

地表 O₃ 胁迫下冬小麦光合生产和干物质累积变化的模拟研究

吴荣军^{1,2}, 郑有飞^{1,2}, 赵 泽², 胡程达²

(1.南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要:为定量评估地表臭氧(O₃)胁迫对冬小麦光合生产的影响,引入了温度和生理年龄影响因子,并根据气孔导度和 O₃ 吸收通量模型计算得到的气孔 O₃ 吸收通量,建立了叶片 O₃ 吸收通量对最大光合速率的胁迫系数,结合呼吸作用模型,在系统动力学模拟环境中,模拟研究了 O₃ 胁迫下冬小麦光合生产和干物质累积的动态变化,并运用大田 OTC 试验的地上、地下部分的干物质实测数据验证了模拟值。统计分析表明,干物质全重、地上和地下部分干物质的模拟值与实测值没有显著差异,同时表明,在恒定的 150 nL·L⁻¹ 和 100 nL·L⁻¹ O₃ 浓度的胁迫下,与对照组相比,干物质分别损失了 29.5%和 16.6%。

关键词:臭氧;光合作用;干物质累积;系统动力学

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2688-08

A Dynamics Simulation of the Photosynthetic Production and Dry Matter Accumulation in Winter Wheat Under Surface Ozone Stress

WU Rong-jun^{1,2}, ZHENG You-fei^{1,2}, ZHAO Ze², HU Cheng-da²

(1.Ministry-province Key Laboratory for Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: By using the system-dynamic software package STELLA, a simulative study was conducted on the photosynthetic productivity and change of the accumulated dry matter of winter wheat population, related to elevated ozone concentration that influences photosynthesis. The effects of daily temperature and crop physiological age on the photosynthesis rate were considered comprehensively. In the meanwhile, the impact factor of stomatal ozone uptake flux on the maximum photosynthetic rate was established by calculations of stomatal conductance and uptake flux. The simulated values of overground and underground parts of dry matter weight were validated by the observed values in field OTC-experiments. Statistical analysis was undertaken to assess the fitness between simulations and observations of accumulated dry matter, and the significant level is 0.025, 0.046 and 0.007 ($P < 0.05$) for the total dry matter weights, aboveground and underground parts of winter wheat, respectively, by paired-samples *t* test. Results show that there is no significant difference between simulated and observed values, indicating that the STELLA software is effective in imitating the growth. Simultaneously, the losses of dry matter weights in 150 nL·L⁻¹ and 100 nL·L⁻¹ treatments compared with that in the control, are 29.5% and 16.6%, respectively. The paper will provide reference to the impacts assessments of surface ozone stress.

Keywords: ozone; photosynthesis; dry matter accumulation; system dynamics

近几十年以来,地表 O₃ 对冬小麦的影响研究已

受到了国内外的广泛关注,并取得了大量的研究成果。研究表明,浓度升高会使冬小麦植株叶片出现褐斑和坏疽等伤害症状,降低叶面积,加速叶片老化^[1],影响生育期^[2],增大叶片细胞膜的透性^[3],抑制植株生长,降低产量^[4],增加气孔阻力^[5],降低光合作用^[6]。关于 O₃ 对冬小麦影响的数值模拟研究方面在国外开展了较多的工作^[7-9],而国内郑昌玲和王春乙^[10-11]、刘

收稿日期:2009-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(40775072);江苏省高校自然科学基金研究重大项目(09KJA170004);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金项目(AMF200904);南京信息工程大学科研基金(90215)

作者简介:吴荣军(1975—),男,浙江江山人,副教授,硕士生导师,在读博士,从事应用气象方面研究。E-mail:wurj@nuist.edu.cn

通讯作者:郑有飞 E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

建栋^[12],以及姚芳芳^[13]等人根据实测 O_3 浓度变化对冬小麦叶片光合速率的影响函数,建立了 O_3 对冬小麦生长和产量形成的影响模型。然而, O_3 对作物的伤害作用与其生长环境的水汽压差(VPD)、温度等气候条件密切相关^[14-15],气候条件制约着叶片气孔导度,从而直接影响 O_3 对作物光合速率的影响,而国内外现有的模型研究中,冬小麦光合速率的 O_3 胁迫效应都没有考虑叶片气孔的 O_3 吸收通量。

