2004年2月

Journal of Nanjing Institute of Meteorology

文章编号: 1000-2022(2004) 01-0001-10

# 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高及气候变化 对作物冠层光合影响的数值模拟

刘建栋<sup>1</sup>, 刘文泉<sup>1</sup>, 于 强<sup>2</sup>, 金之庆<sup>3</sup> (1.中国气象科学研究院,北京 100081; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所,北京 100101; 3.江苏省农业科学院 农业现代化研究所,江苏 南京 210014)

**摘**要:利用美国Licor-6200光合作用测定仪,对黄淮海地区代表性冬小麦品种鲁麦 23号叶片光合作用速率进行了较为全面的测定,分别确定了冬小麦叶片光一光合作用响应曲线和CO2-光合作用响应曲线,在此基础上,建立了叶片光合作用模式,并进而建立了| 个具有瞬时时间尺度,空间积分为叶片尺度的冬小麦冠层模式,利用模式分别分析了大气中CO2浓度升高和温度变化对冠层光合作用的不同影响,并在此基础上进| 步进行了综合数值分析。单因子分析表明:晴天状况下,冠层光合速率随CO2浓度升高而上升,当CO2浓度由 330×10<sup>-6</sup>上升至 660×10<sup>-6</sup>时,冠层光合速率随 CO2浓度升高而上升,当CO2浓度由 330×10<sup>-6</sup>上升至 660×10<sup>-6</sup>时,冠层光合电总量可增加19.7%;冠层光合速率随辐射增加而增大,辐射量增加10.0%,冠层光合日总量可增加 6.7%;冠层光合速率随温度升高而下降,温度升高1°C,冠层光合日总量减少2.9%。多因子综合数值分析表明:在辐射量较大的气候背景下,冠层光合电率则温度和温度和CO2变化响应更加敏感。本文的实测数据为研究气候变化对中国农业影响提供了最基本的可靠模型参数,冠层光合模型为未来改进作物模型提供了理论基础。

关键词: CO2 浓度; 温度; 作物冠层光合; 数值模拟

中图分类号: S162.53 文献标识码: A

西方工业革命以来,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度已经从原来的 280×10<sup>-6</sup>上升到 365×10<sup>-6</sup>左右,预 计 21 世纪末将达到(600~700)×10<sup>-6</sup>, CO<sub>2</sub> 浓度升高使温室效应不断加强,气候变暖,这将对 中国农业生产带来一定的冲击,作为人口大国,目前中国粮食已经承受了耕地减少、人口增加 等众多压力,目前又面临 CO<sub>2</sub> 增加引起的全球气候变化的威胁与挑战,为此,科学界应当从现 在开始做出客观评价,并提出相应的科学对策<sup>[1]</sup>。

王馥棠<sup>[2]</sup>、王石立<sup>[3]</sup>开展了该领域的一些初步研究,采用积分回归等统计方法分析了气候 波动与农作物产量间的相关关系;之后,高素华<sup>[4]</sup>建立起作物—气候统计模式,并将 GCM 的 输出结果输入到模式中,研究了大气中 CO<sub>2</sub> 升高对中国农业的可能影响。20 世纪 90 年代初, 金之庆等<sup>[5]</sup>首次运用作物模型,选择一定的气候变化情景,就改变作物品种、播期、灌溉水平,

收稿日期: 2002-11-09; 改回日期: 2003-06-08

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40233034); 国家 "十五 "攻关资助项目(2001BA509B13)

作者简介:刘建栋(1969-),男,河北辛集人,研究员,博士后,研究方向:农业气象数值模拟以及生物地球化学模式研究.

进行了相关的数值模拟试验,并提出了我国适应气候变化的若干粮食生产对策。

目前国内外广泛开展了利用作物模型研究气候变化对农业的影响的研究<sup>[6-10]</sup>。这些研究 往往是针对最终产量或生产力进行的一些数值模拟。众所周知,作物的最终产量或生产力由逐 日光合作用不断累积以及干物质分配引起。因此,未来 CO<sup>2</sup> 浓度升高对冠层光合作用日变化 产生何种影响成为一个重要的基本科学问题,然而迄今为止尚未见有关研究报道。本文在实测 数据支持下,首先建立了一个叶片光合作用模式,并利用 Ross 辐射分布方案建立了一个冬小 麦冠层逐时积分模式,利用数值模式分析了 CO<sup>2</sup> 和温度变化对冠层光合作用的可能影响,以 丰富该领域的一些基础应用研究。

