

近地层 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦影响的数值模拟: I 模型结构^{*}

郑昌玲 王春乙

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

在试验研究的基础上,文中尝试利用数值模拟方法评估 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对作物的影响。以农田生态系统碳氮生物化学模型(DNDC)为基础,对其中的作物子模型进行改进,加入 O₃ 对冬小麦光合作用和叶片生长影响的模拟,结合原模型中有关 CO₂ 对冬小麦光合作用影响的模拟,建立反映 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长发育和产量形成影响的作物模型。文章对 DNDC 模型进行了参数修正以适用于中国华北地区;文章参考前人的工作,引用了两种 O₃ 对作物光合作用影响的模拟方法进行比较,分别是 O₃ 对初始光利用率的影响和 O₃ 对叶片光合作用的直接影响;在此基础上,进一步考虑 O₃ 对冬小麦叶片生长的影响,根据试验资料,建立了 O₃ 对叶片生长影响系数。

关键词: 臭氧, 二氧化碳, 冬小麦, DNDC 模型, 数值模拟。

1 引 言

人类活动对气候变化以及气候变化对生态系统的可能影响已引起科学家和社会越来越多的关注,气候变化的主要原因之一是由于人类活动增加,使近地层大气成分含量发生变化,其中 CO₂, O₃ 浓度日益增加。由于煤炭、石油等化石燃料的燃烧、森林的大量砍伐,自工业革命以来大气中 CO₂ 浓度由 290×10^{-6} (V/V) 上升到 370×10^{-6} (V/V), 呈明显上升态势。如果维持目前的人类活动水平,到 21 世纪中叶 CO₂ 浓度很可能达到 550×10^{-6} (V/V)^[1,2]。O₃ 不仅是温室气体,而且还是最主要的光化学污染物^[3]。近年来,对流层 O₃ 浓度每年以 0.5% 的速率增长,近地层 O₃ 也呈明显的增加趋势^[4]。

国内外进行了大量有关 CO₂ 和 O₃ 对作物影响的试验,取得了很多成果。CO₂ 增加对植物光合作用、生长发育及产量形成的正效应已有大量的报道,王春乙等^[5~6]研究了 CO₂ 对多种作物的影响, Kimball BA^[7]研究了 CO₂ 对蔬菜的影响; O₃ 浓度增加对作物叶片伤害、光合作用、生长发育及产量形成的

负效应同样已有大量的报道,如 Kress L W 等^[8]研究了 O₃ 对小麦的影响等,郭建平^[9]研究了 O₃ 对水稻的影响。对于 CO₂ 和 O₃ 复合效应对农作物影响的试验研究也有不少报道, Hertstein U 等^[10]综述了 CO₂ 和 O₃ 的复合效应对不同作物和蔬菜产量的影响。

从 20 世纪 80 年代开始,美国和欧洲的一些国家在 O₃ 对农作物影响试验研究基础上,进行模型研究,纵观其发展历程,可分为 3 类模型:(1) 在大量 O₃ 熏气试验的基础上利用统计方法建立 O₃ 浓度—作物产量响应模型,简称统计模型,如美国 NCLAN 项目的 Wellbull 方程^[11,12];(2) 利用光化学反应模型输出区域或全球大气 O₃ 浓度及其变化情景,结合已建立的 O₃ 浓度—作物产量模型评估区域或全球的作物产量、经济损失,简称光化学模型,如 Chameides^[13]的三维全球化学模型, Mauzerall^[14]的 MOZART (Model of ozone and related tracers) 模型;(3) 结合作物模型,模拟 O₃ 在作物生长发育、产量形成过程中,对光合作用、呼吸作用、同化作用等生理生化过程的影响,简称机理模型,如日

* 初稿时间:2004 年 4 月 15 日;修改时间:2004 年 8 月 10 日。

资助课题:国家自然科学基金重大项目(49899270)。

作者简介:郑昌玲,1980 年生,女,湖北松滋人,硕士,现从事农业气象研究。

本小林和彦 (Kazuhiko Kobayashi)^[15] 建立的 O₃ 影响作物损失评估系统, Marion^[16] 提出的短期 O₃ 暴露对小麦叶片羧化有效率影响模型。中国这方面的研究比较少, 刘建栋^[17] 建立了 O₃ 对叶片光合作用的影响函数。