长江三角洲是对流层 O_3 浓度增加最为显著的地区之一^[16-18],长期监测结果表明该区域 O_3 最高浓度达 $196 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19]。如何准确评估并预测 O_3 浓度持续升高对长三角地区乃至全国主要农作物干物质累积和产量的影响,成为重要的研究热点之一。因此,本文引入温度和生理年龄影响因子,并根据气孔导度和 O_3 吸收通量模型计算得到的气孔 O_3 吸收通量,建立叶片 O_3 吸收通量对最大光合速率的胁迫系数,结合呼吸作用模型,在系统动力学模拟环境中,模拟研究 O_3 胁迫下冬小麦光合生产和干物质累积的动态变化。为开展 O_3 胁迫对长三角地区冬小麦产量影响的定量评估和大气污染物的环境影响评价提供参考,也可由政府及国际组织制订相应政策、法规提供理论依据。

1 模型描述

1.1 日长计算模型

日长(DL)决定于太阳高度角($Cosh$),而太阳高度角又与纬度(LT)和太阳倾角(SL)有关,太阳倾角取决于距离1月1日的日期($Date$)。日长计算公式^[20]如下:

$$DL = \begin{cases} 0.133 \times 57.3 \times \arctan \frac{\text{Sqrt}(1 - \text{Cosh}^2)}{\text{Cosh}} & \text{Cosh} \geq 0 \\ 0.133 \times [180 + 57.3 \times \arctan \frac{\text{Sqrt}(1 - \text{Cosh}^2)}{\text{Cosh}}] & \text{Cosh} < 0 \end{cases}$$

式中: $\text{Cosh} = -\tan(LT) \times \tan(SL)$, $LT = 32.2/57.3$

$SL = -0.41 \times \cos[(Date \times 0.986 \ 3 + 9.863) \times 0.017 \ 14]$

1.2 光合作用模型

根据单叶光合作用模型和小麦群体中的光垂直分布模型,得到逐日光合量^[21],计算公式为:

$$PG_t = \int_0^{DL} PG_i(DL) = \frac{P_{\max} \times DL}{K} \cdot \Psi$$

$$\Psi = \ln \frac{P_{\max} + \alpha \times 0.47 \times K \times (1-r) \times S}{P_{\max} + \alpha \times K \times (1-r) \times S \times \exp(-K \times LAI) \times 0.47}$$

式中: PG_t 为第 t d 的群体光合量, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $P_{\max}$ 为光饱和时的最大光合强度, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; α 为光合作

用曲线初始斜率, $\text{gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$ (根据本次实验原位测定的光响应曲线,运用直角双曲线函数拟合得到 $P_{\max} = 7 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $\alpha = 14.5 \text{ gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$); K 为群体消光系数,本模型中取值 0.35 ^[22]; r 为群体反射率,本模型中取值 0.05 ^[21]; LAI 为叶面积系数; 0.47 为光合有效辐射占太阳辐射的比例; S 为每小时的平均辐射量,令 $S = Q/DL$,其中 Q 为第 t d 的太阳辐射量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; DL 为第 t d 的日长, h 。

温度和生理年龄对最大光合速率 $P_{\max}$ 有一定的影响,同时冬小麦扬花期后由于 O_3 胁迫导致叶片衰老,从而导致气孔导度和光合速率下降^[23-25]。因此,本模型中引入温度订正因子、生理年龄影响因子和 O_3 吸收通量胁迫系数^[26],用于订正 $P_{\max}$ 。

$$AP_{\max} = P_{\max} \times f_T \times f_A \times f_{O_3}$$

式中: $AP_{\max}$ 为叶片实际最大光合速率, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; f_T 为温度订正因子; f_A 为生理年龄影响因子; f_{O_3} 为 O_3 胁迫因子。

温度订正因子 f_T ^[26]取值如下:

$$f_T = \begin{cases} 0 & -10 \leq T_{\text{mean}} < T_b \text{ or } T_{\text{mean}} \geq T_{\max} \\ \sin\left(\frac{T_{\text{mean}} - T_b}{T_{ol} - T_b} \cdot \frac{\pi}{2}\right) & T_b \leq T_{\text{mean}} \leq T_{ol} \\ 1 & T_{ol} \leq T_{\text{mean}} \leq T_{ou} \\ \cos\left(\frac{T_{\text{mean}} - T_b}{T_{ol} - T_b} \cdot \frac{\pi}{2}\right) & T_{ou} \leq T_{\text{mean}} \leq T_{\max} \end{cases}$$