## 1 观测实验研究

实验在山东农业大学试验农场进行,1998年10月中旬播种鲁麦23号冬小麦,管理措施 及水肥状况适宜,冬小麦长势良好,于1999年4月29日在冬小麦抽穗期利用美国Licor公司 生产的Licor-6200光合作用测定仪测定冬小麦的叶片光合速率,测定中通过纱布遮光及在叶 室中输入CO<sup>2</sup>等方法测定了光强渐变及CO<sup>2</sup>渐变时冬小麦叶片光合速率变化情况,利用 Licor-6200光合作用测定仪测定叶片光合作用的同时,利用抛物线法确定了冬小麦株型结构 参数(表1)。

Table 1 Area density of the leaf inclination of winter wheat						
叶面积深度	叶倾角/(					
	0~15	15 ~ 30	30~45	45 ~ 60	60 ~ 75	75 ~ 90
0~1	1.00	0.04	0.12	0.16	0.30	0.38
0~2	0.00	0.03	0.10	0.19	0.32	0.36
0~3	0.03	0.06	0.11	0.17	0.29	0.34
0~4	0.07	0.13	0.09	0.14	0.25	0.32
0~5	0.10	0.12	0.11	0.13	0.23	0.31

表1 不同冬小麦倾角的叶面积分布密度

## 0~5 0.

## 2 模型的建立

#### 2.1 气象要素日变化的推算

 $D_{s}$ 

本文所发展的是一个冠层光合作用逐时积分模式,因此,首先要推算辐射日变化过程和温度日变化过程。

1 a 中的 365 d 对应区间[0, 2π], 取日角 θ= 2π(d = 1)/365, d 为年的日序, 1 月 1 日取为 1, 12 月 31 日为 365, 那么赤纬 δ 为<sup>[11]</sup>:

$$\delta = 0.006\ 894 - 0.399\ 512\cos(\theta) + 0.072\ 075\sin(\theta) - 0.006\ 799\cos(2\theta)$$

+ 0.000 896sin(2 $\theta$ ) - 0.002 689cos(3 $\theta$ ) + 0.101 516sin(3 $\theta$ ). (1)

地理纬度为 $\Psi$ 的地区,日序为 $d_n$ 时,太阳时角 $\omega$ 时刻的光合有效辐射 $R_{PA}(\omega)$ 可表示为

$$R_{PA}(\omega) = \frac{0.5Q \cdot \sin h \cdot (1 + 0.4\sin h)}{3.600D_s},$$

$$= D_L(\sin\varphi\sin\delta + 0.4\sin^2\varphi\sin^2\delta + 0.2\cos^2\varphi\cos^2\delta) + \frac{1}{1+\cos^2\varphi\cos^2\delta} + \frac{1}{1+\cos^2$$

$$12\cos\varphi_{\cos\delta}\left[2 + 1.2\sin(\varphi\pi) - 1 - \frac{\sin^2\varphi_{\sin^2\delta}}{\cos^2\varphi_{\cos^2\delta}}\right] \circ$$
(3)

式中, Q 为日总辐射量; h 为太阳高度角;  $D_L$  为日长; 太阳高度角 h、日落时角  $\omega$  以及日长  $D_L$  可由天文辐射公式进行推算<sup>[12-19]</sup>。

在得到 $\omega$ 时刻的总光合有效辐射 $R_{PA}(\omega)$ 后,根据大气传输方程,散射光合有效辐射为 $D^*(\omega) = R_{PA}(\omega) \cdot D_f$ 。(4)

式中, Df 为散射辐射所占比例,

$$D_{f} = \begin{cases} 1, & a_{t} = 0.22; \\ 1 - 6.4(a_{t} - 0.22)^{2}, & 0.22 < a_{t} = 0.35; \\ 1.47 - 1.66a_{t}, & a_{t} > 0.35_{\circ} \end{cases}$$
(5)

式中

$$a_{t} = \frac{R_{PA}(\omega)}{0.5S^{c} \cdot \sinh^{\circ}}$$
(6)

Sc 为太阳常数,其值随日而变化,可表示为

$$S^{c} = 1 \ 370 \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi d_{n}}{365} \right) \right]$$
 (7)

直接光合有效辐射为

$$S^{*}(\omega) = R_{PA}(\omega) - D^{*}(\omega)_{\circ}$$
(8)

