

二氧化碳浓度增加对冬小麦生长 发育影响的数值模拟*

周晓东**

(北京师范大学资源与环境科学系,北京,100875)

王馥棠

朱启疆

(中国气象科学研究院,北京,100081) (北京师范大学资源与环境科学系,北京,100875)

摘 要

根据国内外小麦生长模拟研究成果,借鉴荷兰学者的模拟思路,从作物生长的主要生理过程入手,综合考虑气候变暖与大气中 CO₂ 浓度增加等因素对作物生长发育和产量形成的影响,修正了在一级生产水平下冬小麦生长模拟模式,使得模式能够对 CO₂ 浓度的变化做出相应的反应。经资料检验,在当前 CO₂ 浓度下,冬小麦总干重和穗干重的模拟平均相对误差小于 10%,其它器官干重及叶面积指数的模拟也取得了较好的结果。运用改进后的模式模拟试验了未来气候变暖和 CO₂ 倍增对冬小麦生长发育的可能影响。

关键词:二氧化碳浓度,冬小麦,影响,数值模拟。

1 引 言

在当今气候变化的研究工作中,不确定的因素很多,如降水、辐射等的变化,但大气 CO₂ 浓度的增加,导致全球气候逐渐变暖,却是国内外学者公认的重要因素之一。作为绿色植物进行光合作用的基本原料之一,CO₂ 的增加无疑将对作物的生长发育和产量形成产生重要的直接影响。因此,从国际上近几年的气候变化对农业生产影响的研究中,可以看出这样一个趋势,那就是越来越多的研究人员在自己的研究中考虑了在未来气候变化情景下 CO₂ 浓度增加的直接影响,如美国的 CERES, SOYGRO, EPIC 模式和荷兰的 SUCROS 模式。在中国,有关 CO₂ 浓度增加的直接影响的研究虽已在 20 世纪 90 年代初开展起来,但将 CO₂ 浓度增加的直接影响嵌入作物生长模拟模式中的研究工作尚不多,相关的气候变化对农业影响的研究也尚待进一步开展。

为此,本文在前人工作的基础上,根据 OTC-1

型开顶式气室试验资料和田间试验资料,在中国气象科学研究院研制的冬小麦一层模拟模式^[1]的基础上,加入了对 CO₂ 浓度直接影响的模拟,并利用此模式模拟了 CO₂ 浓度倍增后冬小麦的生长发育过程和产量形成。另外,尝试评估了 CO₂ 浓度增加的直接影响及其导致的气候变暖对冬小麦生长发育的综合效应。

2 资料与方法

2.1 资料来源

文中有关 CO₂ 浓度增加对作物直接影响的资料取自于中国气象科学研究院固城农业气象试验基地 1993 年和 1996 年的 CO₂ 浓度影响试验资料。供试作物分别为冬小麦和春小麦,冬小麦播种时间为 9 月 30 日、春小麦为 3 月 7 日。作物生长的早期阶段均不在气室内,过后分别于 4 月 6 日和 4 月 8 日将作物移入气室开始进行不同 CO₂ 浓度的熏气试验。试验的主要设备为 OTC-1 型开顶式气室和

* 初稿时间:2001 年 6 月 10 日;修改稿时间:2001 年 10 月 4 日。

资助课题:“九五”国家科技攻关项目(96-020-01-01)“农业气象灾害防御技术研究”

** 作者原系中国气象科学研究院应用气象专业硕士研究生,现在北京师范大学攻读博士学位。

LI-1600 光合作用系统。

建模和检验模式所用的田间试验资料来自于该试验基地的 1992~1993 年冬小麦试验资料,试验采用分期播种方法,共有 7 个样本。供试品种为京冬 6 号,整个生育期内水肥条件适宜。气象资料取自于该试验基地的常规气象观测资料。

