

近地层大气臭氧对作物光合作用 影响的数值模拟研究^{*}

刘建栋¹⁾ 周秀骥¹⁾ 于 强²⁾ 颜 鹏¹⁾ 郭建平¹⁾ 丁国安¹⁾

1) (中国气象科学研究院, 北京 100081)
2) (中国科学院地理与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 近地层 O₃ 浓度增加对作物光合产生不利影响, 因此, 利用 TE-49C 型臭氧自动观测仪对常熟农田上方 O₃ 浓度进行了逐时测定, 同时利用 OTC-1 型农田开顶式气室, 测定了不同 O₃ 浓度对冬小麦叶片光合作用的影响。在此基础上, 首次建立了 O₃ 对冬小麦光合作用影响的数值机理模式, 模式分辨率达到瞬时时间尺度, 空间积分采用 Ross 方案, 具有较高分辨率和准确度。对 O₃ 浓度观测表明: O₃ 浓度逐时值变化在 $0 \sim 160 \times 10^{-9}$ 之间, 相比之下日平均值变化较小, 仅在 $5 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$ 之内; 长江中下游地区农田上方 O₃ 存在三种典型日变化形式: 高浓度单峰型、高浓度多峰型和低浓度平缓型。数值分析表明: 全晴天状况下高浓度单峰型对光合作用日总量影响最大。数值敏感分析表明: O₃ 浓度和辐射同步变化时, 随着日总辐射量的加大, 臭氧浓度增加对光合作用的影响程度逐渐加强。全生育期积分表明: 水肥适宜时, 由于 O₃ 影响冬小麦光合总损失量约为 9.22%。

关键词: 臭氧; 作物; 光合作用; 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0059-10 **中图分类号** P42 **文献标识码** A

1 引言

平流层 O₃ 浓度减少成为目前科学界所关注的重要科学问题, 其中南极臭氧空洞^[1]以及青藏高原臭氧低值中心^[2]的发现引起国际科学界的极大关注, 并加速了对全球不同区域臭氧总量及其垂直廓线的监测。平流层 O₃ 浓度不断减少的同时, 由于工业的迅猛发展, 大量工业排放物经一系列光化学反应生成 O₃, 致使近年来近地层 O₃ 浓度有不断增加的趋势^[3, 4]。自从 1944 年美国洛杉矶首次发现叶片伤害是由于光化学烟雾引起以来, 近地层 O₃ 对农作物生长发育和产量形成的影响和危害引起科学界的高度重视, 并成为急需解决的重要课题^[5]。

Heck 等^[6]首先用实验手段研究了不同浓度 O₃ 对农作物的可能影响, 王春乙^[7]和郭建平等^[8]利用 OTC-1 型开顶式气室测定了不同 O₃ 浓度下不同作物叶片光合及产量的损失状况。开顶式气室只能测定恒定浓度 O₃ 对作物光合及产量的影响, 实际大田中 O₃ 浓度季节变化及日变化非常复杂^[9], 然而迄今为止尚无法采用实验手段直接测定实际大

2002-04-02 收到, 2002-09-02 收到再改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49899270、40233034、中日合作项目“长江三角洲人类活动对生态系统的胁迫效应及响应机制”和中国科学院“百人计划”项目共同资助

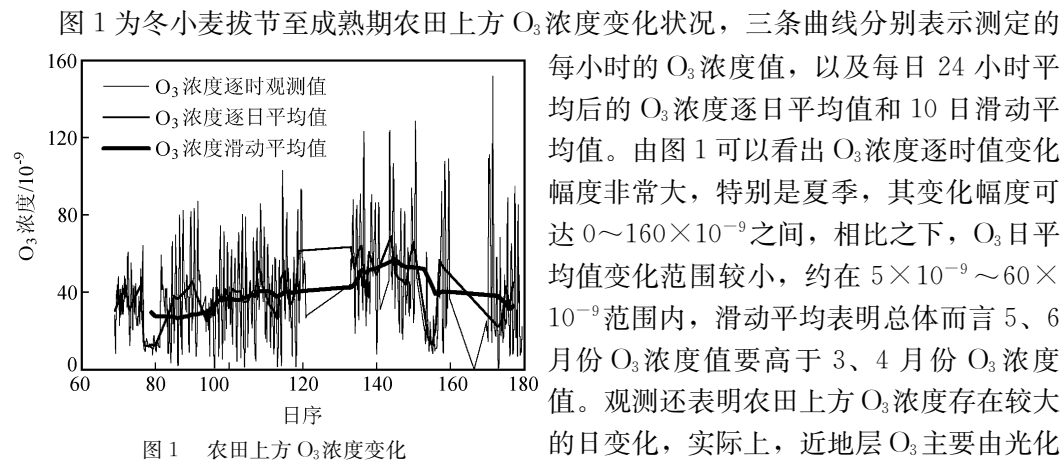
田状况下的 O₃对农作物的影响状况。因此，有必要利用实验与数值模拟相结合的方法，揭示中国典型城乡复合带农田上方 O₃浓度变化及其对作物光合作用的影响规律，为实现区域经济可持续发展提供重要科学依据。

