

O₃, CO₂ 浓度及太阳光谱变化对作物光合作用影响的数值模拟研究*

刘建栋

周秀骥

于强

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

(中国科学院地理研究所, 北京, 100101)

摘 要

对光合作用-蒸腾作用-气孔调节进行耦合, 从生物化学尺度扩展至冠层尺度, 发展了一个冬小麦冠层光合作用生态动力模式, 模式考虑了 O₃, CO₂ 和光谱变化对作物光合的综合影响。利用美国光合作用实测资料对模式进行验证, 叶片模式通过了相关显著性检验并具有较高的准确度。数值分析表明: 当 O₃ 浓度由 $0 \times 10^{-9} \text{V/V}$ 上升至 $200 \times 10^{-9} \text{V/V}$ 时, 冠层光合速率下降 29% 左右; 当 CO₂ 浓度由 $330 \times 10^{-6} \text{V/V}$ 上升至 $660 \times 10^{-6} \text{V/V}$ 时, 冠层光合速率增加大约 37%; 当光谱比例系数由目前的 0.5 下降至 0.4 时, 冠层光合速率将下降 27% 左右。对于污染严重、易发生光化学烟雾的城郊附近, 在阳光强烈的典型晴天, 中午 O₃ 浓度达到 $200 \times 10^{-9} \text{V/V}$ 时, 即使气候条件不发生改变, CO₂ 浓度对作物光合作用的正效应也不足以弥补 O₃ 浓度升高所造成的负效应, 冠层光合速率将比目前干洁地区略有下降, 如果进一步考虑光合作用有效辐射光谱成分下降至 0.4 左右, 冠层光合作用将比目前的 BASE 值下降 35% 左右。

关键词: O₃, CO₂, 太阳光谱, 光合作用, 数值模拟。

1 引 言

人类活动和工业的迅速发展对全球大气环境产生了重大影响, 大气中 CO₂ 浓度已由工业革命前的 $(275 \pm 10) \times 10^{-6} \text{V/V}$ 上升到目前的 $350 \times 10^{-6} \text{V/V}$, 并且目前其浓度仍然保持持续增长的势头^[1]。此外, 虽然 O₃ 在低层大气中的本底浓度仅为 $0 \sim 50 \times 10^{-9} \text{V/V}$ 左右, 但由于工业污染引起的大气化学反应, 导致城市附近 O₃ 在低层大气中含量增加, 污染严重、易发生光化学烟雾的城郊附近, 阳光强烈的典型晴天光化学反应随太阳辐射增加而加强, 在中午时刻瞬时 O₃ 浓度可达到 $200 \times 10^{-9} \text{V/V}$ 左右^[2]。工业污染导致温室气体增加的同时, 大气成分也发生了一定改变, 使到达地面的太阳光谱成分发生了相应变化^[3]。

大气平流层 O₃ 的减少对人类及陆地生态系统带来严重影响已经成为共识^[4], 近年来, 科学界又逐渐认识到近地层大气中由于工业污染导致的 O₃

增加可能对陆地植物产生很大危害^[5-8]。CO₂ 是重要的温室气体, 其浓度升高使全球气候变暖, 间接影响作物光合作用的同时, 由于其本身是光合作用的底物, 因此其浓度改变还会直接影响作物光合过程。光谱变化则会影响到太阳辐射中的光合有效辐射量, 进而直接影响到作物光合作用过程^[9]。目前, CO₂, O₃ 浓度和太阳光谱改变对作物光合作用及产量影响已经成为重要研究课题, 普遍受到众多科研部门和政府机构的日益重视。

众多学者曾就 CO₂ 和 O₃ 浓度升高以及光谱成分变化对作物的可能影响进行了大量研究, 但均是针对某一方面所进行的^[10-13]。其中统计模式不能考虑 CO₂, O₃ 等温室气体对作物的直接影响^[10]; 采用开顶式气室进行单因子试验取得了大量研究成果^[11-13]。但是, 迄今为止还没有 O₃, CO₂ 浓度和光谱变化对作物光合作用综合影响的研究报告, 因作物光合作用过程确实受到该 3 种因子的综合影响, 因此, 本文建立了一个具有较强机理和较高准确度