2.2 研究方法

按照本研究的要求,要将 CO_2 的直接影响加入到冬小麦生长模式中去。根据国内外有关的研究, CO_2 浓度增加对作物的直接影响主要表现在对光合作用和水分利用效率的影响,由于缺乏相关的水分试验资料,所以本文只考虑了 CO_2 浓度增加对光合作用的影响。同时,由于原模式只适用于研究华北地区整体的平均状况,对于个别点上如固城的模拟效果相对要差一些,因此,为了便于理论上研究 CO_2 浓度直接影响的准确性,本文对冬小麦模式中的光合作用子模式、叶面积子模式及一些参数进行了改进。利用 1992~1993 年河北固城大田的冬小麦试验资料,对改进后的冬小麦生长模式进行有效性检验。最后对模式进行参数敏感性试验,主要考虑温度和 CO_2 浓度的变化,并研究了在不考虑水分、氮素等胁迫情况下,未来 CO_2 浓度增加和相应增温对冬小麦生长发育的可能影响。

3 模式简介

本模式借鉴荷兰学者的模拟思路^[2],从作物生长的主要生理过程入手,以天为步长(d),综合考虑气候变暖与 CO_2 浓度增加等因素对作物生长发育和产量形成的影响,并对作物生长进行连续模拟,直至整个生长季结束。整个模式主要包括发育阶段子模式、叶面积动态子模式、光合作用子模式、呼吸作用子模式、干物质增量子模式和干物质分配与转移子模式。

3.1 发育阶段子模式

鉴于作物发育速率主要受温度制约,模式以发育所需积温为指标,以实际积温占所需积温的比值作为发育阶段的时间变量 D ,避免了日历时间无法体现年际温度条件及发育速率上的差异的局限性。根据文献和试验资料,可以确定小麦冬前所需积温,以及返青-开花、开花-成熟等阶段所需的积温。

3.2 叶面积动态子模式

植物绿叶面积的大小决定吸收光的多少,进而决定光合产物的数量,因此叶面积的模拟是正确计

算光合产物数量的重要环节。模式中叶面积的模拟分两个阶段处理。

在冬小麦返青以前,认为叶面积的生长是有效积温的指数函数^[3]:

$$L_{ai} = N \times L_{ai0} \times \exp(R_1 \cdot t_s) \quad (1)$$

式中, L_{ai} 为叶面积指数; N 为种植密度(每平方米苗数); L_{ai0} 为出苗时单株初始叶面积指数; R_1 为叶面积相对增长率; t_s 为指数生长阶段叶面积发育的有效积温。

理论上认为,当分配给非叶组织的同化物数量迅速增加或当叶片之间的相互遮荫成为重要的时候,叶面积的指数生长阶段结束。此后,冠层郁闭,叶片开始相互重叠,在此阶段可用比叶重法来计算叶面积指数。模式中,当叶面积大于 1.0 时,就开始用比叶重法来计算叶面积指数,即:

$$\begin{cases} L_{ai}(t) = L_{ai}(t-1) + S_{la} \times (W_{gl}(t) - W_{gl}(t-1)) & D \leq 0.5 \\ L_{ai}(t) = L_{ai}(t-1) + S_{la} \times (W_{gl}(t) - W_{gl}(t-1))(1 - F_d) & D > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $L_{ai}(t)$ 和 $L_{ai}(t-1)$ 分别为第 t 天和第 $t-1$ 天的群体叶面积指数; S_{la} 为比叶面积(hm^2/kg); $W_{gl}(t)$ 和 $W_{gl}(t-1)$ 分别为第 t 天和第 $t-1$ 天的绿叶干重(kg/hm^2); F_d 为黄叶率。