本研究利用 TE-49C 型臭氧自动观测仪对长江三角洲地区常熟近郊农田上方 O₃进行了长期观测，并利用 OCT-1 型开顶式气室确定了 O₃对冬小麦叶片光合作用影响函数，在大量实测基础上，结合气候生态模拟理论，建立了 O₃对冬小麦影响的逐时积分数值模型，揭示了长江三角洲地区城乡复合带农田上方 O₃变化规律，并利用数值分析首次揭示了不同的 O₃浓度日变化过程对作物光合作用的影响状况。

2 试验场地及研究方法

实验在常熟市近郊中国科学院常熟生态站 (31°33'N, 120°38'E) 的农田上方进行，自动观测仪均为美国热电子公司 (Thermo Environmental Instruments, Inc.) 生产的大气痕量气体监测仪，其中 O₃仪为 TE-49C 型，检测下限为 1×10^{-9} ，仪器操作和标定参照美国提供的标准操作程序 (SOP) 进行，并用 TE-49PSC 型臭氧校正仪标定，零点和多点标定较稳定。1999 年 10 月~2000 年 10 月利用臭氧自动观测仪对农田上方 O₃浓度进行了连续一年的逐时自动测定，同时自动记录辐射、温度等相对应的逐时气象资料。OTC-1 型农田开顶式气室采用盆栽实验，试验用 O₃由高纯度 O₂经 QHG-1 型高频 O₃发生器生成，然后与过滤后的背景大气混合，分别配制成 O₃浓度为 200×10^{-9} 、 100×10^{-9} 、 50×10^{-9} 的混合气体，再分别用轴流风机输入 OTC-1 型开顶式气室内。另外设置两个对照处理，一个是经活性炭过滤后的背景大气 (过滤后的背景大气 O₃浓度为 10×10^{-9} 左右)，另一个直接将背景大气输入气室内 (O₃浓度约为 30×10^{-9} 至 40×10^{-9} 左右)，因此共 5 个不同浓度的处理。气室内 O₃浓度的监测用 HORIBA-AMBIENT O₃监测仪进行，在整个生育期内对冬小麦进行长期熏气处理，并利用 Licor-6200 便携式光合作用测定系统测定了不同气室内的冬小麦叶片光合作用速率。

3 农田上方 O₃日变化规律



学反应产生, 因此一天中 O_3 浓度受光化学反应的影响势必存在一定的日变化, 而且较高的 O_3 浓度值一般出现在阳光较强的中午, 而此时正是作物光合作用较强的时刻, 因此建立数值模式, 利用 O_3 的逐时观测资料分析 O_3 对作物光合作用影响显得十分必要。

图 2a 是生长期逐日 O_3 浓度日变化曲线, 正如以上分析及推断, 农田上方 O_3 往往在中午时刻达到较大值, 一般白天浓度较高而夜晚较低, 并且 O_3 浓度日变化过程十分复杂, 但从总体看可以分为高浓度单峰型、高浓度多峰型和低浓度平缓型。图 2b、c、d 分别是三个典型的 O_3 日变化过程及其相对应的辐射日变化过程, 从图中可以看出: 尽管 O_3 由光化学反应引起, 但并不意味着典型晴天 O_3 浓度值一定较高, 换言之, 低 O_3 浓度也并不意味着该日为阴天天气, 对其他众多日期的臭氧及辐射相关分析得到同样的结论。总之, O_3 受辐射影响的同时, 还受到污染源及低层大气平流输送等众多因素的共同影响, 因此近地层 O_3 受环境因子影响机制非常复杂, 其研究不在本文范围之内。以上图 2 所说明的是晴天状况下三种不同 O_3 日变化形式均可出现, 由于阴天光合作用相对较小, 而晴天光合作用较大, 因此重点分析典型晴天时这三种 O_3 变化形式对作物光合影响状况。