群体温度根据 William 提出的公式进行计算<sup>[20]</sup>。

2.2 冠层光合作用模型

(1) 冠层光分布模式

在太阳光线方向 n。上 G 函数可表示为<sup>[21]</sup>

$$G(\boldsymbol{n}_{s}) = G(\boldsymbol{h}, \boldsymbol{A}) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} d\boldsymbol{\mathcal{P}} \left[ \int_{0}^{\pi/2} g(\boldsymbol{\theta}_{s}, \boldsymbol{\mathcal{P}}) \right] \cos(\boldsymbol{n}_{s} \boldsymbol{n}_{s}) \sin \boldsymbol{\theta}_{s} d\boldsymbol{\theta}_{s}$$
(9)

式中,h为太阳高度角,A为太阳方位角, $g(\theta_{L}, Q)$ 为叶方位角为Q、叶倾角为 $\theta_{L}$ 的叶倾角分布 函数, $n_{L}$ 为叶片法线方向的单位矢量, $\cos(n_{s}n_{L})$ 为太阳光线方向和叶片法线方向夹角的余弦, 可由Ross相应公式进行求算<sup>[21]</sup>。直射光穿透函数 $\tau_{c}(L, n_{s})$ 和散射光穿透函数 $\tau_{a}(L)$ 为

$$\tau_{s}(L, \boldsymbol{n}_{s}) = \exp[-L \cdot \frac{G(\boldsymbol{n}_{s})}{\sinh}], \qquad (10)$$

$$\tau_{d}(L) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{2\pi \pi/2} \tau_{s}(L, \mathbf{n}) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \qquad (11)$$

其中  $\tau(L, \mathbf{n}_s)$  为倾角  $\theta$ 和方位角  $\mathcal{P}$ 所决定矢量方向的透过函数,  $\frac{G(\mathbf{n}_s)}{\sinh}$  即是消光系数  $K_{\circ}$  当太 阳高度角为  $h_{\circ}$ 方位角为 A 时, 叶面积深度 L 处水平面直接光合有效辐射为

$$S^{*}(L, \boldsymbol{n}_{s}) = S^{*}(\boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\tau}_{s}(L, \boldsymbol{n}_{s}) \boldsymbol{\omega}$$
(12)

那么, 叶面积深度  $L = 1 \sim L$  层次内、倾角为  $\theta$ 、方位角为 q 叶片上的直接光合有效辐射为

$$S^{*}(L-1,\boldsymbol{\theta}_{L},\boldsymbol{\varphi}_{L}) = \frac{S^{*}(L-1,\boldsymbol{n}_{s})}{\sin h} \cdot \left|\cos(\boldsymbol{n}_{s}\boldsymbol{n}_{L})\right|_{\circ}$$
(13)

在太阳高度角为 h、方位角为 A 时,考虑了一次散射过程后的叶面积深度 L 处水平面散射光 合有效辐射强度为

$$D^{*}(L) = D^{*}(\omega) \tau_{0} + \frac{Q^{*}(\omega) \sigma^{*} K (e^{-KL} - e^{-L})}{1 - K}$$
(14)

式中,  $\sigma^{*} = (\rho^{*} + \tau^{*})/2$ , 其中  $\rho^{*}$  为叶片光合有效辐射反射系数, 在叶面积深度  $L = 1 \sim L$  层次 内、倾角为  $\Theta$ 、方位角为  $\Omega$  的叶片接收到的散射辐射量与叶方位角无关, 可以表达为

$$D^{*}(L - 1, \theta, \theta) = D^{*}(L - 1) \frac{1 + \cos \theta}{2}$$
(15)

(2) 作物叶片光合作用模式

水分及管理措施适宜状况下的作物叶片光合作用模式可以表示为

$$\begin{cases}
P_{n} = P_{g} - R_{d}, \\
P_{g} = \frac{QI + \beta C - (QI + \beta C)^{2} - 4\theta(QI\beta C)}{2\theta} \bullet F(T), \\
F(T) = \frac{2(T + B)^{2}(T_{max} + B)^{2} - (T + B)^{4}}{(T_{max} + B)^{4}}, \\
R_{d} = R_{m} + R_{g}, \\
R_{m} = r_{m} \bullet M_{D} \bullet Q_{10}^{\frac{T - T_{m}}{10^{10}}}, \\
R_{g} = (1 - C_{VF}) \bullet (P_{g} - R_{m})_{\bullet}
\end{cases}$$
(16)