3.3 光合作用子模式

光合作用是第一生产水平下作物生长的驱动力,也是作物生长模式中最重要的一部分,因此作物光合作用模拟的准确与否直接决定了作物生长模拟的好坏。影响光合作用的 3 个最重要因素是:叶片的光合作用-光反应曲线,叶片冠层所截获的辐射量和光在冠层中的分布。同时光合作用还受到辐射、温度以及 CO_2 浓度等环境因子的影响。模式中采用了一种计算冠层光合作用总量的概要模型^[2]。即把叶片在时间(午时和日落间的 3 个时刻乘以 2,假定上午和下午相等)和空间(冠层分为 3 层)的光合作用瞬时速率进行积分。叶片光合作用速率根据实际叶片光合作用-光反应曲线和一天中此一时刻作物冠层各分层的直射与漫射光量来计算,一天内的辐射强度通量假定为正弦曲线。

为了能使模式对 CO_2 浓度的变化作出相应的反应,将 CO_2 浓度增加对作物光合作用的影响加入到光合作用子模式中。首先,叶片光合作用对所吸收的光的反应,可用总光合速率与所吸收辐射强度

的直角双曲线函数来描述^[4]:

$$P_n = \frac{\alpha \times P_{\max}(D_p - D_{pcp})}{P_{\max} + \alpha \times D_p} = \frac{\alpha \times P_{\max} \times D_p}{P_{\max} + \alpha \times D_p} - R_d \quad (3)$$

式中, P_n 为单叶净光合作用速率 ($\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); P_{\max} 为实际条件下的单叶最大光合速率 ($\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); α 为初始光能利用率; D_p 为到达叶片的光辐射通量密度 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); D_{pcp} 为光补偿点 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); R_d 为叶片的暗呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

从式(3)中可以看出,作物光合作用-光反应曲线主要由两个参数描述,即初始光能利用率 α 和最大光合作用速率 P_{\max} 。因此,根据荷兰学者 Goudriaan 等^[5]的研究成果(式(4),(5))将 CO_2 浓度对光合作用的直接影响加入到光合作用子模式中,使 CO_2 浓度作为自变量,成为整个模式的一个初始输入项。

$$P_{\max} = \frac{C_a - \Gamma}{350 - \Gamma} \times P_{\max350} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{C_a - \Gamma}{C_a - 2\Gamma} \times E_0 \quad (5)$$

式中, C_a 为环境 CO_2 浓度; Γ 为 CO_2 补偿点; E_0 为量子利用效率常数; $P_{\max350}$ 为 350×10^{-6} ($\mu\text{mol/L}$) CO_2 浓度下作物的最大光合速率 ($\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

3.4 呼吸作用子模式

呼吸作用是决定作物生产水平的除光合作用之外的另一个主要生理过程。作物生长过程中,除光合作用合成有机质外,同时必须以呼吸作用分解消耗部分有机质来维持生命和生长过程,前者称为维持呼吸,后者称为生长呼吸。因此,作物的总呼吸就由这两者组成:

$$R_T = R_M + R_G \quad (6)$$

式中, R_T 为总的呼吸消耗; R_M 为维持呼吸消耗; R_G 为生长呼吸消耗。维持呼吸表示单位重量生物物质为维持其基础代谢而进行的呼吸消耗。其大小与生物量成正比,且与温度有关。参照文献^[6],取标准温度 (25°C) 下的维持呼吸系数:开花前为 0.015,开花后为 0.01。温度影响系数 Q_{10} 按一般规律取 2.0。生长呼吸是指初始光合产物通过生物化学过程转化为结构干物质过程中的呼吸消耗,转化的效率取决于所形成的干物质成分,生长呼吸率

即转化过程中能量的损耗率。因此,两者可分别按以下两式进行:

$$R_M = R_m \cdot Q_{10}^{(T_{av}-25)/10} \cdot W \quad (7)$$

$$R_G = \beta \times A \times R_g \quad (8)$$

式中, R_m 为标准温度下的维持呼吸系数; T_{av} 为日平均温度; W 为植株总干重; β 为 CO_2 与碳水化合物的转换因子; A 为群体总的冠层 CO_2 同化速率; R_g 为生长呼吸系数。