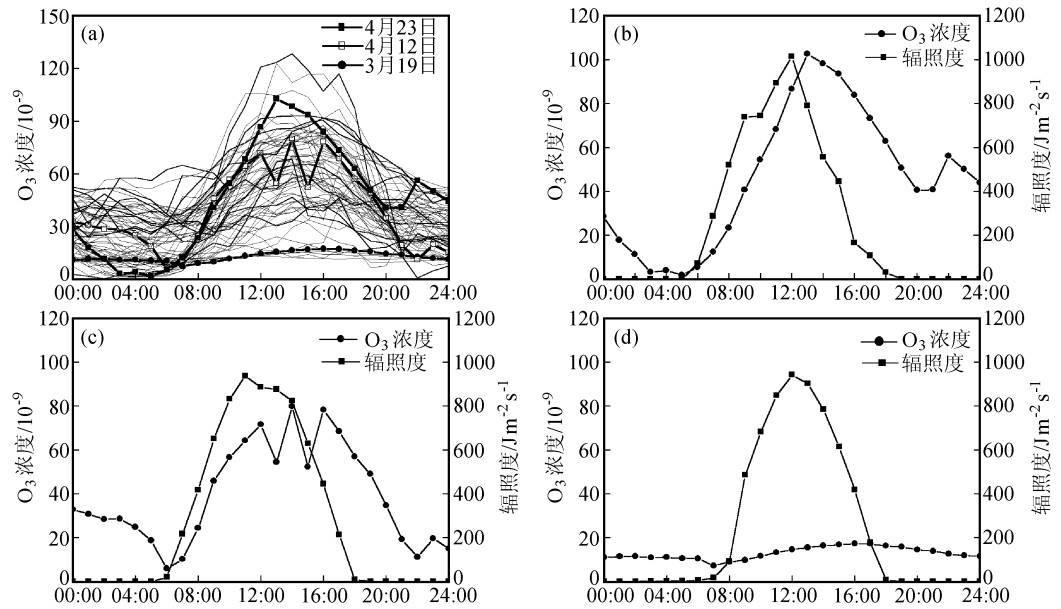


图 2 农田上方 O_3 浓度日变化
(a) 不同日期 O_3 浓度日变化; (b) 4 月 23 日; (c) 4 月 12 日; (d) 3 月 19 日

4 O_3 对冬小麦光合作用影响的数值分析

研究 O_3 对作物光合影响一般采用开顶式气室, 每个气室中的 O_3 浓度保持恒定, 在多个不同 O_3 浓度的气室内进行盆栽实验确定 O_3 对作物光合作用的影响状况, 迄今为止还无法用实验手段直接测定大田状况下 O_3 对冬小麦光合作用的影响。因此, 在实验基础上, 建立起具有较高分辨率和准确度的气候生态数值模式, 利用模式进行数值分析, 成为目前最有效的研究手段。

4.1 气候生态动力模式

模式由辐射日变化推算、叶片光合作用、群体光分布以及光合日总量等子模型组成,积分时间达到逐时水平,空间积分为叶片尺度,采用5层循环嵌套进行积分。

4.1.1 辐射日变化推算

一年中365天对应区间 $[0, 2\pi]$,取日角 $\theta = 2\pi (d_n - 1)/365$, d_n 为年的日序,1月1日取为1,12月31日取为365,那么赤纬 δ 为可按左大康^[10]提出的公式进行计算,地理纬度为 ψ 的地区,日序为 d_n 时,太阳时角 ω 时的光合有效辐射 $R(\omega)$ 可表示为^[11]

$$R(\omega) = \frac{0.5 \times Q \times \sinh \times (1 + 0.4 \sin h)}{3600 \times D_s}, \quad (1)$$

$$D_s = D_L (\sin \psi \sin \delta + 0.4 \sin^2 \psi \sin^2 \delta + 0.2 \cos^2 \psi \cos^2 \delta) + 12 \cos \psi \cos \delta \left(2 + 1.2 \frac{\sin \psi \sin \delta}{\pi} \times \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \psi \sin^2 \delta}{\cos^2 \psi \cos^2 \delta}} \right), \quad (2)$$

式中, Q 为日总辐射量; h 为太阳高度角; D_L 为日长。在得到 ω 时刻的总光合有效辐射 $R(\omega)$ 后,根据大气传输方程,散射光合有效辐射为

$$D^*(\omega) = R(\omega) \times D_f, \quad (3)$$

式中 D_f 为散射辐射所占比例^[12],

$$D_f = \begin{cases} 1 & a_t \leq 0.22, \\ 1 - 6.4(a_t - 0.22)^2 & 0.22 < a_t \leq 0.35, \\ 1.47 - 1.66a_t & a_t > 0.35, \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$a_t = \frac{R(\omega)}{0.5 \times S_c \times \sinh}, \quad (5)$$