中国进行了在作物模型中考虑 CO₂ 浓度变化对作物直接影响的相关研究。周晓东、王馥棠^[18] 进行了 CO₂ 浓度增加对冬小麦直接影响和间接影响的数值模拟研究, 张宇^[19] 在农田生态系统碳、氮生物地球化学过程 (DNDC) 模式中考虑 CO₂ 浓度变化对作物光合作用的影响。但是, 在作物模型中考虑 O₃ 浓度变化对作物直接影响的研究甚少, 同时考虑 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对作物复合影响还未见报道。

本文针对中国近地层 O₃ 和 CO₂ 浓度变化的状况, 在前人工作的基础上, 建立反映大气中 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长发育和产量形成影响的作物模型, 利用数值模拟的方法, 克服试验手段在空间和时间上的限制, 动态、定量的评估大气中 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对中国农作物的影响。

文中以农田生态系统碳、氮生物地球化学模型 (DNDC) 为基础, 改进作物模型中的部分系数, 加入 O₃ 对冬小麦影响的模拟, 结合原模型中有关 CO₂ 对冬小麦光合作用影响的模拟, 建立反映 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长发育和产量形成影响的作物模型。

2 模型思路

2.1 模型结构

农田生态系统碳、氮生物地球化学模型主要考虑的过程和模拟的对象包括: (1) 作物生长过程以及作物对气候和农业管理措施的反应; (2) 作物生长和土壤生物地球化学过程的交互作用; (3) 作物产量和痕量气体排放的模拟。模型包括 3 个子模型: 气候子模型计算模拟了水热状况; 作物子模型模拟了作物的发育期、叶面积指数、光合作用、呼吸作用、同化物分配、根生长和氮吸收; 土壤生物化学子模型包括土壤有机碳分解、氮固定和痕量气体排放。模型的输入数据包括: 气候驱动要素、土壤特征参数、作物参数和田间管理措施; 输出包括: 土壤碳、氮通量、作物产量、氮淋洗及痕量气体排放。时间步长为 1 d, 空间范围为具有代表性的站点或一定区域。

2.2 冬小麦生长模式

DNDC 作物模式考虑的主要状态变量包括: 发

育期、叶面积指数、作物器官的生物量和氮含量; 过程主要包括: 光合作用, 呼吸作用, 同化物分配, 水分吸收、蒸腾与水分胁迫, 氮的吸收、转运与作物氮胁迫。本文以冬小麦为例, 针对 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对作物的影响, 修正了 DNDC 作物模式中的作物子模式, 使 DNDC 模型适用于华北地区, 特别是在固城站取得较好效果。

2.2.1 发育阶段

参照 CERES (Crop environment resource synthesis) 小麦模式, 将冬小麦发育过程分为 9 个阶段 (表 1), 冬小麦发育的最低温度取 1 °C, 最高温度取 34 °C。

表 1 冬小麦发育阶段的划分

Table 1 Development stages of winter wheat

阶段	发育阶段描述
7	播种前
8	播种—发芽
9	发芽—出苗
1	出苗—顶端小穗开始分化
2	小穗开始分化—穗生长开始
3	开始穗生长—开花
4	开花—灌浆开始
5	灌浆期
6	成熟—收获

冬小麦生育期从出苗到成熟, 发育速度主要由积温确定。

$$R_D = T_{DT} / P_i \quad (1)$$

其中, R_D 是日发育速率; P_i 是完成一个发育期需要的积温, T_{DT} 是日积温 (°C · d)。

$$T_{DT} = \frac{1}{24} \int_1^{24} \min[T_{DM} - T_{Db}, \max(0, T_c(t) - T_{Db})] \quad (2)$$

