叶面积动态与干物质生产模型	张建华(62)
主要环境因子影响植物光合生产的模拟	张建华(67)

第二部分 草地生产力遥感动态模拟

北疆天然草地生产力遥感动态监测预测模式	黄敬峰 王秀珍等(78)
草场土壤水分遥感测试模式研究	金杰 黄敬峰等(96)
用 NOAA/AVHRR 资料区分新疆不同季节草场的研究	薛建钢(99)

第三部分 作物生产管理与专家系统

利用气象因子预报大白菜霜霉病与甘兰蚜发生发展	孔吉祥 戚家新(102)
褐飞虱的预测和对策问题初探	张建华(106)
地膜玉米在乌兰乌苏地区高密度种植的适应性	谢国辉(112)
地膜玉米田间小气候的前期影响	谢国辉(116)
玉米新品种掖单 12、13 的需水、需肥规律及其高产栽培技术探讨	康永义 梁春成等(119)
农田管理专家系统研究	张建华(123)

第四部分 试验与分析

玛纳斯河流域玉米耗水量及其与产量关系的探讨	刘绍民(131)
-----------------------	----------

建国以来新疆玉米产量历史演变特征的初步分析.....	黄敬峰 王秀珍(135)
玛纳斯河流域冬小麦农田蒸散.....	刘绍民(140)
冬小麦气候影响评价.....	李迎春 简慰民(144)
小麦气候生态适应性研究.....	张建华 简慰民(150)
节能日光温室栽培冬季黄瓜气象条件的研究.....	程乾 董海虎(157)
作物生产潜力估算研究.....	刘绍民 简慰民(162)
利用气象资料估算陆面实际蒸发的探讨.....	刘绍民(168)
新疆旬太阳总辐射气候学计算方法.....	刘绍民(172)

第一部分 作物生长发育及产量形成动态模拟

冬小麦光合生产的动态模拟研究

张建华

(新疆气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

提要 本文根据前人的研究成果, 在田间试验的基础上, 建立冬小麦从返青至成熟期间光合生产的动态模拟模式, 它包括 5 个子模式: (1) 叶面积动态; (2) 光合作用; (3) 呼吸作用; (4) 干物质积累与产量形成; (5) 茎蘖动态。环境因素中考虑了辐射、温度、水分的影响。检验结果表明, 该模式模拟效果良好。

关键词 冬小麦 光合生产 动态模拟 水分

1 引言

冬小麦是我国重要的粮食作物。国外对小麦生长发育的模拟工作做得较多(Doyle, 1979; Cooper, 1980; Hodges, 1977; Shaffer, 1983; Müller, 1970; Curry, chen, 1971; Farshy, 1985, 1987; Green Wood, 1982; keulen, 1982; et al.), 国内这方面的研究也取得了一定进展(王馥棠, 王石立等, 1990, 1991; 杨春虹, 1990; 汪永钦、张宁等, 1991)。本文在前人工作的基础上, 提出一个考虑温度、辐射和水分因素的冬小麦光合生产的动态模拟模式, 以期对小麦生产管理有一定指导意义。

2 材料和方法

冬小麦作物观测资料及土壤湿度等资料均取自 1985~1988 年新疆农田水分规律及节水灌溉试验, 气象资料取自当地气象台站。

为消除生物量资料因随机取样所带来误差的影响, 进行以下滤波处理^[1]:

$$Y_1 = \frac{5}{9}X_1 + \frac{1}{3}X_2 + \frac{1}{9}X_3$$

$$Y_2 = \frac{1}{3}X_1 + \frac{1}{3}X_2 + \frac{2}{9}X_3 + \frac{1}{9}X_4$$

$$Y_t = \frac{1}{9}X_{t-2} + \frac{2}{9}X_{t-1} + \frac{1}{3}X_t + \frac{2}{9}X_{t+1} + \frac{1}{9}X_{t+2} \quad (t = 3, \dots, N-2)$$

$$Y_{N-1} = \frac{1}{9}X_{N-3} + \frac{2}{9}X_{N-2} + \frac{1}{3}X_{N-1} + \frac{1}{9}X_N$$