式中: T_{mean} 为日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_b 为基点温度,取值为 0°C ; T_{ol} 为最适温度的下限值,取值为 12°C ; T_{ou} 为最适温度的上限值,取值为 27°C ; $T_{\max}$ 为最高温度,取值为 45°C 。

生理年龄影响因子 f_A 计算公式^[26]如下:

$$f_A = \begin{cases} 1 & PDT < 31 \\ 1 - 0.02 \times (PDT - 31) & 31 \leq PDT \leq 56 \end{cases}$$

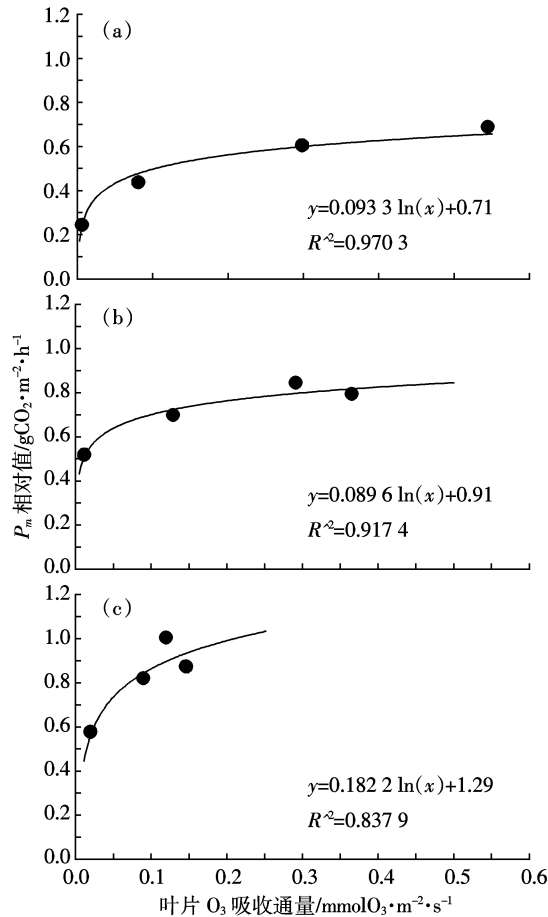
式中: PDT 为生理发育时间,是相对于最适发育条件下的时间尺度,其中 31 代表开花, 56 代表成熟^[26]。

f_{O_3} 为 O_3 对冬小麦光合作用影响的胁迫因子,根据基于 Jarvis 模型修正后的阶乘式气孔导度模型和叶片气孔 O_3 吸收通量模型^[14-15],计算得到叶片气孔 O_3 吸收通量(限于篇幅,作者计算数据略),该值考虑了高浓度 O_3 加速叶片衰老从而对光合速率造成的影响,并基于光响应曲线,计算得到不同生育期的最大光合速率 P_m 与 $P_m = 7 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的相对值。据此建立其与叶片气孔 O_3 吸收通量的关系模型(图1), $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}(T_1)$ 、 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}(T_2)$ 和对照(CK)组的 O_3 胁迫

函数 f_{O_3} 分别为:

$$f_{O_3} = \begin{cases} 0.093 \times 3 \ln(F_{sto}) + 0.71, T_1 \\ 0.089 \times 6 \ln(F_{sto}) + 0.91, T_2 \\ 0.182 \times 2 \ln(F_{sto}) + 1.29, CK \end{cases}$$

式中: F_{sto} 为叶片 O₃ 吸收通量, $\text{mmol O}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



(a 表示 T₁ 处理/150 nL·L⁻¹; b 表示 T₂ 处理/100 nL·L⁻¹, c 表示对照)

图 1 相对 P_m 与叶片 O₃ 吸收通量的关系

Figure 1 Relationship between the relative P_m and stomatal ozone uptake flux in T₁(a), T₂(b) and control(c), with T₁ denotes 150 nL·L⁻¹ treatment and T₂ 100 nL·L⁻¹ treatment

1.3 呼吸作用模型

呼吸作用的计算包括光呼吸和暗呼吸。光呼吸的计算公式^[27]为:

$$RP = PG_t \times R_p(T_0) \times Q_{10}^{(T_{day}-T_0)/10}$$

式中: RP 为光呼吸消耗量, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $R_p(T_0)$ 为温度为 T_0 时的光呼吸系数, 取值为 $0.33(\text{gCO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{CO}_2)$, Q_{10} 为呼吸作用温度系数, 取值为 2, T_{day} 为白昼温度($^\circ\text{C}$)。