* 初稿时间: 2000 年 6 月 19 日; 修改稿时间: 2001 年 7 月 16 日。

资助课题: 由国家自然科学基金重大项目(49899270), 中国科学院“百人计划”及中国气象科学研究院博士后基金项目。

的晴天冬小麦光合作用数值模式, 利用模式进行敏感性分析, 以期较为全面地揭示不同因子对作物冠层光合作用的影响程度。

2 模型的建立

2.1 冠层微气象因子的推算

2.1.1 辐射传输

对于典型晴天, 一天中任一时刻直接辐射 $S(\omega)$ 和散射辐射 $D(\omega)$ 可表示为^[14~16]

$$S(\omega) = \pi(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \cdot \int_0^{\tau} \omega_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_0 J^{-1} \cdot S \quad (1)$$

$$D(\omega) = \pi(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \cdot \int_0^{\tau} \omega_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_0 J^{-1} \cdot D \quad (2)$$

式中 ϕ 为地理纬度; ω 为时角; $\omega_0 = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ 为日没时角; τ 为日长; S 为直接辐射日总量; D 为散射辐射日总量; δ 为赤纬。此时, 直接光合有效辐射 $S^*(\omega)$ 及散射光合有效辐射 $D^*(\omega)$ 可表示为

$$S^*(\omega) = \tau S(\omega) \quad (3)$$

$$D^*(\omega) = \tau D(\omega) \quad (4)$$

在太阳光线 n_s 方向上 G 函数可以表示为^[17]

$$G(n_s) = G(h, A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d \int_0^{\pi/2} g(\theta_L, \Phi_L) \cdot |\cos n_s n_L| \sin \theta_L d\theta_L \quad (5)$$

式中 h 为太阳高度角, A 为太阳方位角, $g(\theta_L, \Phi_L)$ 为叶方位角为 Φ_L , 叶倾角为 θ_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, 直射光穿透函数 $\tau_s(L, n_s)$ 和散射光穿透函数 $\tau_d(L)$ 为

$$\tau_s(L, n_s) = e^{-L \cdot \frac{G(n_s)}{\sin h}} \quad (6)$$

$$\tau_d(L) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_s(L, n) \cos \theta \sin \theta d\theta d \quad (7)$$

其中 $\tau_s(L, n)$ 为倾角 θ 和方位角 Φ 所决定矢量方向的透过函数。累积叶面积指数 $L-1 \sim L$ 层次内、倾角为 θ_L 、方位角为 Φ_L 叶片上的直接光合有效辐射为

$$S^*(L-1, \theta_L, \Phi_L) = \frac{S^*(L-1, n_s)}{\sin h} \cdot |\cos n_s n_L| \quad (8)$$

在太阳高度角 h , 方位角为 A 时, 考虑了一次散射过程后的累积叶面积指数 L 处水平面散射光

合有效辐射强度为

$$D^*(L) = D^*(\omega) \tau_u + \frac{Q^*(\omega) \sigma^* K (e^{-KL} - e^{-L})}{1-K} \quad (9)$$

式中 $\sigma^* = (\rho^* + \tau^*)/2$, 其中 ρ^* 为叶片光合有效辐射反射系数, τ^* 为叶片光合有效辐射透射系数, 根据各向同性的辐射理论, 在累积叶面积指数 $L-1 \sim L$ 层次内、倾角为 θ_L 、方位角为 Φ_L 的叶片接收到的散射辐射量与叶方位角无关, 可以表达为

$$D^*(L-1 \sim L, \theta_L, \Phi_L) = D^*(L-1) \cdot \frac{(1 + \cos \theta_L)}{2} \quad (10)$$

2.1.2 叶片风速的计算

农田植被中平均风速的通用模式^[18]

$$U = U_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} [a e^{-k n f} + \beta(1-f)] \quad (11)$$

式中 H 为植株高度; z_0 为粗糙度, 可取值为 $z_0 = 0.13H$; U_H 为植株高度 H 处的风速; n 为由边行向里的行数; f 为相对叶面积函数; a, β, k 为系数, 相应取值为 0.74, 0.26 和 2.78^[18]。