S_c 为太阳常数。直接光合有效辐射为

$$S^*(\omega) = R(\omega) - D^*(\omega). \quad (6)$$

4.1.2 叶片光合作用模型

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^[13~15]

$$\begin{cases} P_n = P_t - R_d = \frac{\alpha I P_{\max}}{\alpha I + P_{\max}} F(T) - R_d, \\ F(T) = \frac{2(T+B)^2 (T_{\max} + B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max} + B)^2}, \\ R_d = R_m + R_g, \\ R_m = r_m M Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}}, \\ R_g = (1-V)(P_t - R_m), \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_n 为净光合效率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); P_t 为总光合效率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); R_d 为暗呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $\alpha=0.042$,为初始光合速率; I 为光合有效辐射光子量子通量密度($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $P_{\max}=35.97 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,为最大光合速率; $F(T)$ 为温度订正函数; T 为温度($^{\circ}\text{C}$); $B=10$,为温度订正函数中的温度影响廓线参数; $T_{\max}=25^{\circ}\text{C}$,为光合最适温度; R_m 为维持呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); R_g 为生长呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $r_m=50.245 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ 为维持呼吸系数; M 为干物重(kg m^{-2}); $Q_{10}=2$ 为生化参数;

$T_m = 25^\circ\text{C}$ 为参考温度; $V = 0.7$ 为生化系数 (图 3a)。考虑 O_3 影响后的叶片净光合速率 P_j 可表示为

$$P_j = P_n \times F(\text{O}_3) \quad (8)$$

式中 $F(\text{O}_3)$ 为 O_3 对光合作用影响的 0—1 化函数, 据实测资料可表示为

$$F(\text{O}_3) = \left[\frac{A_1 - A_2}{1 + (c_{\text{O}_3}/b_0)^\lambda} + A_2 \right] / A_1 \quad (9)$$

式中 c_{O_3} 为 O_3 浓度, A_1 、 A_2 、 b_0 和 λ 为参数, $A_1 = 17.9$, $A_2 = 8.7$, $b_0 = 141.6$, $\lambda = 1.7$ (图 3b)。

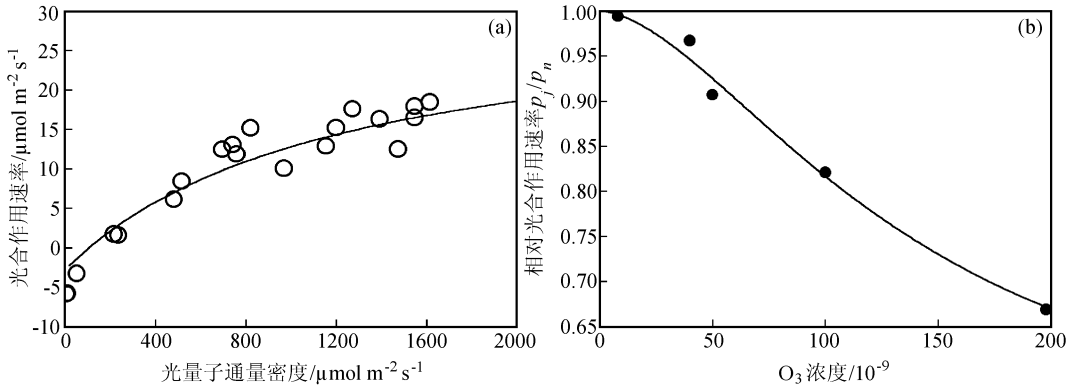


图3 冬小麦叶片光合作用响应曲线及 O_3 对光合作用影响函数

(a) 叶片光合作用响应曲线; (b) O_3 对光合作用影响函数

4.1.3 群体光分布

群体光分布利用 Ross 提出的随机理论模式^[16], 首先利用 G 函数确定任一叶面积深度处的直射光穿透函数 $\tau_s(L, n_s)$ 和散射光穿透函数 $\tau_d(L)$, 由此可以计算出任一叶面积深度处的水平方向的光合有效辐射强度 $s^*(L, n_s)$, 那么累积叶面积指数 $L-1 \sim L$ 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

$$s^*(L-1, \theta_L, \varphi_L) = \frac{s^*(L-1, n_s)}{\sinh} | \cos(n_s n_L) |, \quad (10)$$

式中 $\cos(n_s n_L)$ 为太阳光线方向和叶片法线方向夹角的余弦。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累积叶面积指数 L 处水平面散射辐射强度为

$$D^*(L) = D^*(\omega)\tau_d + \frac{Q^*(\omega)\sigma^*K(e^{-KL} - e^{-L})}{1 - K}, \quad (11)$$

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

$$D^*(L-1 \sim L, \theta_L, \varphi_L) = D^*(L-1) \frac{(1 + \cos\theta_L)}{2}. \quad (12)$$

4.1.4 群体光合作用

将太阳时角 ω 时刻, 累积叶面积指数 L 、叶倾角 θ_L 、方位角为 φ_L 叶片上的光合有效辐射 $Q^*(\omega, L, \theta_L, \varphi_L)$ 以及此时刻的温度值代入叶片光合作用 (7) ~ (9) 式, 得到