式中,  $P_n$  为净光合速率;  $P_g$  为总光合速率;  $R_d$  为暗呼吸速率;  $\alpha$  为初始光合效率; I 为光合有效 辐射光量子通量密度;  $\beta$  为最大光合速率系数; C 为 CO<sub>2</sub> 浓度;  $P_{max} = \beta C$  为最大光合速率;  $\theta$  为 凸度; F(T) 为温度影响廓线函数; T 为温度; B 为温度订正参数;  $T_{max}$  为作物生长最适温度参 数;  $R_m$  为维持呼吸速率;  $R_g$  为生长呼吸速率;  $r_m$  为维持呼吸系数;  $M_D$  为干物重;  $Q_{10}$ 为呼吸作 用生化反应参数;  $T_m$  为呼吸作用参考温度;  $C_{VF}$  为初始光合产物的转换效率。其中  $C_{VF}$ 和  $Q_{10}$ 是 生化参数, 一般认为生化参数随作物品种变化很小, 取  $Q_{10} = 2.0, C_{VF} = 0.7$ 。代入 Licor-6200 的实测数据, 确定的相关参数为:  $\alpha = 0.042$ ;  $P_{max} = 35.97$ ;  $\theta = 0.55$ ;  $T_{max} = 25$  ; B = 10;  $r_m = 50.245 \ \mu mol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ (图 1)。



图 1 冬小麦叶片光合作用模型的确定

#### a. 光—光合作用曲线; b. CO2—光合作用曲线; c. 模拟值与实测值的对比

Fig. 1 Determination of the leaf photosynthesis model of winter wheat

a. curve of photosynthesis response to light;

b. curve of photosynthesis response to CO<sub>2</sub> concentration; c. comparison between measured data and simulated value

(3) CO2 日总同化量

将太阳时角  $\omega$  时刻, 叶面积深度 L、叶倾角  $\theta$ 、叶方位角  $\Omega$  叶片上的光合有效辐射  $Q^*(\omega L, \theta, \varphi)$  代入单叶光合作用模式, 得到此叶片净光合作用速率  $P_i(\omega L, \theta, \varphi)$ 。对时角  $\omega$ 进行积分, 可得到日总同化量为

$$P_{d} = \frac{-\omega_{0}}{-\omega_{0}} \frac{1}{\omega_{0}} \frac{2\pi}{\omega_{0}} \frac{1}{\omega_{0}} P_{j}(\omega, L, \boldsymbol{\theta}_{L}, \boldsymbol{\varphi}) P(L, \boldsymbol{\theta}_{L}, \boldsymbol{\varphi}) d\boldsymbol{\theta}_{L} d\boldsymbol{\varphi} dL d\omega, \qquad (17)$$

式中,  $-\omega_{0}$ ,  $-\omega_{0}$ 分别为日出时角和次日日出时角;  $P(L, \mathbf{0}, \mathbf{\Omega})$ 为叶面积深度 L处、倾角为

θ.、方位角为 92 的叶面积密度值。本文为保证计算精度,对叶面积深度进行逐层积分,叶倾角、 方位角分别划分为 6 个区域和 8 个区域进行积分,则

 $INT(I_{I_A}) + 1 = 6$ 

 $P_{g}(\omega) = P_{j}(\omega, L, \boldsymbol{\theta}_{i}, \boldsymbol{\varphi}_{j}) P(L, \boldsymbol{\theta}_{i}, \boldsymbol{\varphi}_{j}) \Delta \boldsymbol{\theta}_{i} \Delta \boldsymbol{\varphi}_{j} \Delta L_{\circ}$ (18)

对 ω进行连续积分,可求出日净同化量的精确解。利用同化箱观测的田间冬小麦群体光合实 测资料对模式进行验证,平均误差为 6.9 % 左右。因此,还可以利用模式分析 O<sub>3</sub> 对群体光合 影响。

### 3 数值分析

目前开顶式气室中进行的 CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物的光合影响的实验, 其室内 CO<sub>2</sub> 浓度 1 d 中保持不变, 这与实际情况下农田上方存在明显 CO<sub>2</sub> 日变化的事实不符, 迄今为止还无法用 大型人工实验进行有关 CO<sub>2</sub> 日变化状况下的冠层光合作用测定研究。因此, 利用实测的叶片 光一光合作用和 CO<sub>2</sub>—光合作用相关参数, 建立起准确的冠层光合模型, 给出相关模拟背景, 利用模式揭示相关变化规律, 成为目前最有效的研究手段。在进行数值分析前, 首先要给定数 值模拟背景。本文假设的模拟背景: 地点为山东泰安, 模拟日期为 1999 年 5 月 1 日, 此时冬小 麦处于抽穗期, 叶面积系数为 5。当日的 CO<sub>2</sub> 浓度日变化见图 2a; 辐射日总量 Q<sub>4</sub> 为 18 M J/d; 当天最高温度为 28 , 最低温度 18 。图 2 为三种气象要素的模拟背景 BASE 值。