暗呼吸包括维持呼吸与生长呼吸, 计算公式为:

$$RM = PG_t \times R_m(T_0) \times Q_{10}^{(T_{mean}-T_0)/10}$$

式中: RM 为维持呼吸消耗量, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, $R_m(T_0)$ 为温度为 T_0 时的维持呼吸系数, 取值为 $0.015(\text{gCO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{CO}_2)$, T_{mean} 为日平均气温($^\circ\text{C}$)。

生长呼吸与作物的有机质合成、植株体的增长及新陈代谢活动有关, 其消耗量包含在下文的转换系数 β 中, 不做单独计算。

1.4 干物质积累

群体干重是群体光合作用与呼吸作用之差, 其公式为:

$$PN_t = \beta \times \lambda \times \frac{1}{1-\varepsilon} \times (PG_t - RP - RM)$$

式中: PN_t 是第 t d 以干物重表示的日净光合量; β 是 CO_2 与碳水化合物的转换因子 (CH_2O 与 CO_2 克分子量的比例系数), 本模型取值为 0.68; λ 是由葡萄糖合成植株干物质的转换系数, 本模型取值为 0.74; ε 是小麦干物质中的矿物质含量, 本模型取值为 10%。

本文主要考虑的是水肥适宜情况下冬小麦在对照和 O₃ 浓度增加处理中的光合生产和干物质积累, 因此, 没有考虑氮素因子和水分因子对小麦光合作用和干物质积累的影响。

每日的干物质积累形成群体生物量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) (包括地上与地下部分), 其公式为:

$$DW(t) = DW(t-dt) + (PN_t)dt$$

1.5 干物质分配

利用分配指数确定冬小麦地上部分和地下部分干物质分配的动态变化, 分配指数概念避免了以往分配系数的计算中两次取样时间间隔长短和两次取样样本的大小不同所造成的误差, 因而对于研究小麦整个生育期各器官所长比例的大小及变化动态更具有科学性和确定性^[28]。分配指数为地上部分与地下部分的分配指数定义为植株地上部分或地下部分干重占整株干重的比例, 分别表示为:

$$PIT = \frac{TDW}{DW}, PIR = \frac{RDW}{DW}, PIT + PIR = 1$$

式中: PIT 和 PIR 分别为地上和地下部分的分配指数, TDW 和 RDW 分别为地上和地下部分的干物重, DW 为冬小麦群体干物质重。

基于生理发育时间, 在刘铁梅^[28]建立的地上、地下部分分配指数的动态关系的基础上, 根据地上、地下部分的干物质实测数据, 得到新计算公式为:

$$PIT = \frac{1}{1 + 1.215 \times e^{(0.0476 \times PDT)}}$$

$$PIR = 1 - PIT$$

式中: PDT 为冬小麦全生育期的生理发育时间。

1.6 模型运行环境

系统动力学是一种研究复杂系统动态行为的方法,它根据信息反馈的控制原理并结合因果关系的逻辑分析,描述系统结构,模拟系统的动态行为^[29]。STELLA9.0 是一种可运行在 Windows 环境下的,创建和运行系统动力学模型的工具。它所提供的图形用户界面,使许多问题得以进行可视化模拟,是生态建模中一个强有力的模拟软件^[30]。

利用 STELLA9.0 建模的基本步骤如下: 确定变量关系图,建立关系式或输入参数,然后在运行菜单(RUN)确定运行开始与结束的时间,在 Windows 菜单下定义输出方式(图或表),输出内容等即可运行。由 STELLA9.0 构建的模型系统流程图生成相应的一系列方程式,提示建模人员所需要的精确函数形式和

所需的变量初始值。模拟输出可以用数据表的形式或图形的形式表示。将图形显示切换到比较方式,可将不同的运行结果的图形显示叠加在一起,很容易进行模型的敏感性分析^[31]。