此叶片净光合速率 $P_j(\omega, L, \theta_L, \varphi_L)$ ，那么时角 ω 时刻群体净光合速率为

$$P_j(\omega) = \int_0^L \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} P_j(\omega, L, \theta_L, \varphi_L) P(L, \theta_L, \varphi_L) d\varphi_L d\theta_L dL, \tag{13}$$

式中， $P(L, \theta_L, \varphi_L)$ 为累积叶面积指数 L 处、倾角为 θ_L 、方位角为 φ_L 的叶面积密度值，为保证计算精度，对累积叶面积指数进行逐层积分，叶倾角和方位角分别划分为 6 个区域和 8 个区域进行积分，

$$P_j(\omega) = \sum_{L=1}^{N_L} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^8 P_j(\omega, L, \theta_{Li}, \varphi_{Lj}) P(L, \theta_{Li}, \varphi_{Lj}) d\varphi_L d\theta_L dL, \tag{14}$$

式中， N_L 为叶面积指数 L_A 取整加 1 的和。对时角 ω 进行连续积分，可求出日总光合量，对逐日日总光合量积分可以求出累积光合量。利用大田状况下同化箱观测的冬小麦群体光合实测资料对模式进行验证，在样本数 $n=37$ 时，模式的平均误差为 6.9% 左右，表明模式不仅具有非常高的分辨率，而且具有较高的准确度。由于 O_3 浓度对叶片光合作用影响函数建立在实测资料基础上，因此，利用模式分析 O_3 对群体光合影响是可靠的。

4.2 O_3 对冬小麦光合作用影响的数值分析

首先将 2000 年 4 月 23 日逐时辐射和温度值代入数值模式，并使 O_3 浓度订正项为 1，得到不考虑 O_3 影响的群体光合作用曲线 BASE，然后输入气象因子及相对应的 O_3 浓度重新运行模式，得到 O_3 影响下的群体光合作用曲线 PO，用同样的方法分别得到 4 月 12 日和 3 月 19 日的 BASE 及 PO 曲线（图 4）。