### 图 2 气象要素的模拟背景 a. CO<sub>2</sub> 日变化; b. 辐射日变化; c. 温度日变化

Fig. 2 Simulated scenario of meteorological elements a. diurnal variation of  $CO_2$ ; b. diurnal variation of radiation;

 $c {\boldsymbol \cdot} diurnal variation of temperature$ 

#### 3.1 单因子分析

进行单因子分析时,不同要素变化方式为: (1) CO<sub>2</sub> 的逐时值由 BA SE 状况依次增加 110 × 10<sup>-6</sup>,这样使 CO<sub>2</sub> 的日平均浓度[CO<sub>2</sub>] 依次为 330 × 10<sup>-6</sup>、440 × 10<sup>-6</sup>、550 × 10<sup>-6</sup>、660 × 10<sup>-6</sup>; (2) 辐射日总量改变为 BA SE 状况  $Q^a$  的 *B* 倍, *B* 值分别为 0.8、0.9、1.0 和 1.1; (3) 温度 的逐时值由 BA SE 状况增加  $\Delta T$ ,  $\Delta T$  依次取为 1 、2 、3 。其中一个因子发生改变时,其他因子保持不变。

冠层光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而增加(图 3b),在 BASE 状况下,即 CO<sub>2</sub> 日平均浓度 [CO<sub>2</sub>]为 330×10<sup>-6</sup>时,冠层光合日总量为 68.8 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>;当[CO<sub>2</sub>]升高到 660×10<sup>-6</sup>时, 冠层光合日总量增加至 82.4 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,增加了 19.73 %。利用模式对[CO<sub>2</sub>]连续增长过程 分别进行数值积分,得到不同[CO<sub>2</sub>]状况下的冠层光合日总量(图 3c),结果表明冠层光合日总 量随[CO<sub>2</sub>]升高而加大,但是增加的幅度并不相同,330×10<sup>-6</sup>~440×10<sup>-6</sup>范围内基本呈线性 增加,随着[CO2]的进一步升高,冠层光合日总量增加幅度变小。





Fig. 3 Numerical analysis of the influence of CO<sub>2</sub> enhancement on canopy photosynthesis

a. diurnal variation of CO<sub>2</sub>; b. diurnal variation of canopy photosynthesis;

c. curve of canopy photosynthesis response to CO2

冠层光合速率随辐射增加而增大(图 4b), *B* 值为 0.8、0.9、1.0 和 1.1 时, 对应的冠层光 合日总量分别为 59.1、64.1、68.8 和 73.4 g · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>。 BASE 状况下的日总辐射量升高 10 %, 冠层光合日总量增加 6.66 %。图 4c 是辐射日总量与冠层光合日总量之间的关系, 冠层 光合日总量随辐射日总量线性增加。叶片光合有效辐射达到一定值后叶片光合速率开始达到 饱和, 即叶片光合速率不再随辐射增加而增大, 因此似乎图 4c 数值分析结果与此发生矛盾。实 际上在黄淮海地区, 目前状况下一般典型晴天辐射日总量可达到 20 MJ · m<sup>-2</sup>, 但这一数值不 是过高的辐射日总量。在这种辐射日总量状况下, 即使是中午在冠层上方的第一层叶子也尚未 达到光饱和点, 并且关键是以下数层叶子受光更弱, 远低于光饱和点, 这使得冠层的光饱和点 远高于叶片的光饱和点<sup>122]</sup>。因此, 在本文研究的辐射范围内, 冠层光合日总量随辐射日总量呈 线性增加。数值分析表明: 当辐射日总量非常大时, 所得到的辐射日总量—冠层光合日总量曲 线与叶片光响应曲线变化趋势相同, 但实际上辐射日总量不可能比 20 MJ · m<sup>-2</sup>高出数倍, 因 此本文仅给出与实际状况比较一致的辐射日总量的相关模拟结果。





c-curve of daily total canopy photosynthesis response to radiation

温度升高对冠层光合日变化影响较为复杂,06:00—10:00 或16:00 后的时段内,由于 BASE 状况下的温度低于冬小麦光合作用的最适温度,因此略有增温,只要其温度不越过最适 温度,冠层光合速率随温度上升而增加。但是在中午前后的两小时左右的时间内,由于 BASE 状况下的温度已经达到了最适温度,随着温度的升高,引起冠层光合速率的下降(图5b)。应当