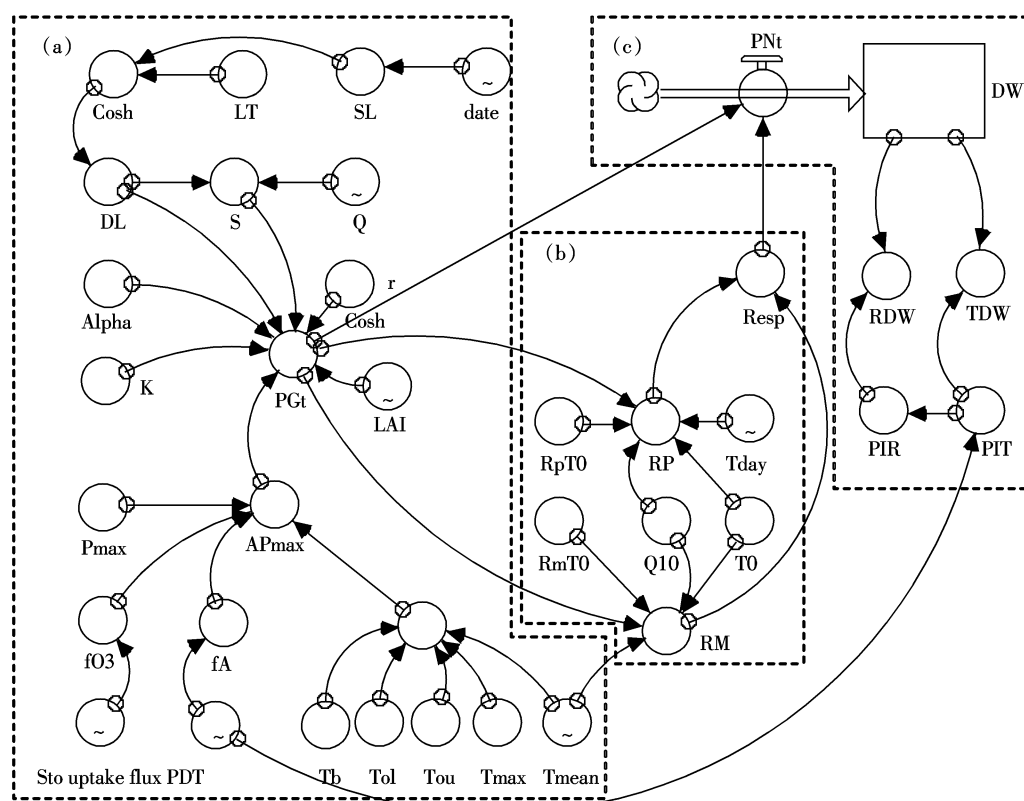
模型在步长为 1 d 的 STELLA9.0 环境下运行,模拟时间从 2008 年 3 月 7 日至 2008 年的 5 月 31 日,共 86 d。模型的流程图见图 2。

2 模型的有效性检验

2.1 大田试验

大田试验地点位于南京信息工程大学农业气象试验园(32°14'N, 118°42'E)内。开顶式气室(OTC)内冬小麦(扬麦 13)于 2007 年 11 月 12 日播种,每公顷 225 kg,撒播,播种前施底肥,每公顷复合肥 1 125 kg、尿素 450 kg。从冬小麦返青期开始曝气,曝气时段是每日的 8:00 至 16:00,共 8 h。OTC 内外水肥条件及田间管理保持一致。

试验所用 OTC 由不锈钢框架构成,底面直径为 2



(a 表示日长计算模型和光合作用模型, b 表示呼吸作用模型, c 表示光合生产和干物质累积与分配;符号表示的参数见模型描述部分)

(“a” denotes models of day length and photosynthesis, “b” respiration model, “c” photosynthetic production and accumulation and partition of dry matter; the parameters of in the graph showed in model discription section)

图 2 冬小麦干物质生产和累积模型建立的 STELLA 流程图

Figure 2 The Scheme of STELLA model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat

m, 高为 1.5 m, 呈圆柱体结构, 顶部为倾角 45° 的锥形收口, 收缩口高 0.4 m, 整个气室体积为 5.3 m³, 并外包聚乙烯塑料膜, 连接 O₃ 发生器、通风布气系统、O₃ 浓度调节阀等。O₃ 发生器购于南京万杰 O₃ 机电设备厂, 为 WJ-H-Y5 型高频 O₃ 发生器, 气源由 O₃ 发生器内置的制氧机生成。O₃ 发生器每小时生产 5 g O₃, 生成的 O₃ 借助轴流式风机(沈阳沈力牌 sf2-2 型)经过硅胶管和布气盘进入 OTC 内。用新西兰生产的 AeroQual S-200 型 O₃ 检测仪监测 OTC 内 O₃ 浓度, 并调节气流调节阀控制 OTC 内 O₃ 浓度稳定在设定的水平。