$$Y_N = \frac{1}{9}X_{N-2} + \frac{1}{3}X_{N-1} + \frac{5}{9}X_N$$

式中 X_t 为 t 时段的实测生物量资料(植株干物重及叶面积), Y_t 为经过滤波处理后的资料, N 为样本数。

3 模式设计

3.1 基本思路

植物通过光合作用将太阳能转化为生物量。在此过程中,一方面 CO_2 被同化为 CH_2O ;另一方面,所产生的 CH_2O 又部分地消耗于呼吸作用,二者之差即为所储存的干物质。这些干物质按照一定的生物学规律分配到各器官之中,这一不断进行的过程,就是植物生长发育及产量形成的全过程。因此,生长模拟可简单地表述为:以环境因子为输入变量,采用相应的数学模式模拟,再现作物的生长发育和产量形成过程。

作物生长受气象条件、水分、营养供应和病虫害等多种环境因素的影响。本模拟作为应用的第一步,假定作物在生育期内仅受辐射、温度、土壤水分等因子的影响。整个模式包括光合、呼吸、生长、叶面积、茎蘖变化等子模式。

模式中的参数尽量采用目前众多研究工作中公认的数值,如使用时误差较大,则根据试验资料,在计算机上进行调整。

模式中主要用干物质累积量表示植物生长,进行逐日步长的模拟,模拟过程采用数值积分方法,将干物质累积量视为状态变量,循环计算,逐日累积,直至生育期结束。

3.2 各过程子模式设计

3.2.1 光合作用子模式

决定作物生产力的第一个重要生物物理过程是光合作用,光合作用子模式是计算植物 CO_2 同化速率的基础。根据文献^[8]的研究,并假定在水肥条件适宜、冠丛完全郁闭 ($\text{LAI} \geq 5$) 的情况下,计算出 C_3 、 C_4 作物在不同时段标准晴天、标准阴天条件下 CO_2 的可能同化速率 bc 、 bo ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 / 10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}$),在此基础上,经内插可以求得当地逐日的 bc 、 bo 值,再根据实际辐射状况进行加权订正,就得到实际辐射状况下作物 CO_2 最大同化速率 bm :

$$bm = f_{ov} \cdot bo + (1 - f_{ov}) \cdot bc \quad (1)$$

其中 f_{ov} 为阴天权重系数,定义为阴天日所占的比例,即标准晴天日时 $f_{ov} = 0$,标准阴天日时, $f_{ov} = 1$,一般计算 f_{ov} 的公式如下:

$$f_{ov} = (Sc - Sa) / 0.8Sc \quad (2)$$

式中 Sc 为标准晴天时的总辐射, Sa 为实测总辐射值。

考虑到大部分台站无辐射观测资料,而根据经验公式计算的总辐射值误差往往较大,代入上式后计算的 f_{ov} 就更加不准确,因此本文建议直接用日照资料来计算 f_{ov} ,由此产生误差的机会反而减少。本文假定:

$$f_{ov} = 1 - \frac{n}{N} \quad (3)$$

式中 n 为实际日照时数, N 为可照时数,用下式计算:

$$N = \frac{24}{\pi} (\arccos(1 - \text{tg}\phi \text{tg}\delta)) \quad (4)$$

$$\delta = -23.4 [\cos(2(td + 10)/365)] \quad (5)$$

式中 ϕ 为纬度, δ 为太阳赤纬, td 为从 1 月 1 日算起的天数。

我们对(3)式进行分析,发现它能较好地描述(2)式,例如当标准阴天时 $n = 0$,由(3)式得, $f_{ov} = 1$,而当标准晴天时 $n = N$,代入(3)式得, $f_{ov} = 0$,因此作者认为(3)式可以作为(2)式的一种近似表达式。