2.2 叶片光合作用模型

Ball 认为气孔导度 g_s 是叶面湿度 (h_s), CO_2 浓度 (C_s) 和光合速率 (P_n) 的函数, 可表示为

$$g_s = a \frac{P_n \cdot h_s}{C_s} + g_0 \quad (12)$$

式中 a, g_s 为系数。Leuning 使用饱和水汽压差 e 取代 h_s , 从而修正了 Ball-Berry 模型^[19~21]

$$g_s = a \frac{P_n}{(C_s - \Gamma)(1 + e/e_0)} + g_0 \quad (13)$$

式中 Γ 为 CO_2 补偿点。由于

$$C_i = C_s - P_n/g_s \quad (14)$$

所以 g_0 必然是一个接近 0 的常数, 因而可以得到

$$C_i = C_s - 1/a(C_s - \Gamma)(1 + e/e_0) \quad (15)$$

光合作用与光强的表达式为非直角双曲线方程

$$\theta P^2 - P(\alpha I + P_{max}) + \alpha P_{max} = 0 \quad (16)$$

式中 P 为总光合作用速率; θ 为凸度; α 为初始光合作用效率; P_{max} 为最大光合作用速率。 P 的合理解为

$$P = \frac{1}{2\theta} [\alpha I + P_{max} - \sqrt{(\alpha I + P_{max})^2 - 4\theta(\alpha P_{max})}] \quad (17)$$

于是可得到净光合作用速率

$$P_n = P - R_d \quad (18)$$

初始光合作用效率受 CO_2 浓度影响

$$\alpha = \alpha_0 (C_i - \Gamma) / (C_i + 2\Gamma) \quad (19)$$

式中 α_0 为 CO₂ 同化的内禀量子效率; 最大光合作用速率主要受到 Rubisco 限制, 与 CO₂ 浓度和温度有关

$$P_{\max} = V_m (C_i - \Gamma) / (C_i + C) \quad (20)$$

V_m 为单位面积叶面上的 Rubisco 最大催化能力; C 是 Rubisco 反应中与 CO₂ 和 O₂ 的米氏反应曲线有关的参数, 这里假设为常数。 V_m 依赖于温度

$$V_m = \frac{V_{m0}}{1 + e^{\frac{-a+bT}{RT}}} \quad (21)$$

式中 a, b 为参数; R 为理想气体常数。暗呼吸与 V_m 成正比例关系; 可表示为

$$Rd = kV_m \quad (22)$$

考虑到 P_n 受 O₃ 的影响, 叶片净光合作用速率 P_j 为

$$P_j = P_n \times \zeta(O_3) \quad (23)$$

式中 P_j 为 O₃ 订正后的叶片光合作用速率; $\zeta(O_3)$ 为 O₃ 对光合作用影响的 0~1 化函数, 据实测资料可表示为

$$\zeta(O_3) = \left[\frac{A_1 - A_2}{1 + ([O_3]/[O_3b])^p} + A_2 \right] / A_1 \quad (24)$$

式中 $[O_3]$ 为 O₃ 浓度, $A_1, A_2, [O_3b]$ 和 p 为模型参数。

2.3 冠层光合作用模型

由微气象模式可以得到累积叶面积指数 L 处叶片上的风速 u , 该叶片边界层阻力 r_b 可以表示为

$$r_b = 100 \frac{0.13 \sqrt{w/u}}{L} \quad (25)$$

式中 w 为叶片的平均宽度。叶片周围空气中的 CO₂ 浓度为 C_a , 则叶面上的 CO₂ 浓度 C_s 可以表示为

$$P_j = \frac{C_a - C_s}{r_c} \quad (26)$$

式中 r_c 为叶面 CO₂ 边界层阻力, 由水分子及二氧化碳分子量比值可知 $r_c = 1.6 r_b$ 。

将式(17)~(26)联立, 即可得到此时叶片上关于 C_s 和 C_i 两个变量的方程, 而式(15)也是一个关于 C_s 和 C_i 两变量的方程, 联立方程组, 即可得到此时叶片表面的 CO₂ 浓度 C_s 和气孔内 CO₂ 浓度 C_i , 反代入公式中, 即可求出此时叶面积深度 L 处叶片光合作用 P_j , 显然 P_j 受到 CO₂ 浓度、太阳辐射强度、太阳光谱成分、温度、湿度、风速的综合影响。任一冠层光合作用是不同叶面积深度处每个叶片光合作用速率的积分

$$P_z(\omega) = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P_j(\omega, L, \theta_L, L) \cdot P(L, \theta_L, L) d\theta_L dL dL \quad (27)$$