其中 $T_c(t)$ 是冠层温度, T_{DM} , T_{Db} 是作物生长的最高温度和最低温度。

播种—发芽, 模式假定条件适宜 (温度大于 4 °C, 土壤水分大于凋萎湿度) 时, 这一阶段只需要 1 d。发芽—出苗所需时间由积温确定

$$P_9 = 40 + 10.2 \times S_d \quad (3)$$

式中, P_9 是发芽—出苗所需的积温 (°C · d); S_d 为播种深度 (cm)。

出苗—小穗分化决定于作物品种特性与环境条件, 涉及到春化作用与光周期过程

$$T_{DU} = T_{DT} \times \min(F_V, F_D) \quad (4)$$

$$T_{DUX} = m \times G_{P_8} / 95 \quad (5)$$

$$F_V = 1 - (5.4545 \times G_{P_0} + 3) \times (50 - V) / 100 \quad (6)$$

$$F_D = 1 - 0.0002 \times G_{P_1} \times (G_{P_2} - L_D)^2 \quad (7)$$

式中, T_{DT} 为日积温值; T_{DU} 为热发育单位, T_{DU} 当累积到一定阈值 (T_{DUX}) 时, 冬小麦小穗分化; m 是经验系数, 本文取值 480; G_{P_8} 是输入品种参数, 表示相邻两片叶端出现之间的积温值, 一般为 75~100 °C; F_V, F_D 是春化作用与光周期影响因子, 介于 0~1 之间; G_{P_0} 是输入品种参数, 表示品种对春化作用的敏感性(春性品种取值小, 冬性品种取值大), 本文取 5.5; V 是春化作用累积效果, 其逐日变化为 ΔV ; G_{P_1} 是品种对光周期的敏感性, 本文取 2.5; G_{P_2} 是临界日长, 均为输入品种参数, 文中取 20 h。 L_D 是实际日长 (h)。

从小穗分化到开始抽穗, 叶片数不再增加, 但假设这一阶段所需的积温相当于三片叶生长所需的积温(即 $3 \times G_{P_8}$), 假设穗生长到开花所需的积温相当于两片叶生长所需的积温(即 $2 \times G_{P_8}$), 开花到开始灌浆所需的积温假定为 110 °C · d。灌浆期所需的积温一般为 700 °C · d 左右, 以输入品种参数 (G_{P_5}) 的形式给定。

2.2.2 叶片生长与叶面积指数

叶面积指数 (I_{LA}) 的变化根据叶片生长率和叶片死亡率确定。

$$\Delta I_{LA} = G_{rol} - S_{enl} \quad (8)$$

ΔI_{LA} 为 I_{LA} 日变化, G_{rol} 和 S_{enl} 分别为叶面积日增长率和死亡率。

冬小麦叶片数由小穗分化前(第 1 阶段)决定, 叶片的增长决定于积温值

$$\Delta N_L = T_{DT} / G_{P_8} \quad (9)$$

式中, N_L 是叶片数; ΔN_L 是叶片数的日增长量。

叶片数将用于分蘖和叶面积死亡的计算。叶面积系数决定于叶面积增长和叶片死亡

$$I_{LA} = 0.0001 \times P_{lants} \times \sum (P_{LAG} - P_{LALR}) \quad (10)$$

式中, I_{LA} 是叶面积指数; P_{lants} 是植株密度 (株/m²); P_{LAG} 和 P_{LALR} 是叶面积增长速率和死亡速率 (cm²/ (株 · d))。

2.2.3 分蘖

小麦成熟时的有效穗数决定于分蘖过程。

$$R_{til} = \begin{cases} \Delta N_L \times \min(F_W, F_N) \times \min(N_L - 2.5, T_{C2}) & \text{(阶段 1,2)} \\ 0.005 \times N_{TIL} \times T_{DT} \times \left(\frac{S_{TEMwt} + G_{roSTEM}}{T_{ilsw} \times N_{TIL}} - 1 \right) & \text{(阶段 3,4)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_{til} 是分蘖数的日变化 (茎数/(株 · d)); N_{TIL} 是单株茎数(包括主茎); S_{TEMwt} 是茎生物量, G_{roSTEM} 是日增长量; T_{C2} 是密度对分蘖的影响; F_W 是水分胁迫系数; F_N 是氮素胁迫系数; T_{ilsw} 是潜在茎蘖重。

2.2.4 光合作用

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, 因此作物光合作用的准确与否直接决定了作物生长模拟的好坏。

光合作用决定于光合强度和叶面积系数, 群体日光合量可表示为:

$$P_0 = \min(F_W, F_N) \times \int_0^{D_L} \int_0^{I_{LA}} P(I_{LAC}, t) dI_{LAC} dt \quad (12)$$

式中: P_0 是整个群体的日光合量 (kg/(hm² · h)); I_{LAC} 是群体中某一层的叶面积系数; t 是时间; $P(I_{LAC}, t)$ 是单位叶面积的光合速率 (kg/(hm² · h))/(J/(m² · s)); I_{LA} 是群体叶面积系数; L_D 是日长 (h); F_W, F_N 是水分和氮对光合作用的影响因子取 0~1。