3.5 干物质增量子模式

综合上述光合作用、呼吸作用子模式,根据物质能量守恒原理可模拟群体干物质的积累。

$$\begin{aligned} \Delta W &= \beta \times A - R \\ &= \beta \times A - (R_M + R_G) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ΔW 为干物质增量。因此,总干物重的动态递推模式为:

$$W_{td}(t) = W_{td}(t-1) + \Delta W \quad (10)$$

式中, $W_{td}(t)$ 和 $W_{td}(t-1)$ 分别为第 t 天和第 $t-1$ 天的总干重 (kg/hm^2); ΔW 为第 $t-1$ 天到第 t 天的干物质增量 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$)。

3.6 干物质分配与转移子模式

植物通过光合作用产生的干物质,根据植株生长的需求,按一定的比例分配到根、茎、叶及存储器官(穗)中。目前,对同化物分配的内在控制机理尚不十分清楚,现有的理论认为^[7]:在生长初期(营养生长阶段)光合产物全部分配给营养器官(根、茎、叶),过渡时期(营养生长和生殖生长并行阶段),部分同化产物开始流向穗部,生殖生长后期则全部分配给存储器官,此外还将早期存储在茎、叶中的可塑性物质转移到穗中。因此,作物器官的生长是以同化物在各器官中的分配和转移为基础的。目前,大多数模拟模式仍采用根据试验资料进行统计分析的计算方法来确定作物的分配系数和转移系数。其中,分配系数为器官干重增量与植株总干重增量的比值;转移系数为器官干重增量(负值)与该器官已有干重的比值。文中根据固城实测资料对分配和转移系数重新进行了确定。计算公式为:

$$W_j^i = W_j^{i-1} + F_j \times \Delta W - \beta_j \times W_j \quad (j = 1, 2, 3)$$

$$W_4^i = W_4^{i-1} + F_4 \times \Delta W + \sum_{j=1}^3 \beta_j \times W_j \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_j &= \Delta W_j / \Delta W & \sum_{j=1}^4 F_j &= 1 \\ F_j &\geq 0 & (j &= 1, \dots, 4) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\beta_j = \Delta W_j / W_j \quad (j = 1, 2) \quad (13)$$

i 和 $i-1$ 分别表示第 t 和 $t-1$ 天; W_j 分别表示叶 (W_1)、茎 (W_2)、根 (W_3) 和穗 (W_4) 的干物重; ΔW 为植株在第 t 天到 $t-1$ 天的干物质增量; F_j 为各器官的分配系数; β_j 为叶、茎的转移系数 ($j=1, 2$)。

4 模式有效性检验及计算结果分析

通过对 1992 年和 1993 年共 6 个播种期次的模拟发育期与实测发育期的比较, 大部分发育期的模拟误差为 1~2 d, 冬小麦叶面积、各器官干重和总干重的模拟值与实测值的趋势基本一致, 由于篇幅有限, 这里只给出了 1992 年第二播期叶面积和总干重的模拟值比较图(见图 1, 2)。表 1 为 1992 年和 1993 年 6 个样本的模拟最终总干重和穗干重与实测最终总干重和穗干重的比较。从表中可以看出, 对于冬小麦的最终总干重, 除 1993 年第三播期的模拟相对误差较大(17.9%)外, 其余播期的模拟相对误差均在 10% 以内; 最终穗干重的模拟效果与总干重的模拟效果相同, 也是在 1993 年第三播期的模拟相对误差较大, 而总的平均模拟相对误差为 10.5%。从大多数播期的模拟值大于实测值来看, 模式中某些参数的确定还存在系统性偏差问题, 有待进一步改进。对于图 2 中播种后第 223 天实测干重出现突然升高, 经对资料的分析, 可能由于取样测定有误导致此次实测值偏高, 所以出现总干重突然升高然后又下降。另外, 从图 2 中可以看出, 在返青到拔节阶段模拟干重成倍偏高。这主要是由于模式没有考虑越冬对冬小麦的影响(如越冬期小麦的枯死率等),