对光合速率积分的离散形式可表示为

$$P_z(\omega) = \sum_{L=1}^{I_{LA}} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^8 P_j(\omega, L, \theta_{L_i}, L_j) \cdot P(L, \theta_{L_i}, L_j) \Delta\theta_{L_i} \Delta L_j \Delta L \quad (28)$$

$$I_{LA} = \text{INT}(LAI) + 1$$

3 参数确定及叶片模型的验证

3.1 参数确定

1999年4月于冬小麦拔节期在中国科学院禹城综合试验站对 Lysimeter 试验区冬小麦进行了形态及光合测定, 首先确定冬小麦倾角叶面积分布密度以及不同高度处的累积叶面积指数(表1), 然后利用美国 CID 公司生产的 CI-301PS 便携式光合测定仪, 测定叶片光合速率和相应气象环境要素, 用试射法得到叶片模型参数为: $V_0 = 140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $Q_{10} = 2.4$; $k = 0.034$; $a_1 = 220000 \text{ kJ}/\text{mol}$; $b_1 = 703 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; $e_0 = 1500 \text{ Pa}$; $\Gamma = 50 \text{ mol}/\text{mol}$; $C = 100 \mu\text{mol}/\text{mol}$; $a_0 = 0.08$; $\theta = 0.55$ 。O₃ 浓度增加对作物的影响采用了开顶式气室实验资料, 利用数天平均资料确定出 O₃ 浓度对冬小麦叶片光合作用影响模型参数为: $A_1 = 17.9$, $A_2 = 8.7$, $[O_3b] = 141.6$, $p = 1.7$ 。

3.2 叶片模型的验证

表1 冬小麦倾角叶面积分布密度(禹城, 1999年4月12日)

高度(cm)	叶面积深度	叶倾角区间(°)								
		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90
45~40	0~0.125	0.00	0.00	0.04	0.08	0.08	0.12	0.16	0.28	0.24
45~30	0~0.975	0.00	0.00	0.03	0.07	0.06	0.16	0.19	0.27	0.22
45~20	0~2.325	0.02	0.03	0.04	0.09	0.05	0.14	0.17	0.25	0.21
45~10	0~3.525	0.04	0.07	0.09	0.07	0.05	0.11	0.14	0.23	0.20
45~0	0~3.975	0.06	0.08	0.07	0.09	0.06	0.10	0.12	0.22	0.20

图 1 是冬小麦叶片光合速率模拟值与实测值的比较, 总体来看模拟值与实测值的趋势是相当一致的, 散点位于 1:1 对角线两侧。从模拟值与实测值的线性相关关系看, 直线斜率为 0.991, 接近 1, 截距为 -0.036, 接近 0。432 个样本的相关系数为 0.893, 通过了 0.001 的相关显著性检验, 说明叶片模型可以较为准确地模拟叶片光合速率值。

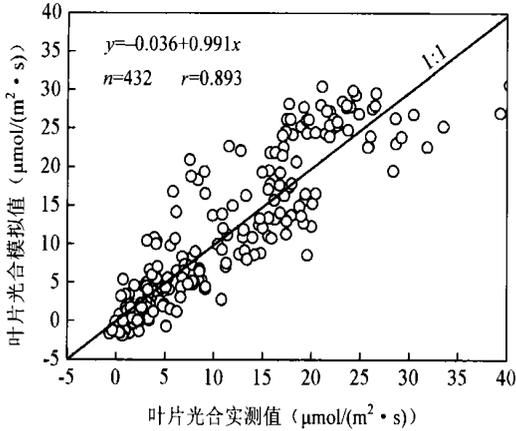


图 1 叶片光合模型的验证

4 O_3 , CO_2 及光谱变化对冠层光合影响的数值分析

O_3 , CO_2 浓度, 以及光谱、温度、水分、风速对作物光合影响非常复杂, 目前还没有仪器可以在大田环境下区分光合作用差异究竟由何种因子所引起。换言之, 现在还难以进行大田状况下的多因子综合试验。本文所建立的冠层光合作用模型, 其叶片子模型得到了 CID 仪器的精确验证, 在叶片到冠层的空间尺度转换过程中, 具有明确的理论推导过程, 运用此模式进行数值试验, 可以揭示出 O_3 , CO_2 等单因子或多因子对冠层光合作用的影响状况。