利用 Goudriaan^[20] 三点加权平均方法计算上式积分。

$$P_0 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P(I_{LAC_i}, t_j) \times I_{LA} \times L_D \times W_{2j}^2 \quad (13)$$

$$t_j = 12 + L_D \times 0.5 \times W_{1j}$$

$$I_{LAC_i} = I_{LA} \times W_{1i}$$

式中, W_{1i}, W_{2i} 是权重系数, 当 $i, j=1, 2, 3$ 时 W_{11}, W_{12}, W_{13} 分别等于 $\sqrt{0.15}, 0.5, 1 - \sqrt{0.15}$, W_{21}, W_{22}, W_{23} 分别等于 $1/3.6, 1.6/2.3$ 和 $1/3.6$ 。

光-光合作用反应曲线用负指数函数描述:

$$A_L = A_{max} \times [1 - e^{(-E_{FF0} \times P_{AR} / A_{max})}] \quad (14)$$

A_L 为单叶光合速率 (kg/(hm² · h)), A_{max} 为叶片最大光合速率(单位同上), E_{FF0} 为初始光能利用率 (kg/(hm² · h))/(J/(m² · s)), P_{AR} 为到达叶片的光照强度 (J/(m² · s))。

根据 Goudriaan^[21], CO₂ 浓度变化对光合作用

的影响可表示为

$$P_x = P_0 \times [1 + \mu \times \ln(C_x/C_0)] \quad (15)$$

式中 P_x 是当 CO₂ 浓度为 C_x ($\times 10^{-6}$) 时的光合强度; μ 是作物参数, 对于 C₄ 和 C₃ 植物取值不同, 本文作物为冬小麦, 取值为 0.4; C_0 等于 340×10^{-6} (V/V)。

2.2.5 呼吸作用

呼吸作用可分为生长呼吸和维持呼吸, 生长呼吸决定于同化物分配及器官的化学组成, 而维持呼吸与温度、生物量及生物活性有关。

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失消耗。这种消耗可包含在由葡萄糖合成各类植株干物质的转换系数中。生长呼吸依赖于植物的光合速率, 对温度反应不敏感。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, 且与温度高低有关, 温度每升高 10 °C, 维持呼吸速率增加一倍。

$$R_{gi} = A_{ssim} \times (1 - 1/R_{g0i}) \quad (16)$$

$$R_{mi} = R_{m0i} \times F(S_T) \times W_{Ti} \times Q_{10}^{\frac{T_{cm} - 25}{10}} \quad (17)$$

式中: R_{gi} , R_{mi} 是器官(根、茎、叶和穗)的生长呼吸量与维持呼吸量, A_{ssim} 是当天同化物分配量(g 生物量/m²); W_{Ti} 是该器官的生物量; R_{g0i} , R_{m0i} 是生长效

率系数和维持呼吸系数; Q_{10} 是温度影响系数, 本文取值 2.0; $F(S_T)$ 是发育阶段对维持呼吸的影响, 反映器官生理活性的变化。 T_{cm} 是冠层平均温度。

总呼吸量与器官生物量的日变化可表示为

$$R = \sum_{i=1}^4 (R_{mi} + R_{gi}) \quad (18)$$

$$\Delta W_{Ti} = A_{ssim} - R_{gi} - R_{mi} \quad (19)$$

式中 R 是作物总呼吸量; ΔW_{Ti} 是器官 i 生物量的日变化。

根据 Penning de Vries 等^[22], 各器官的生长效率系数取 1.5, 茎和穗的维持呼吸系数取 0.01, 根和叶取 0.015。

2.2.6 同化物分配

模式中同化物分配根据发育期计算。首先将同化物分为地上和地下两部分

$$P_{TF} = \begin{cases} G_{roLF}/A_{ssim} & \text{(阶段 1)} \\ 0.7 + 0.1 \times \min(F_{W1}, F_{N1}) & \text{(阶段 2)} \\ 0.75 + 0.2 \times \min(F_{W1}, F_{N1}) & \text{(阶段 3)} \\ 0.9 + 0.1 \times \min(F_{W1}, F_{N1}) & \text{(阶段 4)} \\ 0.65 + 0.35 \times S_{TMmin}/S_{TEMwt} & \text{(阶段 5)} \end{cases} \quad (20)$$

式中, P_{TF} 是同化物向地上部分分配的比例; G_{roLF} 是根据叶面积和比叶重计算的叶增重量(g 生物量/(m² · d)); A_{ssim} 是日净同化量。 S_{TMmin} 是开花时的最小茎生物量; S_{TEMwt} 是茎生物量。