考虑到在小麦整个生长过程中,植株冠丛不是始终处于完全郁闭状态,故还需对(1)式进

行实际叶面积动态变化的订正。

$$P_L = 1 - \exp(-K \cdot LAI) \quad (6)$$

式中 P_L 为小麦冠实际叶面积动态下的光合速率订正系数, LAI 为叶面积系数, K 为消光系数, 本文取 $K = 0.5$ 。

作物光合能力的大小, 除受上述叶面积因素影响外, 还受温度条件的制约, 小麦光合作用的适宜温度一般在 $18 \sim 25^\circ\text{C}$, 光合作用的最高温度在 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 之间。众多的研究表明, 温度对光合作用的影响函数是抛物线函数, 因此可写成以下形式:

$$P_T = 1 - a(T - T_0)^2 \quad (7)$$

式中 P_T 为温度 T 时的相对光合速率, T_0 为光合作用最适温度, 可在计算机上通过赋值调出, 本为取 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, a 为待定系数, 与作物品种特性有关。

由于作物的光合作用仅在白昼进行, 故上式中 T 应改为白天平均温度 T_d , 本文采用下式来计算 T_d :

$$T_d = T + (T_M - T_n)/4 \quad (8)$$

式中 T 、 T_M 、 T_n 分别为日平均气温、日最高气温、日最低气温。

经上述气温、叶面积影响订正后, 实际光合速率可用下式计算:

$$P = bm \cdot P_T \cdot P_L \quad (9)$$

式中 P 为某日实际光合速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 / 10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}$)。

3.2.2 呼吸作用子模式:

决定作物生产力大小的第二个重要生物物理过程是呼吸作用, 作物呼吸一般包括:

a. 维持呼吸, 提供植物维持生命活动所需要的能量, 它与某一时间植物体的干重成正比, 并与温度有关, 可用下式表示:

$$R_M = r_m W Q_{10}^{(T-25)/10} \quad (10)$$

式中 r_m 为维持呼吸系数, 取 $0.015 (\text{g/g} \cdot \text{d})$ (它是温度在 25°C 时的维持呼吸值), W 为某日的植株干重 (g), Q_{10} 为呼吸作用温度系数 (取 $Q_{10} = 2.0$)。

b. 生长呼吸, 是指植物从初始光合产物转化为结构物质时消耗的能量和物质, 它的消耗取决于所形成的生物量大小及其成份, 可用下式表示:

$$R_G = r_G \frac{dW}{dt} = (1 - cvf) \cdot (\mu P - R_M) \quad (11)$$

式中 $(1 - cvf)$ 相当于生长呼吸系数, 取 $cvf = 0.7$ 。

因此总呼吸作用子模式为:

$$R = R_M + R_G = \mu P (1 - cvf) + cvf \cdot R_M \quad (12)$$

3.2.3 干物质积累与产量形成子模式

①仅考虑温度、辐射影响的干物质积累子模式

由上述光合作用、呼吸作用子模式, 可知单位时间内 (天) 的净光合产物为:

$$\frac{dW}{dt} = \mu P - R = cvf (\mu P - R_M) \quad (13)$$

那么最终干物重产量:

$$Y = \int_1^N dW \quad (14)$$

②实际水分条件下干物质增长模式

水不仅是植物光合作用的基本原料,而且还参与植物的蒸腾、养分吸收与输送等各种生理生化过程,因此水分盈亏对植株生长及产量形成影响很大。表征水分亏缺及其对植株干物质生产的影响的方法很多,目前用的较多是用相对蒸腾或蒸散来表达对干物质生产的影响,国内外这方面的研究较多(de. wit, 1982; Hanks, 1974; Jensen, 1968; Stewart, 1974; Jackson, 1981; 卢振民, 1990; et al),大部分研究表明,相同作物品种在同样条件下干物质生产与蒸散(或蒸腾)有较好的线性关系,我国学者王馥棠、王石立等人指出,相对蒸腾对干物质生产的影响不是简单的线性关系,可用直角双曲线函数来表达。keulen(1986)、卢振民(1990)等指出,在一定范围内相对蒸腾(或蒸散)与土壤相对湿度成线性相关,因此可以直接用土壤含水量或相对湿度来表征水分对光合生产的影响。这方面国内做了不少工作,朱自玺等(1989)指出,小麦光合强度在土壤湿度大于 14.5%(约占田持 66%)的情况下基本稳定在较高的数值上,杜宝华等(1992)指出,土壤相对湿度在 70~85%(盆栽)时,小麦光合速率最高,小于 70%或大于 85%光合速率均有不同程度的下降,且光合速率对土壤湿度的反应低湿较高湿更敏感。综合以上分析,我们认为在大田条件下小麦光合生产的最适土壤相对湿度随发育期的不同而不同,约在 65~80%之间,由于土壤湿度是气象部门农气常规观测资料,且易于获取,因此确定以下关于土壤湿度影响小麦干物质生产的函数 P_w :