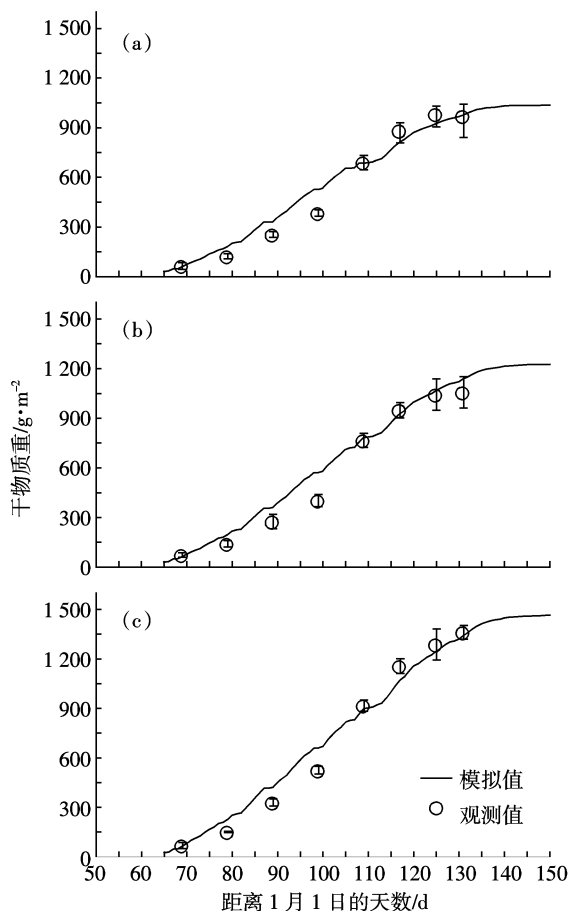
9 个完全相同的 OTC, 划分成处理组 T₁、处理组 T₂ 和一个对照组 CK, 并分别设置 3 个重复。处理组 T₁ 中 O₃ 浓度控制在 100 nL·L⁻¹ 左右, 连续监测的实际浓度为 (100±8) nL·L⁻¹ 之间, 处理组 T₂ 中 O₃ 浓度控制在 150 nL·L⁻¹ 左右, 连续监测的实际浓度为 (150±8) nL·L⁻¹。OTC 内外各布设自动气象站一台, 用于测定气室内外温度、湿度、总辐射等常规气象要素的日变化, 测定时间步长为 1 h。

于返青期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期等时段测定群体叶面积指数, 从返青起开始, 间隔 8~10 d 测定了干重 8 次。每个小区取 30 cm×40 cm 的样方, 将小麦按叶片、叶鞘、茎、果实各器官进行分类, 分别放入挂上标签经过称重的布袋内称取鲜重, 之后将样本袋放入恒温干燥箱内加热, 第 1 h 内温度控制在 100~105 °C 杀青, 以后维持在 70~80 °C, 12 h 后进行第一次称重, 以后每小时称重一次, 当样本前后两次重量差 ≤5‰ 时, 该样本不再烘烤。烘烤温度和时间根据样本大小和老嫩程度等掌握。

2.2 检验结果

以 OTC 内部自动气象站测定的日总辐射量、日平均温度的连续观测数据作为模型输入, 采用系统动力学手段模拟得到南京地区小麦群体生物量的动态变化(图 3), 并将群体干物质重的实测值与模型模拟值进行比较(图 4), 并根据物质分配的原则, 比较了地上和地下部分干物质重的实测值与模拟值的差异(图 5, 图 6)。从图 3 可以看出, 模拟的群体干物质重动态变化与实测值具有较好的一致性。同时, 对模拟值与实测值进行相关分析表明, 冬小麦干物质全重、地上部分和地下部分干物质重的模拟值与实测值的决定系数 R^2 分别为 0.978 6、0.970 5、0.963 4 ($n=24$), 均达到 1% 的显著性水平, 分别对于干物质全重、地上部分和地下部分的模拟值与实测值作散点图, 其趋势线