表 2 同化物向各器官分配的比例

Table 2 The ratio of assimilation to different organs

发育阶段	根	叶	茎	籽粒
1	$1 - P_{TF}$	P_{TF} ($X_{ST} < 1.5$) $P_{TF} \times 0.9$ ($X_{ST} \geq 1.5$)	0 ($X_{ST} < 1.5$) $P_{TF} \times 0.1$ ($X_{ST} \geq 1.5$)	0
2	$1 - P_{TF}$	$(1 - 0.12 \frac{\sum_{m=1}^m dt}{G_{P_8}}) \times P_{TF} - 0.1$	$0.15 + 0.12 \frac{\sum_{m=1}^m dt}{G_{P_8}} \times P_{TF}$	0
3	$1 - P_{TF}$	0	P_{TF}	0
4	$1 - P_{TF}$	0	P_{TF}	0
5	$1 - P_{TF}$	0	$P_{TF} - (G_{roGrn}/A_{ssim})$	G_{roGrn}/A_{ssim}

* X_{ST} 为描述冬小麦发育期的连续变量(第 1 阶段为 0~1, 第 2 阶段为 1~2 等)

现有的理论认为: 在冬小麦生长初期(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阶段), 部分同化产物开始流向穗部, 生长后期(生殖生长阶段)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; 但原模式中仅考虑了各个发育期同化物的分配, 没有考虑器官间物质转移, 根据文

献^[23]增加了在第 4, 5 发育阶段茎和叶生物量向穗部转移的关系。

$$\Delta W_i = -\beta_i \times W_i$$

$$\Delta W_4 = \sum_{i=1}^3 \beta_i \times W_i \quad (21)$$

式中, ΔW_i 是由于物质转移造成的根、茎、叶生物变化量; ΔW_4 是由于物质转移造成的穗生物变化量; β_i

是根、茎、叶的转移系数,根据文献[23]确定。

2.3 臭氧(O₃)对小麦影响模拟

2.3.1 O₃对光合作用的影响

臭氧对植物的影响机理十分复杂,目前还有很多有待解决的问题,一般认为 O₃ 是通过对叶片的伤害影响植物的光合作用,进而影响同化物积累,最终影响产量^[24~25]。描述 O₃ 浓度变化与光合作用关系的数学模型尚不多见,要建立一个较好的描述 O₃ 浓度变化与光合作用关系的数学模型,需要大量的、系统的 O₃ 浓度变化对作物影响的试验资料,需要 O₃ 对作物光合作用影响机理研究的成果,如果与作物生长模型相结合,则还需要在作物模型中增加 O₃ 浓度变化对光合作用影响的模拟。

根据 DNDC 模型中冬小麦生长模式,本研究引进了两种 O₃ 浓度与作物光合作用之间的关系式。

方法一:根据日本小林和彦等^[15]的研究成果,借鉴 O₃ 对水稻冠层有效辐射利用率的影响模型, O₃ 对初始光利用率(E_{FF0})的影响为

$$\begin{aligned} E_{FFO3} &= E_{FF0} - C_v \times C(O_3)^2 && \text{营养生长期} \\ E_{FFO3} &= E_{FF0} - C_r \times C(O_3) && \text{生殖生长期} \end{aligned} \quad (22)$$

式中, $C(O_3)$ 是 O₃ 浓度, E_{FF0} 取值为 0.5, 参考小林和彦等研究经验, C_v, C_r 系数分别取 $2.047 \times 10^{-3}, 4.952 \times 10^{-6}$ 。

方法二:引进刘建栋^[17]的研究成果,将其建立的 O₃ 浓度对叶片光合作用的直接影响引入到冬小麦光合作用模式中。

O₃ 浓度变化对光合强度的影响系数 $f(O_3)$

$$f(O_3) = \left[\frac{A}{1 + C(O_3) / [C(O_3)b]^p} + B \right] \cdot (A + B)^{-1} \quad (23)$$

模式中参数 $A=9.2, B=8.7, C(O_3)b=141.6, p=1.7$ 。则作物光合强度为

$$P_{O_3} = P_0 \times f(O_3) \quad (24)$$

2.3.2 O₃对叶片的伤害

O₃ 对农作物的可见伤害主要从作物叶片表现出来。试验表明高浓度 O₃ 暴露对冬小麦叶片伤害十分严重,使冬小麦叶片褪绿、出现褐斑直至坏死,叶片加速衰老,群体叶面积下降^[26~28]。为了更好地反映高浓度 O₃ 暴露下冬小麦的生长状况,本研究进一步在作物模型中考虑 O₃ 对叶面积的直接影