$$P_w = \frac{\Delta W}{\Delta W_0} = \begin{cases} 0 & SW \leq SW_K \\ \frac{SW - SW_K}{65\% - SW_K} & SW_K < SW < 65\% \\ 1 & 65\% \leq SW \leq 80\% \\ 1 - 0.5 \frac{SW - 80\%}{SW_L - 80\%} & SW > 80\% \end{cases} \quad (15)$$

式中 SW_K 为萎蔫点, SW_L 为田间持水量, SW^* 为某时刻土壤水分含量占田间持水量的百分比。

3.2.4 叶面积动态子模式

叶片是植物光合作用的主要器官,其生长变化除因作物特性而异外,主要受环境条件的影响。关于叶面积模式,国内外学者进行了大量研究,但至今仍未能达到纳入作物生长模式的地步,作者把这些研究分为三类^[9]:经典比叶重法、半经验法、经验法。本文在试验资料的基础上,采用经验法,即直接找出绿叶面积系数与影响因子的关系,假定 LAI 主要受植株干重 W 的影响,我们认为 LAI 是 W 的一元函数,采用简化 M 氏方程^[7]进行描述,模型如下:

$$LAI = \frac{LAI_{max}}{a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 r^{-1} + a_5 r^{-2}} \quad (16)$$

式中 $x = \frac{W}{W_m}$ ($0 \leq x \leq 1$), W 为某时刻的植株总干重(地上, $kg/10^4 \times m^2$), W_m 为植株最大总干重($kg/亩$),本文取 $W_m = 2000 \sim 15kg/10^4 \times m^2$, $LAI_m = 6.0$ 。模式参数见文献^[1]。

实际计算时, LAI 中小麦开花以后穗、麦芒的光合作用不能忽视,因此我们在开花以后取实际叶面积系数的 0.2 倍代入模式计算^[12]。

3.2.5 茎秆子模式

影响小麦分蘖数的因素很多,例如种植制度、品种特性、土壤肥力、播种量和气象条件等,对于这些因子影响的定量研究至今尚很不足。本文假定小麦群体密度 N 是植株干物质累积量 W 的函数,并认为其它环境因素对 N 的影响是通过 W 而产生作用的,因此可以用简化 M 氏方程来描述 N 随 W 的变化规律^[12]。

4 模式参数确定及检验

4.1 模式参数确定

本文根据 1985~1986 年冬小麦不同水分处理试验资料在计算机上进行参数调整,得 $\alpha = 0.0044$, $r_w = 0.015$, 模拟过程见表 1~5, 因此只要输入地理纬度、作物类型 (C_3, C_4)、土壤含水量及土壤水文常数、逐日平均气温及最高、最低气温、灌溉量、逐日降水量、逐日照时数、地上部分初始生物量等数据,就可得到当地冬小麦地上部分植株总干重、叶面积系数、茎秆动态变化情况。

4.2 应用检验

为进一步验证本模式的应用效果,我们将 1986~1987 年、1987~1988 年两年度冬小麦 (75-198) 不同水分处理试验资料代入模式计算 (见表 1~15), 结果表明,虽然植株干重模拟值与实测值相比有一定误差,但仍然反映出本模式性能良好,尤其在反映水分影响方面 (不考虑水分,误差将增加 1~5%), 因此本模式有较好的应用价值。