7

指出的是此时段辐射较强,因此,冠层光合作用速率本身就较大,因而对温度升高较为敏感。换 言之,此时段内的温度上升引起的冠层光合损失量比较明显。因此,从一天总的情况看,冠层光 合日总量随温度升高而下降。图 5e 是连续数值积分的计算结果,冠层光合日总量随着温度的 升高而下降,当温度上升1 时,下降较为缓慢,但是随温度的进一步升高,冠层光合日总量 下降幅度加大。





Fig. 5 Numerical analysis of the effect of temperature variation on canopy photosynthesis a. diurnal variation of temperature; b. diurnal variation of canopy photosynthesis; c. curve of total daily canopy photosynthesis response to temperature

#### 3.2 多因子综合数值分析

将辐射分别固定为4种状况,对每一种辐射状况同时改变 CO<sub>2</sub> 浓度和温度,得到4种辐射日总量状况下温度和 CO<sub>2</sub> 浓度对冠层光合日总量的综合影响(图6)。数值分析表明:不同的辐射日总量状况下,冠层光合日总量随 CO<sub>2</sub> 和温度变化规律是基本一致的,即:冠层光合日总量随 CO<sub>2</sub> 浓度增加而增大,随温度升高而降低,并且当 CO<sub>2</sub> 浓度相对较低时,冠层光合日总量随温度升高的减小量较少,当 CO<sub>2</sub> 浓度相对较高时,冠层光合日总量随温度升高的减小量较大,这意味着在未来高 CO<sub>2</sub> 环境下,冠层光合对温度更加敏感。比较4种不同的辐射状况可以发现,辐射状况不同的情况下以上的基本规律是一致的,但是当辐射日总量较大时,冠层光合日总量随 CO<sub>2</sub> 和温度变化的等值线更加密集。换言之,当辐射较强时,冠层光合日总量对 CO<sub>2</sub> 和温度变化更加敏感。

# 4 数值分析中的不确定性探讨

目前研究 CO<sub>2</sub> 浓度升高、气候变化对作物生长过程以及产量形成的模拟,大都采用作物 生长数值模式,目前国内外作物生长数值模式大都以日为积分步长,不能模拟各气象要素的日 积分过程,因此也就无法模拟冠层光合日变化。以日为积分步长的模式是直接求算出冠层光合 日总量后,进行 CO<sub>2</sub> 浓度对冠层光合影响的订正,实际上是默认了 CO<sub>2</sub> 浓度一天中保持不变。 由此必然产生一个科学问题:即使一天中的 CO<sub>2</sub> 平均浓度[CO<sub>2</sub>] 保持不变,但其可以对应多种 不同的 CO<sub>2</sub> 浓度日变化形式,那么 CO<sub>2</sub> 浓度日变化形式不同对冠层光合作用是否会产生一定 影响?以日为积分步长的数值模式显然无法回答这一问题,因此本文利用以上建立的逐时积分 模式进行了数值分析。其他模拟背景与 BASE 状况保持一致,改变 CO<sub>2</sub> 浓度,将 CO<sub>2</sub> 浓度给定 了 4 种不同的日变化形式(图 7a),相对应的冠层光合作用日变化见图 7b。数值分析表明,即使 CO<sub>2</sub> 浓度的日平均值[CO<sub>2</sub>] 保持不变,但是由于 CO<sub>2</sub> 浓度日变化形式不同,最终导致冠层光合 速率日变化发生改变。图中*A* 为 CO<sub>2</sub> 浓度一直保持 660 × 10<sup>-6</sup>不变,这是目前以日为积分步长



图 6 CO<sub>2</sub>和温度同时变化对冠层光合作用影响的数值分析 a. 辐射日总量 *Q*= *Q*<sub>d</sub>×0.8; b. 辐射日总量 *Q*= *Q*<sub>d</sub>×0.9; c. 辐射日总量 *Q*= *Q*<sub>d</sub>×1.0; d. 辐射日总量 *Q*= *Q*<sub>d</sub>×1.1