考虑到影响冠层光合作用的因子很多, 首先规定了模拟背景 (BASE) 值: 模拟地点为中国科学院禹城综合试验站 ($36^{\circ}50'N$, $116^{\circ}40'E$), 时间为 4 月 12 日, 与拔节期相对应。假定当日为典型晴天, 直接辐射日总量为 $12 MJ/m^2$, 散射辐射日总量为 $4 MJ/m^2$ 。对中午冠层光合作用进行数值分析, 设此时 O_3 浓度为 $40 \times 10^{-9} V/V$, CO_2 浓度为 $330 \times 10^{-6} V/V$, 直接辐射中光合有效辐射在光谱中所占比例 η_0 等于 0.42, 散射辐射中光合有效辐射在光谱中所占比例 λ_0 为 0.56, 温度值为 $25^{\circ}C$, 水汽压为 800 hPa, 小麦上方风速 $u = 3 m/s$ 。

4.1 单因子影响

保持 BASE 值不变, 分别改变 O_3 , CO_2 以及光谱成分中光合有效辐射所占百分比。在改变光谱成分时, η 和 λ 并不等, 并且两者间的关系较为复杂, 但左大康等^[22]的研究表明大多数情况下两者以同向变化为主, 所以定义光谱比例系数 B : $\eta = \eta_0 \times B / 0.5$; $\lambda = \lambda_0 \times B / 0.5$ 。由此定义可以看出: B 为 0.5 时光合有效辐射在光谱中的比例等于 BASE 值; 在进行数值分析时, B 取值为 0.4~0.6, 以符合两者的实际可能变化范围。

单因子数值分析表明 (图 2): 冠层光合随 O_3 浓度升高而下降, 在 $0 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9} V/V$ 范围内, 冠层光合下降较为缓慢, 但在 $40 \times 10^{-9} \sim 140 \times 10^{-9} V/V$ 范围内, 冠层光合随 O_3 浓度升高迅速下降, 基本呈一种直线下降的形式, 随着 O_3 浓度的进一步增加, 冠层光合下降速度趋于平缓, 当 O_3 由 $0 V/V$ 上升至 $200 \times 10^{-9} V/V$ 时, 冠层光合速率由 $6.8 g/(m^2 \cdot h)$ 下降至 $4.8 g/(m^2 \cdot h)$ 。冠层光合速率随 CO_2 浓度升高而加大, 但是增加的速率随 CO_2 浓度升高而明显降低, 在 $330 \times 10^{-6} \sim 660 \times 10^{-6}$

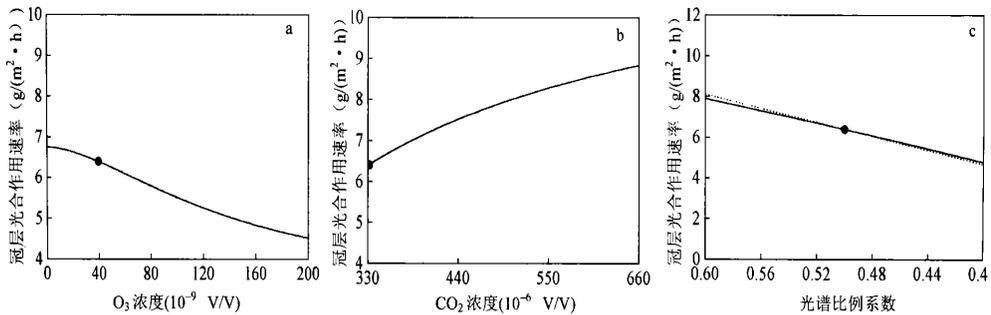


图 2 O_3 , CO_2 及光谱变化对冠层光合的单因子影响 (图中●对应于 BASE 值)

(a. O_3 浓度对光合的影响, b. CO_2 浓度对光合的影响, c. 光谱比例系数对光合的影响)

V/V 区间, 冠层光合作用速率由 $6.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上升至 $8.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。冠层光合速率随光谱比例系数下降而迅速下降, 图 2c 中虚线是穿过曲线中光谱比例系数为 0.4 和 0.6 两个点的一条直线, 比较可见: 当光谱比例系数由 0.6 下降至 0.4 时, 冠层光合速率随光谱比例系数减少而下降, 基本是一种线性关系; 当光谱比例系数由 0.5 上升至 0.6 时, 冠层光合速率随光谱加大而增加, 但增加幅度略小于线性增加。