其次在这一阶段小麦干重本身就小, 所以更显得模拟干重成倍偏高。

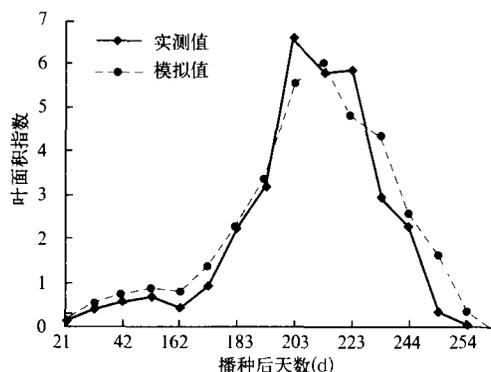


图 1 冬小麦模拟叶面积与实测叶面积的比较

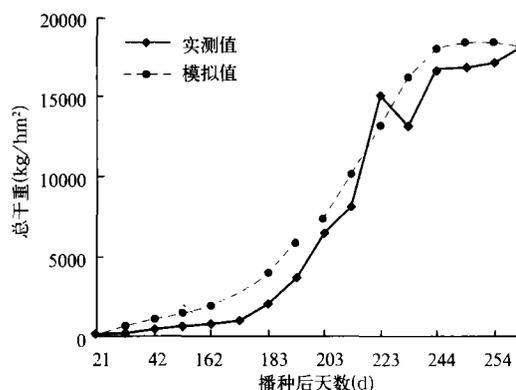


图 2 冬小麦模拟总干重与实测总干重的比较

从上述模拟效果检验可以看出, 该模式在模拟当前 CO_2 浓度水平下的冬小麦生长有较好的模拟效果。

表 1 冬小麦最终总干重和最终穗干重模拟结果分析(单位: kg/hm^2)

年份	播期	实测总干重	模拟总干重	误差(%)	实测穗重	模拟穗干重	误差(%)
1992年	9月20日	19265.1	20759.5	7.8	11835.0	12489.0	5.5
	10月1日	18217.1	17911.2	-1.7	11263.5	11319.5	0.5
	10月11日	13970.7	14999.4	7.4	8563.4	9538.4	10.4
	10月21日	13549.8	14265.1	5.3	8133.0	8882.8	8.2
1993年	10月10日	11038.4	11917.4	7.9	6936.2	7920.0	13.2
	10月20日	6428.6	7580.8	17.9	4020.8	5160.8	26.4

5 参数灵敏度分析

为了检验模式的有效性, 同时研究冬小麦生长发育对环境参数变化的响应灵敏程度, 有必要作参数灵敏度分析。由于这一工作比较复杂, 本文只对温度和 CO_2 浓度两个环境参数作了分析。

5.1 温度变化对固城地区冬小麦的影响

温度是目前气候变化研究中主要考虑因素之一。这里以固城 1992 年第二播期为例, 在其它参数不变的条件下, 假定冬小麦生长季内日平均气温分别升高和降低 1°C , 2°C , 模拟试验了温度变化对冬小麦生育期和总干物重的影响, 其结果见图 3 和表 2。