Fig. 6 Numerical analysis of the integrated effects of CO2 and temperature on canopy photosynthesis under the condition of equal total daily radiation

a.  $Q_{d} \times 0.8$ ; b.  $Q_{d} \times 0.9$ ; c.  $Q_{d} \times 1.0$ ; d.  $Q_{d} \times 1.1$ 

的作物模式中所采用的模拟前提; *B* 则是本文中以上用到的 CO<sub>2</sub> 在 BASE 状况下逐时值均提 高 330 × 10<sup>-6</sup>的模拟背景。*A* 模拟背景下的冠层光合日总量为 82.7 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, *B* 模拟背景 下的冠层光合日总量为 82.4 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。这表明如果未来 CO<sub>2</sub> 浓度倍增状况下农田上方 CO<sub>2</sub> 日变化的 'U'形曲线的凹度不发生变化, 那么目前以日为积分步长的作物生长数值模式 在估算冠层光合日总量时数值仅略为偏大一些。但是, 如果农田上方 CO<sub>2</sub> 日变化的 'U'形曲线 凹度加大, 例如在 *C* 模拟背景下, 冠层光合日总量将减少为 80.5 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 而在 *D* 模拟背 景下的冠层光合日总量将减少至 78.7 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。这表明即使 CO<sub>2</sub> 日平均浓度[CO<sub>2</sub>]保持 不变, 但由于其日变化形式不同, 冠层光合日总量也将发生相应改变。因此, 从理论上讲, 目前 研究不仅要考虑准确预报未来 CO<sub>2</sub> 浓度的日平均值, 也要进一步研究未来气候状况下农田上 方的 CO<sub>2</sub> 浓度曲线的可能变化趋势。此外, 辐射和温度日变化不同同样会使冠层光合日总量 发生相应改变, 而目前 GCM s 模式尚没有详细考虑未来的这些气象要素的日变化过程。因此, 在预测未来气候对作物光合作用影响方面, 农业气象学界还存在很多的不确定性。

### 5 总 结

(1)利用美国 Licor 公司生产的 Licor-6200 便携式光合作用测定仪,对冬小麦叶片光合作 用速率进行了实际测定,并且同时测定了冬小麦株型结构参数。在实测数据支持下,建立了一 个同时包含 CO<sup>2</sup>、光、温因子在内的叶片光合作用模式,并利用 Ross 辐射分布方案建立了一个 冬小麦冠层逐时积分模式,模式具有较高的分辨率和准确度。





Fig. 7 Numerical analysis of the different diurnal variation of CO<sub>2</sub> on canopy photosynthesis a. diurnal variation of CO<sub>2</sub>; b; diurnal variation of canopy photosynthesis

(2) 单因子数值分析表明: 晴天状况下, 冠层光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而上升, 当 CO<sub>2</sub> 浓 度由 330×10<sup>-6</sup>上升至 660×10<sup>-6</sup>时, 冠层光合日总量可增加 19.7%; 冠层光合速率随辐射增 加而增大, 辐射量增加 10.0%, 冠层光合日总量可增加 6.7%; 在适宜温度之上, 冠层光合速 率随温度升高而下降, 温度升高 1, 冠层光合日总量减少 2.9%。多因子综合数值分析表 明: 在辐射量较大的气候背景下, 冠层光合日总量对温度和 CO<sub>2</sub> 变化响应更加敏感。