4.2 多因子综合影响

图 3 综合考虑了光谱比例系数、O₃ 浓度和 CO₂ 浓度 3 者之间的综合影响。图 3b 是光谱比例系数为 0.5 时 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对冠层光合影响的状况, 光谱比例系数为 0.5 对应于目前的光谱 BASE 值。图中表明: 冠层光合速率随 O₃ 浓度增加而减

小, 随 CO₂ 浓度升高而加大, 变化幅度在 $5.0 \sim 9.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间, 高值比低值增加了近 1 倍。O₃ 浓度为 $40 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ 和 CO₂ 浓度为 $330 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 对应于当前冠层光合速率的 BASE 值, 为 $6.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。当 O₃ 浓度上升至 $200 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ 同时 CO₂ 浓度上升至 $660 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 时, 冠层光合速率在 $6.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右, O₃ 浓度升高对光合的负效应影响了 CO₂ 升高的正效应, 这与上述单因子分析结论并不矛盾, 在两者的综合影响中, 由于耦合效应的原因, 对冠层光合而言 O₃ 比 CO₂ 的影响可能更大一些, 不能理解为综合影响是单因子影响的简单叠加。如果进一步考虑光谱的变化, 那么对应于 $200 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ 的 O₃ 浓度、 $660 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 的 CO₂ 浓度和 0.4 的光谱比例系数, 冠层光合速率为 $4.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右, 将比目前 BASE 值下降 35% 左右。

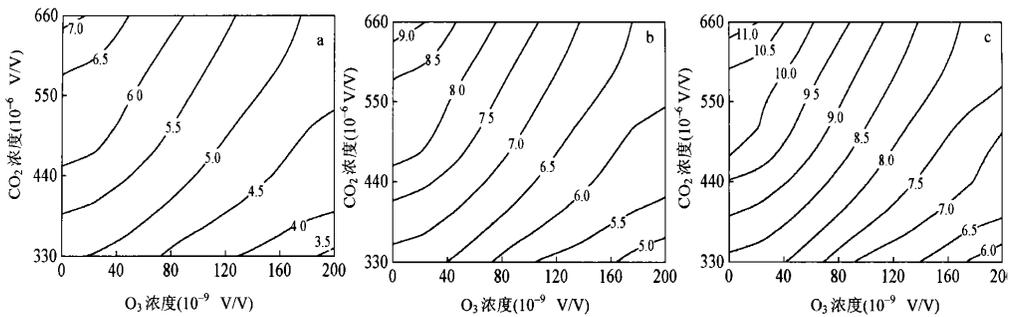


图 3 O₃, CO₂ 及光谱变化对冠层光合的多因子综合影响

(a. 光谱比例系数= 0.4, b. 光谱比例系数= 0.5, c. 光谱比例系数= 0.6)

数值结果(图 3b) 还表明: 当 O₃ 在 $40 \times 10^{-9} \sim 160 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ 范围内发生变化时, CO₂ 浓度对冠层光合速率影响非常明显, 并且影响程度比较均匀。当 O₃ 浓度较低($0 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9} \text{ V/V}$) 或较高($160 \times 10^{-9} \sim 200 \times 10^{-9} \text{ V/V}$) 时, CO₂ 浓度升高对冠层光合影响程度不同: 当 O₃ 浓度较低时($0 \sim 40 \times 10^{-9} \text{ V/V}$), 当 CO₂ 浓度由 $330 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 上升至 $450 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 时, 冠层光合速率随 CO₂ 浓度迅速升高; 但是当 CO₂ 浓度达到 $450 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 后, 冠层光合速率随 CO₂ 浓度升高而增加的速度明显变小, 在大约 $450 \times 10^{-6} \sim 580 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 范围内, 光合速率随 CO₂ 浓度增加而升高的速率几乎下降了 1 倍; 随着 CO₂ 浓度的进一步升高, 当 CO₂ 浓度大于 $580 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 后, 冠层光合随 CO₂ 浓度升高而增加的速度与 $(330 \sim 450) \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 范围内相