响。由于资料有限,有关 O₃ 浓度变化对冬小麦试

验只进行 1 a,数据将用于模型验证;因此,本文根据在 OTC-1 型开顶式气室进行的 O₃ 浓度变化对油菜影响试验研究中有关叶片影响的数据,利用统计方法建立臭氧与叶面积下降率的关系式。利用油菜生长中期叶面积数据拟合臭氧减缓叶片生长系数:

$$R_1 = 1.7028 - 0.3635 \times \ln(C(O_3)) \quad (25)$$

利用油菜生长后期叶面积数据拟合臭氧加快叶片衰老系数

$$R_2 = 0.7308 \times e^{0.127 \times C(O_3)} \quad (26)$$

$C(O_3)$ 范围在 $30 \times 10^{-9} \sim 300 \times 10^{-9}$ (V/V)。将此系数引入模型中叶面积增长的模拟,在第 2,3 发育阶段,冬小麦的叶面积增长率为

$$P_{LAG(O_3)} = P_{LAG} \times R_1 \quad (27)$$

在发育阶段后期,冬小麦叶片死亡率为

$$P_{LALR(O_3)} = P_{LALR} \times R_2 \quad (28)$$

3 模型运行

模型需要输入的资料包括:气象资料、环境资料、土壤资料和作物参数。

(1) 气象资料

由国家气象中心气候资料室提供的河北保定站气象资料,包括 1992 年 9 月 1 日~1993 年 6 月 30 日和 1998 年 9 月 1 日~1999 年 6 月 30 日逐日资料,具体要素为:日照时数,日最高温度、日最低温度、日降雨量。

(2) 环境资料

通过查阅文献或原模型中确定地表反照率、地理纬度、背景大气 CO₂ 浓度、背景大气 O₃ 浓度、降雨的 pH 值和 N, P 含量,地表水径流量、地下水位等。

(3) 土壤资料

通过查阅文献或原模型中确定 0~50 cm 土壤分层、土层温度、土壤容重、田间持水量、凋萎系数、土壤 N 和 P 含量等。

(4) 作物参数

根据供试作物品种由中国农业科学院获取,冬小麦生长过程涉及到的最大光合速率、初始光能利用率、消光系数、春化作用系数、光周期系数、临界日长、叶片生长积温、同化物分配系数等。

为了修正原模型适用于华北地区,特别是在固城单点取得较好效果,利用国家气象中心气候资料室提供的密云、通州、涿州地区 1998~2000 年农业气象简报中冬小麦的相关资料,对模型中的部分模

拟过程和作物参数进行调整或验证。用于修正 O₃ 对叶片影响的资料为王春乙等 1999 年在中国气象科学研究院固城试验基地进行的 O₃ 浓度变化对油菜影响的试验, 包括 5 个处理: O₃ 浓度分别为 50×10^{-9} (V/V), 100×10^{-9} (V/V), 200×10^{-9} (V/V) 以及背景大气对照和碳过滤背景大气对照。

4 总 结

陆地生态系统和大气之间的物质、能量交换(碳、氮、水、气、热量等)是地球生物圈的一个重要方面。DNDC 模型综合考虑了作物生长过程、土壤碳氮动态过程及其相互作用, 是国际上先进的农田生态系统模型。DNDC 模型中的作物生长子模式借鉴了美国 CERES 和 DSSAT 的建模方法, 与这些作物模型相比, 计算过程相对简单, 便于理解。DNDC 模型的重点是碳、氮、水、气在生态系统中的生物化学反应过程, 突出了生态系统的整体性和物质的动态转化过程, 这正是当前地球生物圈对气候变化反应的重点。

本文以 DNDC 模型为基础, 在作物生长模式中引进 O₃ 对作物影响的模拟, 尝试通过冬小麦生长过程将植物对 O₃ 吸收, CO₂ 吸收, 综合考虑大气—植物—土壤中碳、氮循环、系统、全面地模拟农田生态系统对气候变化、O₃ 和 CO₂ 浓度上升的响应, 对于 DNDC 模型的改进过程和模拟效果将在另文^[29]中进行描述。