(3)农业气象数值敏感分析表明: CO<sub>2</sub>、辐射和温度日变化不同会使冠层光合日总量发生 相应改变,而目前 GCMs 模式尚没有详细考虑未来的这些气象要素的日变化过程,因此,在未 来预测气候变化对作物光合影响方面还存在一定的不确定性。此外,受目前研究所限,还无法 将所有因子均考虑进日变化过程。如何考虑这些因子的影响,提高气候变化对农业影响的预测 水平,值得进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] 金之庆. C3 与 C4 作物对大气 CO2 浓度增加的不同响应[J]. 世界农业, 1994, 8(4): 217-222.
- [2] 王馥棠. 气候变化对我国东部主要农业区粮食生产影响的模拟试验[C]//丁一汇. 环境和气候变化对中国的挑战. 北 京: 气象出版社, 1993.
- [3] 王石立. 气候变化对黄淮海地区冬小麦可能影响的模拟实验[C]//丁一汇. 中国气候变化对农业影响的试验与研究. 北 京: 气象出版社, 1991:58-65.
- [4] 高素华.大气中<sub>CO2</sub>含量增长后的温室效应对我国未来农业生产的可能影响[J].大气科学,1993,17(3):584-591.
- [5] 金之庆,方 娟, 葛道阔. 全球气候变暖影响我国冬小麦生产之前瞻[J]. 作物学报, 1993, 20(2): 186-197.
- [6] Ewert F. Simulation of growth and developprocesses of spring wheat in response to CO<sub>2</sub> and ozone for different sites in Europe using mechanistic crop simulation models[J]. J Agronomy, 1999, 10(2): 231-247.
- [7] Mall R K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. Evaluation of impact assessment models[J]. Climatic Change, 2002, 52(2): 315-330.
- [8] Porter J R. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT 2, CERES-Wheat and SWHEAT for nonlimiting conditions of crop growth [J]. Field Crop Research, 1993, 33(1): 131-157.
- [9] 刘建栋,王石立,于 强,等.CO2倍增对黄淮海气候生产力影响的数值模拟[J].自然灾害学报,2001,10(1):17-23.
- [10] 张 宇. 气候变暖对中国水稻生产可能影响的研究[J]. 气象学报, 1998, 56(3): 369-376.
- [11] 左大康. 地球表层辐射研究[M]. 北京:科学出版社, 1991: 96-223.
- [12] 刘建栋,周秀骥,于强.长江三角洲稻田生态系统综合增温潜势源汇交替的数值分析[J].中国科学(D辑),2003,33
   (2):105-113.

- [13] 刘建栋,周秀骥,于 强.长江三角洲稻田 CH4 及 N2O 排放规律的数值模拟[J].自然科学进展,2001,11(9):960-965.
- [14] Liu Jiandong, Zhou Xiuji, Zhang Yu. Numerical simulation of methane emissions from rice paddy fields in the Yangtze Delta of China[J]. Acta M eteor Sinica, 2001, 15(1): 1–11.
- [15] 刘建栋,周秀骥,于 强.O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> 浓度及太阳光谱变化对作物光合影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 715-721.
- [16] 刘建栋,周秀骥,于强.近地层大气臭氧对水稻光合作用影响的数值模拟研究[J].环境科学学报,2003,23(3):1-7.
- [17] 刘建栋,周秀骥,于 强.FAO 生产潜力模型中基本参数的修正[J].自然资源学报,2001,16(3):240-247.
- [18] 刘建栋,于 强,傅抱璞.黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究[J].自然资源学报,1999,14(2):169-174.
- [19] 刘建栋,于 强,吴乃元.大豆晴天群体光合作用农业气象数值模拟[J].应用气象学报,2001,12(1):14-20.
- [20] William J P.A model for diurnal variation in soil and air temperature[J]. Agricultural Meteorology, 1981, 23(3): 205– 216.
- [21] 蒙特思 JL. 植被与大气—原理[M]. 卢其尧译. 北京: 农业出版社, 1983: 15-67.
- [22] 冯秀藻. 农业气象原理[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 48-49.

# Numerical Simulation of the Impact of CO<sub>2</sub> and Temperature Changes on Crop Canopy Photosynthesis

LIU Jian-dong<sup>1</sup>, LIU Wen-quan<sup>1</sup>, YU Qiang<sup>2</sup>, JIN Zhi-qing<sup>3</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

Institute of Geographic Sciences and Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
 Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The leaf photosynthesis of LU-MAI 23 is measured with Licor-6200 Portable Photosynthesis Analyzer, and the curves of leaf photosynthesis response to CO<sub>2</sub> and radiation are determined. Based on these measurements, a leaf photosynthesis model is established, then the leaf model is scaled up to a winter wheat canopy photosynthesis model of simultaneous time scale and leaf surface spatial scale, which can simulate the canopy photosynthesis accurately. Results of the numerical simulation show that (1) on a fine day, the canopy photosynthesis increases with CO2 enhancement, and the daily total photosynthesis will increase by 19.7 % when the  $CO_2$  concentration increases from  $330 \times$  $10^{-6}$  to  $660 \times 10^{-6}$ ; (2) the canopy photosynthesis increases with radiation enhancement, and the daily total photosynthesis will increase by 6.7 % when the radiation increases by 10. 0%; (3) the canopy photosynthesis decreases with temperature increasing, and the daily total photosynthesis will decrease by about 2.9% when the temperature increases 1 • T he comprehensive numerical analysis indicates that the total daily canopy photosynthesis will become more sensitive to the variation of CO2 and temperature under stronger radiation conditions.

Key words: CO<sub>2</sub> concentration; temperature; crop canopy photosynthesis; numerical simulation

10