当。当 O₃ 浓度较高时($160 \times 10^{-9} \sim 200 \times 10^{-9} \text{ V/V}$), 在 CO₂ 浓度由 $330 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 上升至大约 $400 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 过程中, 冠层光合速率随 CO₂ 浓度升高增加较快, 但超过 $400 \times 10^{-6} \text{ V/V}$ 以后, 冠层光合随 CO₂ 浓度升高而增加的程度明显减小。换言之, 当 O₃ 浓度达到 $200 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ 左右时, CO₂ 浓度一旦超过 $400 \times 10^{-6} \text{ V/V}$, 其正效应将明显减弱。比较图 3a, b, c 可以看出: 光谱比例系数的变化只是改变了 O₃ 和 CO₂ 对冠层光合的影响程度, 但没有改变 O₃ 和 CO₂ 对冠层光合影响的大体趋势。当光谱比例系数较大时, 冠层光合速率对 O₃ 和 CO₂ 浓度改变更加敏感。

用开顶式气室进行的 CO₂ 浓度增加对作物影响的实验, 得到的结论是 CO₂ 浓度升高对作物光合作用影响非常大, 即不考虑气候变化时, 由于 CO₂ 的直接作用, 作物产量将得以大幅度提高。由本文以上

研究发现:即使不考虑气候变化对作物的间接影响,在温度、湿度等仍保持在最佳状态时,如果未来光谱比例系数下降到 0.4 左右,由于工业污染引起的 O_3 浓度升高, CO_2 的对作物光合的正效应将被严重削弱。

5 结论与讨论

(1) 本文发展了一个基于生物化学基础之上的冬小麦冠层光合农业气象数值模式,模式充分考虑了气孔调节对作物光合作用的影响,较为合理地将 O_3 、 CO_2 以及光谱变化与作物光合作用进行了耦合,由叶片向冠层空间尺度转换中首次考虑了株型结构对光合的影响,具有精细的空间尺度分辨率和较高的模拟准确度。模式中的参数全部采用了黄淮海地区的实测资料,为进一步研究 O_3 、 CO_2 对作物光合作用的可能影响提供了较为丰富的模型参数。本文基础上加入发育阶段、干物质分配等子模式,可以形成具有较强机理的作物综合模式,以期未来对 O_3 、 CO_2 和光谱变化对陆地生态综合影响进行较为客观的评估。

(2) 单因子数值分析表明:冠层光合作用速率随 O_3 浓度升高而降低,由 $40 \times 10^{-9} V/V$ 时,冠层光合作用速率下降 29% 左右。冠层光合作用速率随 CO_2 上升而增加,当 CO_2 浓度由 $330 \times$

$10^{-6} V/V$ 上升至 $660 \times 10^{-6} V/V$ 时,冠层光合作用速率增加大约 37%。冠层光合作用速率随光谱比例系数减小基本呈线性下降的趋势,当光谱比例系数由目前的 0.5 下降至 0.4 时,冠层光合作用速率下降 27% 左右。

(3) 由本文的多因子数值分析结果可以推断:对于远离城市、大气污染程度较小的农村干洁地区,典型晴天中午 O_3 浓度达到 $50 \times 10^{-9} V/V$ 时,冠层光合作用随 CO_2 浓度升高迅速升高, CO_2 对作物光合作用的正效应比较明显;但是对于污染严重、易发生光化学烟雾的城郊附近,在阳光强烈的典型晴天,中午 O_3 浓度达到 $200 \times 10^{-9} V/V$ 时,即使 CO_2 浓度增加一倍,其对作物光合作用的正效应不足以弥补 O_3 浓度升高所造成的负效应,冠层光合作用速率将比目前 CO_2 浓度干洁地区 (O_3 浓度为 $40 \times 10^{-9} V/V$) 略有下降。如果进一步考虑光谱成分下降至 0.4 左右,在 O_3 浓度达到 $200 \times 10^{-9} V/V$ 时, CO_2 倍增的背景下,即使气候背景不发生改变,冠层光合作用比目前的 BASE 值仍将下降 35% 左右。

(4) 由于气候变化的不确定性,本文仅就气候背景不发生变异的情况进行了数值分析,即仅着重考虑了 O_3 、 CO_2 变化对作物光合作用的直接影响。在本文研究基础上,进一步加入气候变化背景,将会更全面地揭示出未来温室气体变化对作物光合作用的综合影响状况。