数值分析表明，当 O_3 日变化为低浓度平缓型时（图 4c），不考虑 O_3 影响的光合日总

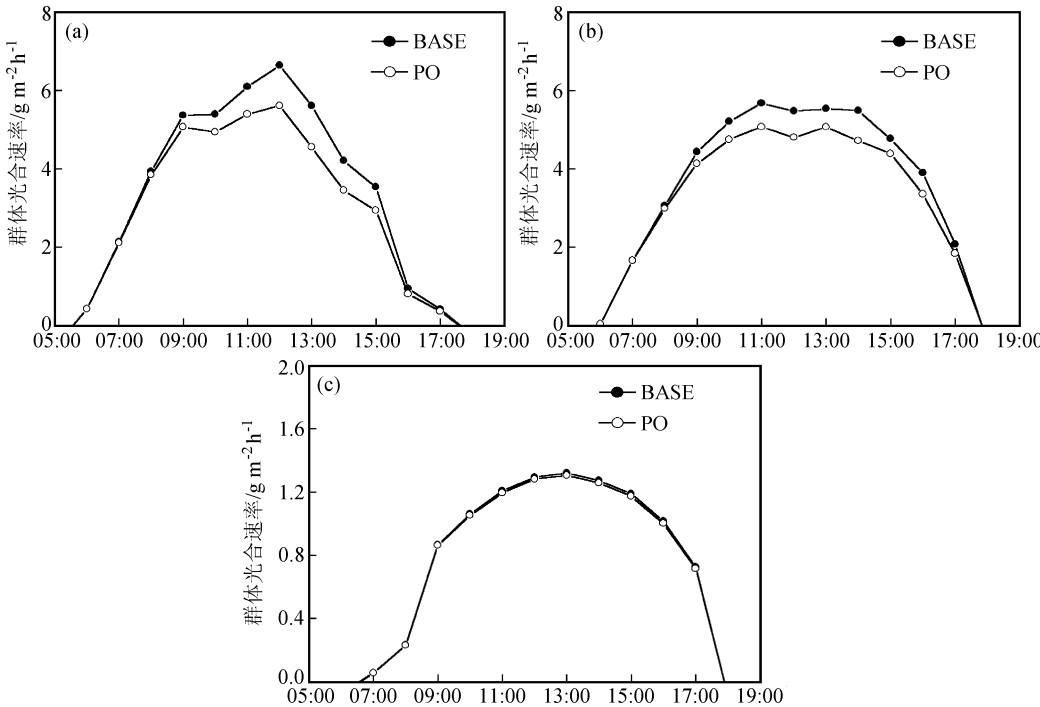


图 4 O_3 对冬小麦群体光合作用日变化的影响
(a) 4 月 23 日；(b) 4 月 12 日；(c) 3 月 29 日

量为 $9.850 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 考虑进 O_3 的影响时, 光合日总量为 $9.745 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 光合日总量仅减少了 1.1% ; O_3 浓度呈高浓度多峰曲线变化时 (图 4b), 不考虑 O_3 影响的光合日总量为 $46.249 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 考虑进 O_3 的影响时, 光合日总量为 $41.853 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 光合日总量减少了 9.5% ; 而相比之下, O_3 浓度呈高浓度单峰曲线变化时 (图 4a), O_3 对冬小麦的光合作用存在明显的胁迫作用, 不考虑 O_3 影响的光合日总量为 $44.247 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 考虑进 O_3 的影响时, 光合日总量为 $39.070 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 光合日总量减少了 11.7% 。

以上数值分析时, 不同的 O_3 浓度变化过程相对应的叶面积指数 L_A 和气象因子不同, 为了进一步揭示单纯 O_3 浓度日变化对群体光合日变化的影响, 利用模式进行数值敏感分析。首先设定模拟背景: 地点为常熟, 日期为 4 月 23 日, 叶面积指数 $L_A=5$, 假设温度一直保持最适状态, 典型晴天, 日总辐射量 $Q=24 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。利用数值模式得到不考虑 O_3 影响的冬小麦光合作用曲线 BASE, 以及单峰曲线、多峰曲线和低浓度平缓曲线所对应的的光合作用曲线 PO1、PO2 和 PO3 (见图 5), 结果表明在其他因子均相同的情况下, 高浓度单峰曲线对冬小麦群体光合影响最大。

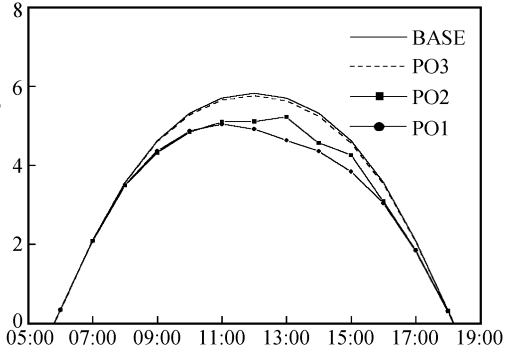


图 5 O_3 对光合作用影响的敏感分析

因此, 就高浓度单峰型 O_3 浓度对群体光合影响进行了进一步深入分析。设定模拟背景: 地点为常熟, 日期为 2001 年 4 月 23 日, 冬小麦叶面积指数 $L_A=5$, 日总辐射量 Q 分别取值 $16 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $18 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $\dots$, $30 \times 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 由数值模式中的辐射子模型进行辐射推算, 对应的辐射日变化见图 6a; 设温度处于适宜状态, O_3 浓度最大值 $c_{\text{O}_3, \text{max}}$ 分别取值为 60×10^{-9} , 80×10^{-9} , $\dots$, 200×10^{-9} , 假定其浓度日变化为一种典型的单峰曲线, 按下式计算逐时臭氧浓度

$$c_{\text{O}_3} = \frac{20 - c_{\text{O}_3, \text{max}}}{36} \times (t - 12)^2 + c_{\text{O}_3, \text{max}}, \tag{15}$$

式中 c_{O_3} 为 O_3 浓度, $c_{\text{O}_3, \text{max}}$ 为一天中臭氧最大浓度值, t 为时间。因此, 可以构成 64 组不同的辐射日变化和 O_3 日变化组合, 对每一种组合首先计算不考虑 O_3 的群体光合作用日总量 B_A 值, 然后计算考虑 O_3 后的群体光合作用日总量 C_N 值, 即可得到群体光合作用日损失量 $\Delta S = B_A - C_N$ 。模拟结果进行数值平面分析见图 6c, 结果表明: O_3 和辐射同步变化时, 随着日总辐射量的加大, 臭氧浓度增加对光合作用的影响程度逐渐加强。

最后, 将所测定的常熟 2000 年冬小麦拔节—成熟期的逐时辐射、温度和 O_3 浓度资料代入模式, 首先不考虑 O_3 浓度对光合作用影响, 得到相应的光合作用日总量及累积光合量曲线 (图 7a), 然后考虑进 O_3 对光合作用的影响, 得到相对应的光合作用日总量及光合作用累积曲线 (图 7b), 由这两个曲线的差值即可得到光合作用日损失量以及光合作用累积损失量曲线 (图 7c)。常熟地区在水肥适宜的麦田中, 由于 O_3 影响, 生育期光合作用总损失量约为 9.22% 。