表 1 冬小麦动态模拟过程 (1986, 处理 1)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$\hat{W}$	e%
88	0.832	0.3403	0.2293	0.5045	543.40	563.45	3.68
98	1.120	0.4289	0.5550	1.0000	841.50	1218.14	44.7
108	1.492	0.5257	0.6290	1.0000	1339.55	2168.30	61.8
118	1.842	0.6019	0.6341	0.8939	2404.93	3141.75	30.6
129	2.016	0.6350	0.8154	0.8560	3856.76	4791.22	24.2
139	1.933	0.6197	0.8373	1.0000	5898.95	5123.59	3.80
148	3.523	0.8282	0.8134	0.7196	7595.61	7319.28	-3.63
161	2.409	0.7001	0.8153	0.6262	8958.68	8760.18	-2.21
169	1.409	0.5057	0.7635	1.0000	9510.56	9405.98	-1.09
176	0.595	0.2572	0.5954	0.8610	9751.50	9428.91	-3.30
平均							16.30

表 2 冬小麦总干物重模拟过程 (1986, 处理 2)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$\hat{W}$	e%
88	0.807	0.3318	0.2293	0.9477	554.966	538.450	-2.97
98	1.196	0.4503	0.5550	1.0000	868.916	1233.17	41.9
108	1.697	0.5720	0.6290	1.0000	1388.38	2271.01	63.5
118	2.180	0.6638	0.6341	0.9015	2482.66	3412.01	37.4
129	2.483	0.7110	0.8154	0.9722	4239.11	5375.95	26.8
139	2.529	0.7176	0.8373	1.0000	6647.06	6800.96	2.31
148	5.074	0.9209	0.8134	0.5630	9080.51	7702.09	-15.1
161	4.165	0.8754	0.8153	0.3029	11256.5	9110.08	-19.0
169	3.296	0.8075	0.7635	0.9015	12522.3	10273.9	-17.9
176	1.559	0.5414	0.5954	0.8762	12751.5	10686.3	-16.1
平均							22.13

表 3 冬小麦总干物重模拟过程 (1986, 处理 3)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$\hat{W}$	e%
88	1.033	0.4032	0.2293	1.0000	826.35	532.36	0.73

续上表

98	1.427	0.5101	0.5550	1.0000	1091.38	1616.53	48.1
108	1.929	0.6188	0.6290	1.0000	1529.76	2785.65	82.0
118	2.321	0.6867	0.6341	1.0000	2151.34	3945.56	83.3
129	2.383	0.6963	0.8154	0.8408	3398.83	5722.00	68.3
139	2.168	0.6617	0.8373	1.0000	5300.26	7022.16	32.4
148	3.953	0.8614	0.8134	0.6034	7682.73	8100.13	5.43
161	2.953	0.7716	0.8153	0.5731	9917.30	9280.14	-6.42
169	2.056	0.6423	0.7635	0.6161	11320.4	10047.0	-11.2
176	0.923	0.3696	0.5954	1.0000	11401.5	10185.9	-10.6
平均							31.72

表4 冬小麦总干物重模拟过程(1986,处理4)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
88	0.707	0.2977	0.2293	1.0000	541.183	568.970	5.13
98	1.032	0.4031	0.5550	0.9750	804.116	1181.41	46.9
108	1.502	0.5281	0.6290	1.0000	1262.50	2158.86	70.9
118	1.969	0.6264	0.6341	0.9545	2254.00	3264.99	44.8
129	2.218	0.6701	0.8154	0.9797	3849.68	5123.70	33.0
139	2.191	0.6657	0.8373	1.0000	6259.01	6713.52	7.26
148	4.244	0.8802	0.8134	0.9217	8800.01	8040.56	-8.63
161	3.357	0.8133	0.8153	0.4822	11164.4	9605.86	-13.9
169	2.546	0.7200	0.7635	1.0000	12515.3	10700.0	-14.5
176	1.197	0.4504	0.5954	1.0000	12751.5	10964.9	-14.0
平均							23.58