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change. Cambridge University Press, 1995. 11~ 17
- 2 Chamecides W L. Growth of continental scale meteor-agre-plexes regional ozone pollution and world food production. Science, 1994, 264: 74~ 77
- 3 卞林根, 陆龙骅. 南极中山站外辐射的初步研究. 科学通报, 1996, 41(9): 805~ 807
- 4 周秀骥, 罗超, 李维亮. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报, 1995, 40(15): 1396~ 1398
- 5 Krupa S V. Ambient ozone and crop loss: Establishing a causeeffect relationship. Environ pollut, 1994, 83: 269~ 276
- 6 Heck W W, Adams R M. A reassessment of crop loss from ozone. Environ Sci Tech, 1983, 17: 572
- 7 Heck W W. Assessing impacts of ozone on agricultural crops II: Crop yield functions and alternative exposure statistics. J Air Pollut Control Assn, 1984, 34: 840
- 8 Kobayashi K. Modeling the effects of ozone on soybean growth and yield. Environ Pollut, 1990, 65: 33
- 9 冯秀藻, 陶炳炎. 农业气象学原理. 北京: 气象出版社, 1991. 28~ 60
- 10 王石立, 王馥棠. 气候变暖对黄淮海地区小麦产量可能影响的模拟试验. 气象学报, 1993, 51(2): 209~ 216
- 11 王春乙, 潘亚茹, 白月明. CO_2 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究. 气象学报, 1997, 55(1): 86~ 94
- 12 Cure J D. Crop responses to CO_2 doubling: A literature survey. Agri Forest Meteor, 1986, 38: 127~ 145
- 13 王春乙, 郭建平, 白月明等. O_3 浓度增加对冬小麦影响的试验研究. 气象学报, 2002, 60(2): 238~ 242
- 14 于强, 王天铎, 刘建栋. 玉米株型与冠层光合作用的数学模拟研究. 作物学报, 1998, 24(1): 7~ 15

- 15 刘建栋, 于强, 傅抱璞. 黄淮海地区冬小麦光温生产力数值模拟研究. 自然资源学报, 1999, 14(2): 169~ 174
- 16 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. 应用气象学报, 2001, 12(1): 14~ 20
- 17 Ross J. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. W Junk, The Hague, 1981. 20~ 110
- 18 傅抱璞, 翁笃鸣, 虞静明等. 小气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 388~ 392
- 19 Yu Qiang, Liu Jiandong, Luo Yi. Applicability of some stomatal models to natural conditions. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(2): 203~ 206
- 20 于强, 任保华, 王天铎等. C₃ 植物光合作用日变化的模拟. 大气科学, 1998, 22(6): 867~ 879
- 21 Sellers P J. A revised land surface parameterization(SiB2) for atmospheric GCMs. Part I : Model formulation. J Climate, 1996, 9: 676~ 705
- 22 左大康, 周允华, 项月琴等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991. 189~ 202

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF O₃, CO₂ AND SPECTRUM VARIATION ON THE PHOTOSYNTHESIS OF CROP CANOPY

Liu Jiandong Zhou Xiuji

Yu Qiang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081) (Institute of Geography, CAS, Beijing 100101)

Abstract

A leaf model was established for simulating photosynthesis of winter wheat based on characteristics of physiological ecology of plant, and then a canopy photosynthesis model was scrolled up from the leaf model. The influence of CO₂, O₃ and spectrum variation on canopy photosynthesis was fully considered in the model. Validation of the leaf model showed that the model could simulate photosynthesis rate of winter wheat in field fairly well. The simulation result by using the model indicated that: (a) When the concentration of O₃ increased from $0 \times 10^{-9} \text{V/V}$ to $200 \times 10^{-9} \text{V/V}$, the canopy photosynthesis will decrease about 29% in contrast with the base value. The canopy photosynthesis will enhance about 37% when the concentration of CO₂ changed from $330 \times 10^{-6} \text{V/V}$ to $660 \times 10^{-6} \text{V/V}$. The canopy photosynthesis declined with the debasement of spectrum coefficient according to the linear relation, which reduced about 27% with the spectrum coefficient varied from 0.5 to 0.4. (b) The canopy photosynthesis will be reduced about 35% in suburb, when the spectrum coefficient reduced to 0.4 and the concentration of O₃ increased to $200 \times 10^{-9} \text{V/V}$, even with a doubled CO₂ concentration and un-changed climatic scenarios.

Key words: O₃, CO₂, Spectrum, Photosynthesis, Numerical simulation.