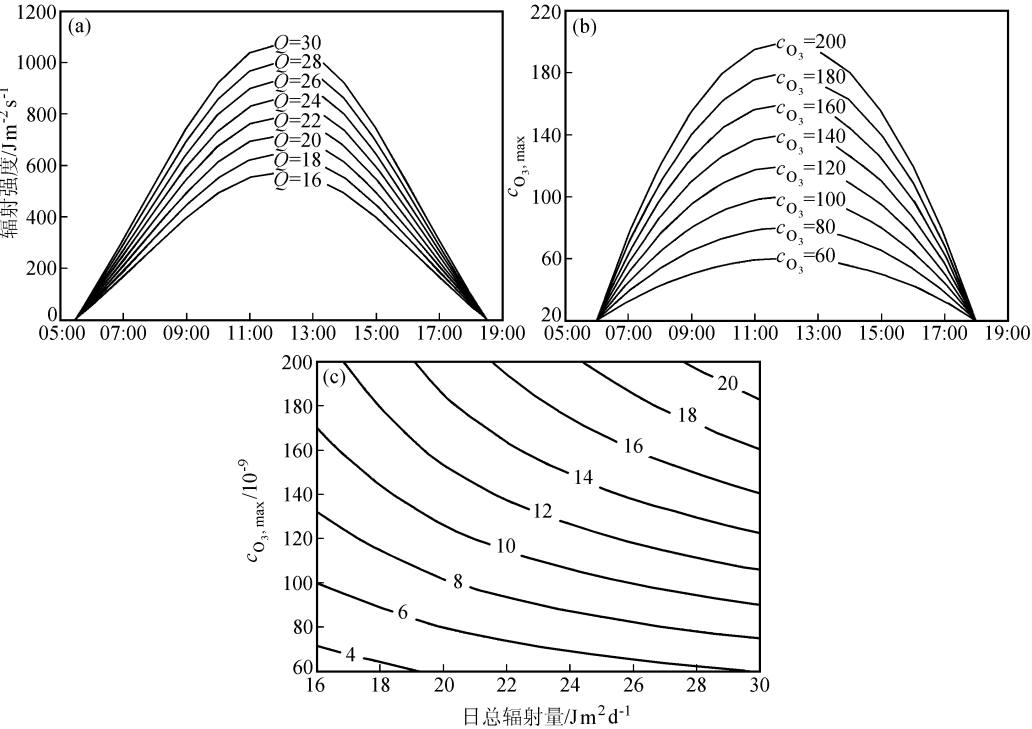


图 6 辐射及 O_3 浓度对群体光合作用综合影响的数值分析
(a) 辐射日变化; (b) O_3 日变化; (c) 群体光合日损失量

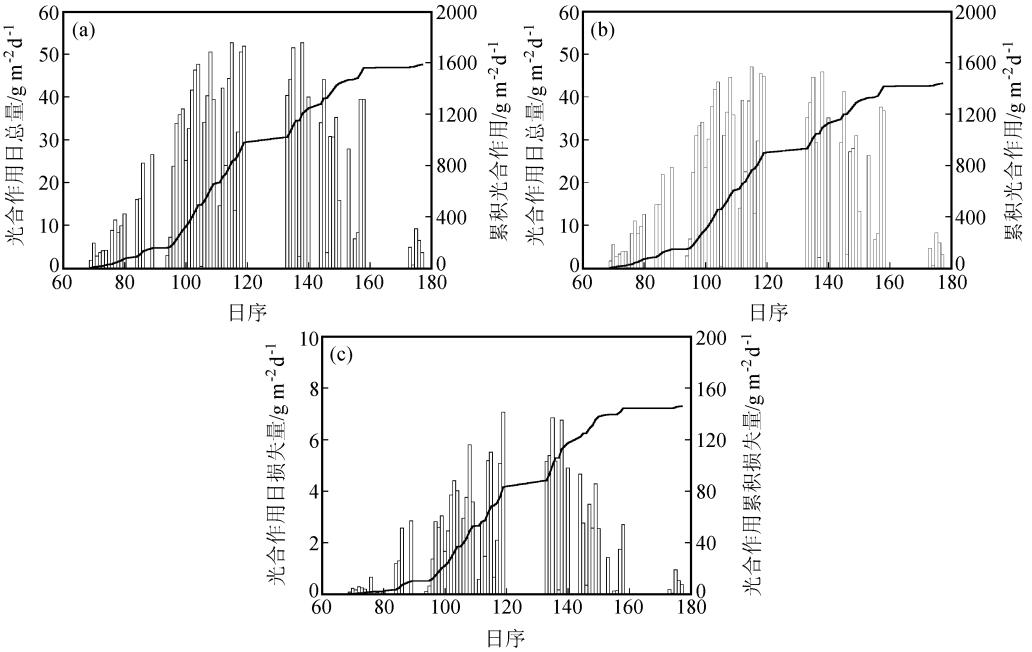


图 7 O_3 对冬小麦累积光合量的影响

(a) 不考虑 O_3 影响的光合日总量及光合作用累积曲线; (b) 考虑 O_3 影响的光合日总量及光合作用累积曲线; (c) 光合作用日损失量及光合作用总损失量曲线