参考文献

- [1] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. International panel on climate change supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 200
- [2] Schimeil D S, Braswell B H, McKeown R, et al. Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling. *Global Biogeochem. Cycle*, 1996, 10: 677—692
- [3] 王明星. 大气化学. 北京: 气象出版社, 1999. 360~367
Wang Mingxing. *Atmospheric Chemistry*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 360—367
- [4] Fishman J. The global consequence of increasing tropospheric O₃ concentration. *Chemosphere*, 1991, 22: 685—695
- [5] 王春乙. OTC-1 型开顶式气室中 CO₂ 对大豆影响的试验结果. *气象*, 1993, 19(7): 23~26
Wang Chunyi. Experimental result of effects of CO₂ on soybean in OTC-1. *Meteorology*, 1993, 19(7): 23—26
- [6] 王春乙, 潘亚茹, 白月明等. CO₂ 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
Wang Yunyi, Pan Yaru, Bai Yueming, et al. Experimental study of impacts of doubled CO₂ on main crops in China. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 1997, 55(1): 86—94
- [7] Kimball B A. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *J Agron*, 1983, 75: 779—788
- [8] Kress L W, Miller J E, Smith, H J. Impact of ozone on winter wheat yield. *Environ Exp Bot*, 1985, 25(3): 211—228.
- [9] 郭建平, 王春乙, 温民等. 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
Guo Jianping, Wang Chunyi, Wen Min, et al. Experiment study of impacts of change atmospheric O₃ on rice. *Acta Agronomica Sinica*(in Chinese), 2001, 27(6): 822—826
- [10] Hertstein U, Grünhage L, Jager H J. Assessment of past, present and future impacts of ozone and carbondioxide on crop yields. *Atmos Environ*, 1995, 29(16): 2031—2039
- [11] Heck W C, Adams R M, Cure W W, et al. A reassessment of crop loss from ozone. *Environ Sci Technol*, 1983, 17(12): 572—581
- [12] Lesser V M, Rawlings J O. Ozone effects on agricultural crops: statistical methodologies and estimated dose-response relationships. *Crop Science*, 1990, 30: 148—155
- [13] Chameides W L. Growth of continental-scale metro-agroplexes, regional O₃ pollution, and world food production. *Science*, 1994, 264: 74—77
- [14] Mauzerall D L, Daiju N, Hajime A, et al. Seasonal characteristics of tropospheric ozone production and mixing ratios over East Asia: A global three-dimensional chemical transport model analysis. *J Geophysical Research*, 2000, 105(14d): 17895—17910
- [15] Kazuhiko Kobayashi. Modeling and assessing the impact of ozone on rice growth and yield. *Tropospheric ozone and the environment*. In: Berglund R L, ed. *Air & Waste Management Association*. Pittsburgh, USA, 1992. 537—551
- [16] Marion J M, Farage P K. Can the stomatal changes caused by acute ozone exposure be predicted by changes occurring in the mesophyll? A simplification for models of vegetation response to the global increase in tropospheric elevate ozone episodes. *Aust J Plant Physiol*, 2000, 27: 211—219
- [17] 刘建栋, 周秀骥, 于强. O₃, CO₂ 浓度变化及太阳光谱变化对作物光合作用影响的数值模拟研究. *气象学报*, 2002, 60(6): 715~721
Liu Jiandong, Zhou Xiuji, Yu Qiang. Numerical simulation study on impacts of O₃ and CO₂ concentrations and solar spectrum changes on crop photosynthesis. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 2002, 60(6): 715—721
- [18] 周晓东, 王馥棠, 朱启疆. 二氧化碳浓度增加对冬小麦生长发育影响的数值模拟. *气象学报*, 2002, 60(1): 53~59