表5 冬小麦总干物重模拟过程(1986,处理5)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
88	0.655	0.2791	0.2293	1.0000	470.133	419.289	-10.8
98	1.012	0.3971	0.5550	0.4545	809.116	867.177	7.17
108	1.451	0.5159	0.6290	1.0000	1251.66	1799.58	43.7
118	1.857	0.6048	0.6341	0.9217	2121.28	2863.21	34.9
129	2.144	0.6578	0.8154	0.9772	3856.46	4704.88	21.9
139	2.300	0.6834	0.8373	1.0000	6803.75	6433.40	-5.44
148	5.115	0.9225	0.8134	1.0000	10282.7	8162.89	-20.6
161	4.637	0.9015	0.8153	0.7575	13112.3	10250.4	-21.8
169	3.871	0.8556	0.7635	0.9848	14574.3	11615.1	-20.3
176	1.841	0.6017	0.5954	1.0000	14701.5	12109.5	-17.6
平均							18.60

表6 冬小麦总干物重模拟过程(1987,处理1)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
98	1.322	0.4838	0.4467	1.0000	1820.08	1508.31	-17.1
109	1.969	0.6265	0.6371	0.8520	3247.58	2548.80	-21.5
120	2.736	0.7454	0.8209	1.0000	5089.15	4384.82	-13.8

续上表

128	3.211	0.7993	0.8080	0.8550	6520.21	5453.21	-16.3
139	3.249	0.8030	0.7725	0.4127	7645.63	6448.90	-15.6
148	6.391	0.9590	0.8720	0.4375	9036.01	7219.69	-20.1
159	4.947	0.9157	0.7859	0.2230	10810.0	7800.27	-27.8
169	3.075	0.7850	0.7750	0.2455	12386.8	8124.53	-34.4
178	1.324	0.4844	0.8051	0.1127	13178.2	8283.79	-37.1
平均							20.40

表7 冬小麦总干物重模拟过程(1987,处理2)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
98	2.118	0.6532	0.4467	1.0000	1625.88	1914.29	17.7
109	2.116	0.6528	0.6371	0.9122	2173.36	3027.01	39.2
120	2.188	0.6652	0.8209	1.0000	3227.48	4553.35	41.0
128	2.358	0.6925	0.8080	0.7199	4599.98	5735.60	24.6
139	2.549	0.7204	0.7725	1.0000	6598.08	7494.28	13.5
148	5.595	0.9390	0.8720	0.8955	8624.88	9261.71	7.38
159	4.635	0.9015	0.7859	0.7547	10913.6	10706.7	-1.89
169	3.062	0.7837	0.7750	0.5831	12837.9	11589.9	-9.72
178	1.606	0.5520	0.8051	0.5833	14216.6	11951.6	-15.9
平均							17.13

表8 冬小麦总干物重模拟过程(1987,处理3)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
98	2.815	0.7552	0.4467	1.0000	2126.11	2168.78	2.00
109	3.008	0.7778	0.6371	1.0000	3601.68	3557.63	-1.22
120	3.382	0.8157	0.8209	1.0000	5660.25	5604.83	-9.79
128	3.709	0.8435	0.8080	0.8941	7553.76	7187.41	-4.84
139	3.766	0.8478	0.7725	1.0000	9086.65	9345.52	2.84
148	7.696	0.9786	0.8720	1.0000	10794.0	11420.7	5.80
159	6.197	0.9549	0.7859	0.9306	13330.1	13149.7	-1.35
169	4.107	0.8717	0.7750	0.7015	16313.9	14441.9	-11.4
178	2.120	0.6536	0.8051	0.9998	18487.9	15038.8	-18.6
平均							4.92

表9 冬小麦总干物重模拟过程(1987,处理4)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	e%
98	2.495	0.7128	0.4467	0.9833	1376.56	1483.66	7.77
109	2.521	0.7165	0.6371	0.8888	2679.51	2712.38	1.22
120	2.848	0.7592	0.8209	1.0000	4887.25	4730.46	-3.20
128	3.331	0.8109	0.8080	1.0000	7148.89	6354.15	-11.1
139	3.566	0.8318	0.7725	1.0000	9002.28	8536.21	-5.17
148	7.135	0.9717	0.8720	1.0000	10052.3	10468.8	4.14
159	5.238	0.9271	0.7859	0.7602	11356.0	12032.4	5.95
169	3.022	0.7793	0.7750	0.7083	12810.4	13176.7	2.85