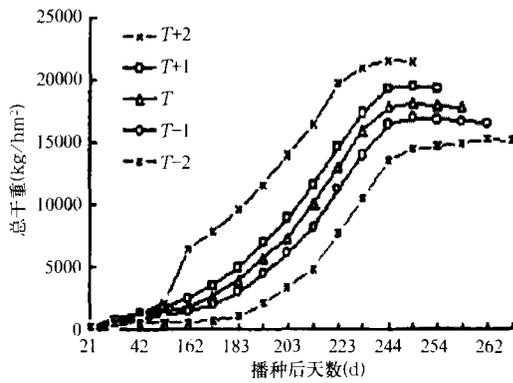


图3 温度变化对冬小麦总干重的影响

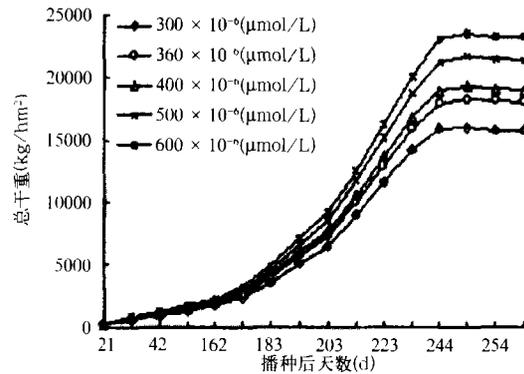
表2 温度变化(°C)对冬小麦总干物重(kg/hm²)和生育期(d)的可能影响

温度变化	可能影响			
	总干物重及其变化(%)		生育期及其变化(d)	
+2	21479.9	+19.9	246	-12
+1	19367.4	+8.1	253	-5
-1	16659.0	-7.0	262	+6
-2	15204.3	-15.1	267	+11

从表2中可以看出,温度升高,冬小麦的总干物重随之升高;温度下降,冬小麦的总干物重也随之下降。其主要原因是,温度升高使冬小麦越冬期推迟,返青期提前,有利于冬小麦安全越冬,增加有效分蘖的数量,同时温度升高也能增强小麦的光合作用、提高其它资源(辐射、水分、肥料)的利用率,进而有助于营养生长期的干物质积累;另一方面,温度升高将加快冬小麦的发育速率,使整个生育期缩短,但生育期缩短所带来的负效应要小于升温所带来的正效应,当然这里的升温是在一定的范围内,如果升温过高情况则可能相反。所以总的来说,在不考虑水分等其它条件影响的情况下,气候变暖对冬小麦的生长和干物质积累是有利的。反之,温度降低冬小麦提前进入越冬期,使休眠期延长,并且更容易受冻害,温度降低所带来的负效应要大于生育期延长所带来的正效应,因此降温导致冬小麦的总干物重下降。以上所得结果是在假设水分充足的情况下得出的,如果存在水分胁迫,结果可能会有所不同。

5.2 CO₂浓度的变化对固城地区冬小麦的影响

CO₂是植物进行光合作用的基本原料之一,CO₂浓度的增加无疑将对冬小麦的生长产生影响。因此,文中就以固城1992年第二播期为例,在其它

图4 CO₂浓度变化对冬小麦总干重的影响表3 不同CO₂浓度对冬小麦总干物重的可能影响

CO ₂ 浓度 ×10 ⁻⁶ (μmol/L)	300	360	400	500	600
总干物重 (kg/hm ²)	15801.0	17911.2	19093.7	21476.8	23278.0
其变化(%)	-11.8	0	+6.6	+19.9	30

参数不变的条件下,假定冬小麦生长季内的CO₂浓度分别为300×10⁻⁶(μmol/L),400×10⁻⁶(μmol/L),500×10⁻⁶(μmol/L),600×10⁻⁶(μmol/L),对CO₂的直接影响进行了模拟试验,其结果见图4和表3。

从图4和表3中可以看出,CO₂浓度的变化对冬小麦总干物重的影响比较大。冬小麦的总干物重随着CO₂浓度的增加而增加,反之亦然。这说明CO₂浓度的增加有可能是导致冬小麦产量水平增加的原因之一。理论上,如果水分、养分、光照等环境条件都满足的话,植物的光合作用在高CO₂浓度下势必得到促进。存在争议的是,长期反应后,植物的CO₂补偿点和饱和点是否将发生变化?不少实验发现,植物在长期高CO₂浓度适应后,即光合适应现象,植物的光合作用恢复到原来的水平甚至下降。

5.3 温度增加和CO₂浓度倍增对固城地区冬小麦的综合影响

国内众多有关气候变化对农业生产影响的研究中,考虑到CO₂浓度增加所带来直接影响的研究还很少。因此,文中利用此冬小麦模式以1992年固城冬小麦第二播期为例研究了未来气候变暖和CO₂倍增对冬小麦生长的影响。为了将温度增加的影