5 结论

(1) 长江三角洲地区农田上方 O₃ 浓度逐时值变化幅度较大，特别是夏季，其变化幅度在 0~160×10⁻⁹ 之间，相比之下，O₃ 日平均值变化范围较小，约在 5×10⁻⁹~60×10⁻⁹ 范围内。

(2) 长江中下游地区 O₃ 存在三种典型的日变化形式：高浓度单峰型、高浓度多峰型和低浓度平缓型。数值分析表明在全晴天状况下三种 O₃ 浓度日变化形式中以高浓度单峰型对光合作用日总量影响最大。

(3) 首次建立了 O₃ 对冬小麦光合作用影响的数值模式，其分辨率为瞬时时间尺度，空间积分采用 Ross 方案，具有较高分辨率和准确度。数值敏感分析表明：O₃ 浓度和辐射日总量同步变化时，随着日总辐射量的加大，臭氧浓度增加对光合作用的影响程度逐渐加强。全生育期积分表明，水肥适宜的麦田中，由于 O₃ 影响，生育期光合作用总损失量约为 9.22%。

致谢：本文为国家自然科学基金重大项目（批准号：49899270）第 6 课题综合模式数值分析研究内容，按项目设置第 3、5 两课题为本课题提供了大量观测数据，谨此致以诚挚谢意。

参 考 文 献

1 IPCC, *Climate change* 1994, Cambridge: Cambridge University Press, 1995, 95~103.

2 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.

3 张立盛、石广玉，硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算，大气科学，2001，**25**（2），231~242.

4 杨昕、李兴生，近地面 O₃ 变化化学反应机理的数值研究，大气科学，1999，**23**（4），427~438.

5 周秀骥，中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响，北京：气象出版社，1996，267~273.

6 Heck, W. W., W. W. Cure, and J. O. Rawlings, Assessing impacts of ozone on agricultural crops, *J. Air Pollut. Control Assn.*, 1984, **34**, 810.

7 王春乙，臭氧对农作物的影响研究，应用气象学报，1995，**6**（3），343~349.

8 郭建平、王春乙、温民，大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究，作物学报，2001，**27**（6），822~826.

9 Ding Guoan, Xu Xiaobin, and Tang Jie, Surface ozone characteristics at three stations in China, *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **15**（1），21~28.

10 左大康，地球表层辐射研究，北京：科学出版社，1991，96~223.

11 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，自然科学进展，2001，**11**（9），960~965.

12 Liu Jiandong, Zhou Xiuji, and Zhang Yu, Numerical simulation of methane emissions from rice paddy fields in the Yangtze Delta of China, *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, **15**（1），1~11.

13 刘建栋、周秀骥、于强，FAO 生产潜力模型中基本参数的修正，自然资源学报，2001，**16**（3），240~247.

14 于强、王天铎、刘建栋等，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 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），867~880.

16 J. L. 蒙特思著，卢其尧译，植被与大气原理，北京：农业出版社，1983，15~67.

A Numerical Simulation of the Impacts of Ozone in the Ground Layer Atmosphere on Crop Photosynthesis

Liu Jiandong¹⁾, Zhou Xiujie¹⁾, Yu Qiang²⁾, Yan Peng¹⁾, Guo Jianping¹⁾, and Ding Guoan¹⁾

- 1) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)
- 2) (*Institute of Geographic Sciences and Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Abstract The increase of O₃ concentration in the ground layer has negative impacts on crop photosynthesis. The O₃ concentration above the wheat field was observed hour by hour with TE—49C ozone auto-monitor in Changshu, and the impact of O₃ on the wheat leaf photosynthesis was measured in the OTC—1 open top chamber simultaneously. Based on the observed parameters, a numerical model for simulating the impact of O₃ on wheat canopy photosynthesis was developed, which has higher resolution and accuracy. The results of O₃ observation showed that there are three typical patterns of O₃ diurnal variation in the Yangtze River Delta, including the unimodal curve with high concentration, multimodal curve with high concentration and smooth variation curve with low concentration. The result of numerical analysis identified that the unimodal variation with high concentration has greater impact on daily photosynthesis than the others. When the O₃ concentration and daily radiation changed synchronously, the impact of O₃ on photosynthesis becomes more intense as daily radiation increasing. The lost of the wheat photosynthesis due to O₃ in the whole growth period was integrated, and the calculated results showed that the accumulated lost of daily photosynthesis is about 9.22% in the wheat growth period under suitable moisture and fertilizer conditions.

Key words: ozone; crop; photosynthesis; numerical simulation