续上表

178	1.284	0.4739	0.8051	1.0000	14149.2	13479.3	-4.73
平均							4.62

表 10 冬小麦总干物重模拟过程(1987,处理 5)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	W [~]	e%
98	2.245	0.6746	0.4467	1.0000	1416.28	1455.36	2.75
109	2.832	0.6961	0.6371	0.9056	2258.18	2658.54	17.7
120	2.755	0.7477	0.8209	1.0000	3599.25	4449.04	23.6
128	3.192	0.7973	0.8080	0.7777	5045.83	5877.58	16.4
139	3.387	0.8161	0.7725	1.0000	7411.11	8025.04	8.28
148	6.768	0.9660	0.8720	1.0000	10090.5	10101.6	0.11
159	5.038	0.9194	0.7859	0.8983	13005.5	11777.4	-9.44
169	2.938	0.7698	0.7750	0.6717	14841.1	12904.9	-13.0
178	1.025	0.4525	0.8051	1.0000	15740.4	13179.0	-16.2
平均							10.77

表 11 冬小麦总干物重模拟过程(1988,处理 1)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	W [~]	e%
102	1.771	0.5874	0.3282	1.0000	1689.33	1629.81	-3.52
109	2.612	0.7292	0.7018	1.0000	2642.33	2772.99	4.94
119	3.628	0.8370	0.8123	1.0000	3848.33	4581.43	19.0
131	4.208	0.8780	0.7649	0.6388	5137.83	6045.97	17.6
140	3.998	0.8645	0.8132	0.7777	6457.33	7290.33	12.9
149	6.936	0.9688	0.8639	0.6388	7950.50	8604.77	8.22
161	4.607	0.9001	0.8080	0.5277	9472.33	9579.89	1.13
173	2.808	0.7543	0.5351	0.1943	10531.8	9982.51	-5.21
平均							8.07

表 12 冬小麦总干物重模拟过程(1988,处理 2)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	W [~]	e%
102	1.084	0.4186	0.3282	0.8500	1185.46	1099.42	-7.25
109	1.761	0.5855	0.7018	1.0000	1941.83	2007.01	3.35
119	2.658	0.7353	0.8123	1.0000	2699.13	3742.20	38.6
131	3.457	0.8224	0.7649	0.8055	4007.20	5308.30	32.4
140	3.771	0.8482	0.8132	0.8000	5611.96	6868.10	22.3
149	7.799	0.9797	0.8639	1.0000	8555.23	8943.75	11.0
161	6.769	0.9661	0.8080	0.8500	10377.8	11229.9	8.21
173	5.796	0.9448	0.5351	0.8333	12038.3	12060.8	0.187
平均							13.73

表 13 冬小麦总干物重模拟过程(1988,处理 3)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	W [~]	e%
102	1.529	0.5344	0.3282	1.0000	1580.15	1497.65	-5.22
109	2.214	0.6095	0.7018	1.0000	2455.93	2546.31	3.68
119	3.019	0.7789	0.8123	1.0000	3633.85	4429.98	21.9

续上表

131	3.580	0.8330	0.7649	0.8610	5150.43	6135.20	19.1
140	3.689	0.8419	0.8132	0.9166	6766.89	7504.56	10.9
149	7.396	0.9752	0.8639	0.6944	8495.93	9059.78	6.63
161	6.127	0.9532	0.8080	0.6944	10189.4	10345.9	1.53
173	4.956	0.9161	0.5351	0.2221	11409.0	10564.3	-7.40
平均							8.49