- Zhou Xiaodong, Wang Futang, Zhu Qijiang. Numerical simulation study on impacts of CO₂ concentration change on growth and development winter wheat. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2002, 60(1): 53–59
- [19] 张宇. 农田生态系统中碳、氮生物地球化学过程的模拟: [博士论文]. 北京: 北京大学地球物理系, 1999
Zhang Yu. Modeling Carbon and Nitrogen Biogeochemistry in Agroecosystems—the impacts of soil, climate and farming practice on crop growth, carb and nitrogen dynamics, and trace gas emissions; [Doctor paper]. Beijing: Earth-physics Department of Beijing University, 1999
- [20] Goudriaan J, Laar H H, van Keulen H, et al. Simulation of the effect of increase atmospheric CO₂ on assimilation and transpiration of a closed crop canopy. *Wissenschaftliche Zeitschrift Humboldt Universitaet Berlin, Math. — Nat. R.* 1984, 33(4): 32–356
- [21] Goudriaan J. A simple and fast numerical method of commutation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorol.* 1986, 38: 249–254
- [22] Penning de Vries, F. W. T, Jansen D M. Simulation of eco-physiological processes of growth in several annual crops. *Pudoc, Wageningen*, 1989.
- [23] 乔玉辉, 宇振荣, Driessen P M. 冬小麦干物质在各器官累积和分配规律研究. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 543–546
Qiao Yuhui, Yu Zhenrong, Driessen P M. Quantification of dry matter accumulation and distribution among different organs of winter wheat. *Chinese J Applied Ecology* (in Chinese), 2002, 13(5): 543–546
- [24] Isamu Nouchi. Effects of chronic O₃ exposure on growth, root respiration and nurient uptake of rice plants. *Environ Pollut*, 1991, 74: 149–164
- [25] Pleijel W. Yield and grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L., cv. Drabant) exposed to different concentrations of ozone in Open-Top Chambers. *Environment Pollution*, 1991, 69: 151–168
- [26] 白月明, 郭建平. 臭氧浓度增加对冬小麦叶片影响的试验研究. *中国农业气象*, 2001, 22(4): 22–27
Bai Yuiming, Guo Jianping. The experimental study on influence of increasing O₃ concentration on winter wheat leaf. *Chinese Agrometeorology* (in Chinese), 2001, 22(4): 22–27
- [27] 白月明, 王春乙. O₃ 浓度增加对油菜影响的诊断试验研究. *应用气象学报*, 2002, 13(3): 364–370
Bai Yueming, Wang Chunyi. A diagnostic experiment and study of the influence of O₃ on pakchoi. *Quart J Appl Meteorol*, 2002, 13(3), 364–370
- [28] Wang Chunyi, Bai Yueming. A study of impacts of O₃ concentration change on crops and vegetables in China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2004, 18(1): 105–116
- [29] 郑昌玲, 王春乙. 近地层 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦影响的数值模拟: II 模拟结果和分析. *气象学报*, 2005, 63(2): 192–203
Zheng Changling, Wang Chunyi. Numerical simulation study on the impacts of changes of tropsheric O₃ and CO₂ concentrations on winter wheat: II simulation results and analyse. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2004, 63(2): 192–203

**NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE IMPACTS OF TROPOSPHERE
O₃ AND CO₂ CONCENTRATIONS CHANGES ON
WINTER WHEAT: I MODEL DESCRIPTION**

Zheng Changling Wang Chunyi

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Ozone is well documented as the air pollutant most damaging to agricultural crops and other plants. It is reported that troposphere O₃ concentration has been increased rapidly in recent 20 years. Evaluating and predicting impacts of ozone concentration changing on crops are drawing great attention in the scientific community. In China, main study method on this field is controlled experiments, for example open top chambers, but numerical simulation study about impacts of ozone on crops using crop model is rare, what's more, the simulation study about combined impacts of ozone and carbon dioxide has not been reported. The improved agroecosystem model is presented to evaluate simultaneous impacts of troposphere O₃ and CO₂ concentration changes on crops in the paper by integrating impacts of ozone on crop growth and development algorithms with an existing agroecosystem biogeochemical model, DNDC. The main crop physiological process of crop growth (phenology, leaf area index, photosynthesis, respiration, assimilate allocation and so on) in former DNDC are kept. The algorithms about impacts of ozone on photosynthesis and winter wheat leaf are added in improved model to reveal impacts of ozone and carbon dioxide on growth development and yield formation of winter wheat coupling the simulation about impacts of carbon dioxide on photosynthesis of winter wheat which exists in former DNDC. In the paper, firstly assimilate allocation algorithms and some specie parameters (such as daily thermal time of different development stage) were modified in order that DNDC can be applied to North of China. Secondly two different kinds of impacts of ozone on crops algorithms were tried to coupling with the former model the one was impacts of ozone on light use efficiency, another was direct effects of ozone on leaves photosynthesis. The later were closer to experiment measurements through comparing results of two group simulated. At last, the method of direct impacts of ozone on leaves growth was adopted and the coefficients about impacts of ozone on leaf growth and senescence were ascertained. Effects of climate changes, increasing ozone and carbon dioxide concentration on agroecosystem are attempted to be simulated numerically in the study which is considered to be advanced and credible.

Key words: Ozone, Carbon dioxide, DNDC, Numerical simulation.