响、CO₂ 浓度增加的影响以及两者的综合影响区别开来,设计了4种方案:(1)当前情况下的温度和CO₂ 浓度 350×10^{-6} ($\mu\text{mol/L}$);(2)温度增加 3 °C, CO₂ 浓度保持当前水平;(3)温度不变,CO₂ 浓度倍增 700×10^{-6} ($\mu\text{mol/L}$);(4)温度增加 3 °C, CO₂ 浓度倍增。在此假定水分条件适宜,其它有关参数、种植制度及田间管理措施在温度增加和 CO₂ 浓度倍增时不发生变化,结果见图 5 和表 4。

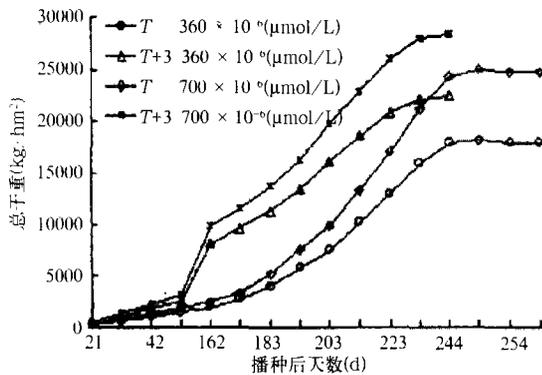


图 5 温度升高和 CO₂ 浓度倍增对冬小麦总干重的影响

表 4 温度增加和 CO₂ 浓度直接对冬小麦总干物重的综合影响

温度 (°C)	CO ₂ 浓度 $\times 10^{-6}$ ($\mu\text{mol/L}$)	总干物重及其变化 (kg/hm ²)	(%)
当前温度	360	17911.2	0
+3	360	22495.6	+25.6
当前温度	700	24686.3	+37.8
+3	700	28409.5	+58.6

从图 5 和表 4 中可以看出,当温度增加 3 °C 而 CO₂ 浓度保持现有水平时,冬小麦的总干物重增加了 25.6%。当温度不变而 CO₂ 浓度倍增时,冬小麦的总干物重增加了 37.8%,可见 CO₂ 浓度倍增所带来的正效应要比温度增加 3 °C 所带来的正效应更显著,这与国内外有关文献所列的研究结果^[8,9]相类似。当温度增加 3 °C 并且 CO₂ 浓度倍增时,冬小麦的总干物重增加了 58.6%,两者的综合影响所带来的正效应比它们各自的正效应大许多。这说明在水分充足的条件下,温度的增加对 CO₂ 浓度增加的正效应有促进作用,同时,CO₂ 浓度增加对温度增加的正效应也有促进作用。

这里还需要说明的是,并不是温度越高越有利,

升温是有一定限度的。首先,升温过多使生育期大大缩短,最终导致减产;另外,升温过多可能使小麦遭遇高温胁迫,最终对小麦的生长不利。由于本研究是在冬小麦一层模式下进行的,即在理想状态下不考虑高温、水分和营养胁迫等的影响,因此没有进行高温胁迫和温度对不同播期的小麦影响的研究。

6 结论与讨论

(1)根据国内外小麦生长模拟研究成果,借鉴荷兰学者的模拟思路,从作物生长的主要生理过程入手,综合考虑气候变暖与大气中 CO₂ 浓度增加等因素对作物生长发育和产量形成的影响,修正了在一级生产水平下冬小麦生长模拟模式。即将 CO₂ 浓度作为输入变量,模拟估算了 CO₂ 浓度增加对冬小麦光合作用的直接影响。经初步检验,模式对冬小麦总干物重的模拟平均绝对相对误差为 8%,对穗干重的模拟平均绝对相对误差为 10.5%,其它器官干重及叶面积指数的模拟也取得了较好的结果,模拟值与实测值基本符合,说明模型性能较好,有一定的实用价值。