表 14 冬小麦总干物重模拟过程(1988,处理 4)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	$e\%$
102	1.534	0.5355	0.3282	0.8000	1655.80	1551.17	-6.31
109	2.216	0.6699	0.7018	1.0000	2362.06	2588.96	9.60
119	2.953	0.7715	0.8123	1.0000	3361.13	4354.01	29.5
131	3.361	0.8137	0.7649	0.7499	4733.33	5946.98	25.6
140	3.319	0.8098	0.8132	0.9500	6711.83	7517.27	12.0
149	6.384	0.9581	0.8639	1.0000	8919.50	9592.90	7.54
161	4.722	0.9056	0.8080	0.9250	10856.6	11920.6	9.80
173	3.071	0.7846	0.5351	1.0000	11962.3	12650.8	5.75
平均							11.80

表 15 冬小麦总干物重模拟过程(1988,处理 5)

天数	LAI	P_L	P_T	P_w	W	$W^{\wedge}$	$e\%$
102	1.217	0.4558	0.3282	0.8250	1557.53	1393.28	-10.6
109	1.799	0.5932	0.7018	1.0000	2394.90	2284.60	-4.60
119	2.683	0.7385	0.8123	0.9444	3327.00	3917.59	17.7
131	3.460	0.8227	0.7649	0.7499	4837.25	5468.74	13.0
140	3.721	0.8444	0.8132	0.8610	6988.66	6839.08	-2.14
149	7.457	0.9759	0.8639	0.7221	10425.0	8759.68	-15.9
161	5.777	0.9443	0.8080	1.0000	14009.1	11283.4	-19.4
173	4.009	0.8652	0.5351	0.9444	16604.4	12408.4	-25.2
平均							12.10

各表中 LAI 为订正后的叶面积系数, $W^{\wedge}$ 为植株干重 W 的模拟值($\text{kg}/10^4 \cdot \text{m}^2$), e 为其模拟的相对误差, 天数指距 1 月 1 日的日数。

5 讨论

5.1 本研究假设作物生长仅受光、温、水三个因素的影响, 没有考虑到营养状况、病虫害等因素, 再加上不能完全消除的取样误差以及没有考虑根部生长等原因, 使得小麦地上部分植株干物重模拟值与实际观测值仍存在一定误差。

5.2 水分影响模型虽然较实用, 但过于简单, 机理性较差, 仍有需改进之处。

5.3 本模式中需输入初始生物量, 而在实际应用中(尤其是大面积作物产量预报业务), 往往很难取得较有代表性的数据, 因此, 初始生物量需要根据播种情况建立专门的模式来估计, 这一点也是我们在今后的工作中需要考虑的问题。

参 考 文 献

- [1] 张宇、陶炳炎,冬小麦生长发育的模拟模式,南京气象学院学报,14(1),1991
- [2] 汪永钦、王信理等,冬小麦生长和产量形成与气象条件关系及其动态模拟的研究,气象学报,49(2),1991
- [3] 王石立、王葆棠等,春小麦生长简化模拟模式研究,应用气象学报,2(3),1991
- [4] 杨春虹,农田小麦光合生产力模拟与分析,中国科学院北京农业生态系统试验站主编,农田作物环境实验研究,193~203,气象出版社,1990
- [5] 杜宝华、吕学都,土壤湿度对冬小麦光合速率的影响,中国农业气象,13(4),1992
- [6] 薛正平、吴元中等,Mitscherlich 方程在研究水稻干物质与叶面积、群体密度动态关系中的应用,中国农业气象,13(4),1992
- [7] Кулик М. С 等,冬小麦产量形成过程的模拟,国外农学—农业气象,1985 年,第 2 期
- [8] F. W. T. Penning de vires et al,王葆棠等译,植物生长与作物生产的模拟,科学出版社,172,186~249,1988
- [9] 张建华,作物叶面积动态与干物质生产模型,见本文集
- [10] “华北平原作物水分胁迫与干旱研究”课题组编著,作物水分胁迫与干旱研究,60~70,河南科学技术出版社,1991
- [11] 冯定原、夏海峰,水稻生长和产量形成的数值模拟,南京气象学院,10(2):203~209,1987
- [12] 张建华,冬小麦茎蘖动态规律的模拟研究,见本文集
- [13] 新疆农田水分课题组,新疆农田水分规律及节水灌溉方案研究文集,1989.7,油印本