(2)模式对环境参数(温度、CO₂ 浓度)进行的灵敏度分析表明:① 当温度升高时,冬小麦的生育期缩短,总干物重增加;反之,冬小麦的生育期延长,总干物重减少。② 当 CO₂ 浓度增加时,冬小麦的总干物重随之增加;反之亦然。③ CO₂ 浓度倍增所带来的正效应要比温度增加 3 °C 所带来的正效应更显著。④ 在温度增加 3 °C 和 CO₂ 浓度倍增的情况下,两者相互有促进作用。

(3)由于试验资料的限制,在有关 CO₂ 浓度直接影响的数值模拟研究中,本文没有考虑 CO₂ 浓度增加对作物蒸腾和水分利用率的影响,有待于今后的评估研究中进一步修正与完善。本模式虽属机理性模型,但仍包含一定的经验成分,如同化物的分配转移,比叶重的变化等。一些有关 CO₂ 浓度增加直接影响研究的参数是从开顶式气室内盆栽小麦资料中获取的,尚不能很好的反映大田状况下的作物生长情况。另外,实际的作物生产系统是非常复杂的,包括众多的可控和非可控因子,实际条件可能出现的高温胁迫、水分胁迫及氮素营养胁迫,但模型均没有考虑。因此,若能考虑这些影响因素的考虑,模型将会更趋完善。

致谢:在本研究工作中,中国气象科学研农气中心的

王石立研究员给予了指导并提出了宝贵意见,王春乙和郭建平同志为本文提供了部分资料,在此表示由衷的感谢!

参考文献

- 1 王石立.冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用.见:王馥棠,徐祥德主编.华北农业干旱研究进展.北京:气象出版社,1997.110~118
- 2 Penning de Vrise F W T,朱德峰等译.几种一年生作物生长的生态生理过程模拟.北京:中国农业科技出版社,1991.299pp
- 3 Kropff M J, et al(eds). ORYZA1-1; A basic model for irrigated and low rice production, IRRI philippines - wageniagen. 1993,43~45
- 4 门司正三,佐伯敏郎.植物群体中光的因素及其对植物生产的作用.见:王天铎主编.光合作用与作物生产译丛(2).北京:农业出版社,1980.1~68
- 5 Goudriaan J, et al. Photosynthesis, CO₂ and plant production, In: Day W,Atkin R K,(eds.). Wheat growth and modeling.NATO ASI Series, A Life Sciences, Plenum Press, New York, 1985. (68): 107~122
- 6 Penning de Vrise F W T. 王馥棠译.植物生长与作物生产的模拟.北京:科学出版社,1988.161pp
- 7 张建新等.生长期一定时一年生植物光合产物的最优分配策略的理论分析.生态学报,1990,10(3): 243~247
- 8 王春乙等.二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农业生产.北京:气象出版社,1996.191pp
- 9 Cure J D, Acock B. Crop response to carbon dioxide doubling: A literature survey. Agri Forest Meteor, 1986, (38): 127~145

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE EFFECTS OF INCREASING CO₂ CONCENTRATION ON WINTER WHEAT

Zhou Xiaodong

(*Research Center for RS and GIS of Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Wang Futang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences Beijing 100081*)

Zhu Qijiang

(*Research Center for RS and GIS of Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Abstract

The adaptation of a winter wheat simulation model to deal with the impacts of increasing CO₂ concentration and climate change is described in this paper. The model was validated for the present climatic conditions. The mean relative error of simulation is lower than 10% for the weight of total dry matter and the spike weight at the end of growing period. The simulated values of other organ's weight as well as leaf area index are also well fitted with the observed. Finally, by this modified model the possible effects of increasing CO₂ concentration and climate change on winter wheat are estimated. The results show that the rising temperature and increasing CO₂ concentration both have positive impacts on winter wheat in Gucheng of Hebei Province and they promote each other for positive impacts.

Key words: CO₂ concentration, Winter wheat, Impact, Numerical simulation.