与 1:1 图的对角线很接近, 回归方程的斜率分别为 0.925 9、0.922 6 和 0.848 3, 均接近于 1。同时, 对冬小麦干物质全重(图 4)、地上部分(图 5)和地下部分(图 6)干物质重的模拟值与实测值开展成对双样本差异显著性的 t 检验(双侧检验), 其显著性水平 P 分别为 0.025、0.046 和 0.007, 均小于 0.05, 表明其差异没有显著性差异。说明模型可较准确地模拟小麦干物质重的动态变化。



(a 表示 T₁ 处理; b 表示 T₂ 处理, c 表示对照组 CK)

图 3 冬小麦干物质全重模拟值与实测值的变化趋势

Figure 3 Variation trends of total simulated and observed dry matter weight in winter wheat in T₁(a), T₂(b) and control(c), with T₁ denotes 150 nL·L⁻¹ treatment and T₂ 100 nL·L⁻¹ treatment

3 讨论

根据日长计算模型、作物群体光合作用和呼吸作用模型, 并根据自己计算的冬小麦叶片气孔 O₃ 吸收通量, 建立了其与最大光合速率的响应关系; 利用前人研究得到的各种参数, 建立了 O₃ 胁迫下的冬小麦光合物质生产和干物质积累模型, 并在 STELLA 动力

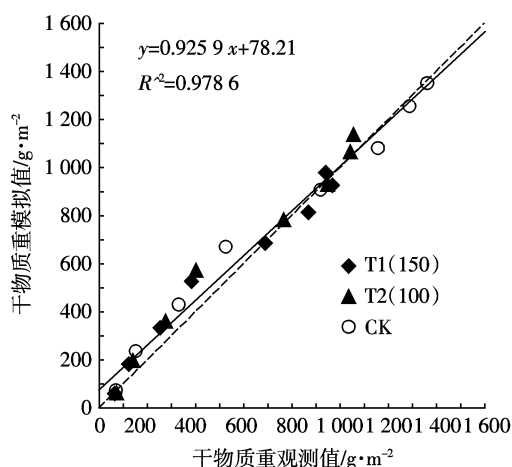


图4 冬小麦干物质全重的模拟值与实测值比较

Figure 4 Comparison between total simulated and observed dry matter weight in winter wheat

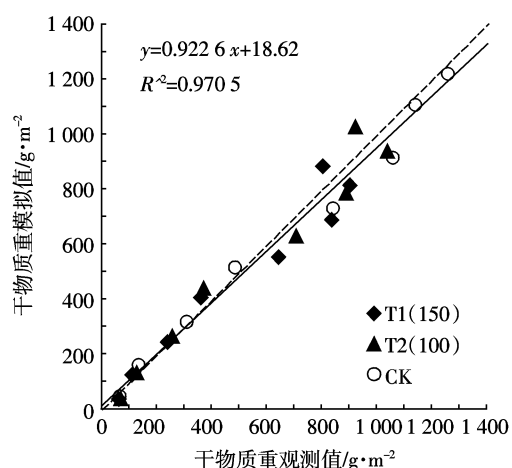


图5 冬小麦地上部分干物质重的模拟值与实测值比较

Figure 5 Comparison between simulated and observed dry matter weight overground parts of winter wheat

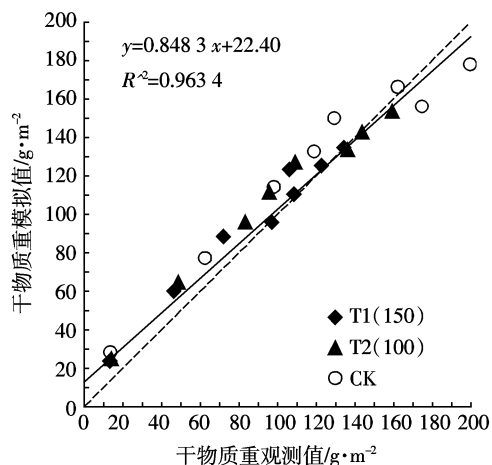


图6 冬小麦地下部分干物质重的模拟值与实测值比较

Figure 6 Comparison between simulated and observed dry matter weight underground parts of winter wheat

学模拟环境中模拟了不同 O_3 处理下的干物质累积的动态变化。模拟过程表现直观,易于理解,同时,可避开常规的复杂计算,而且可以在模型运行过程中改变参数来反映气候与环境条件的变化对小麦物质生产和积累的动态影响。

与国内外同类研究相比,本文所建立的模型考虑了 O_3 对冬小麦光合速率和叶面积的胁迫作用,同时,运用系统动力学的原理和方法来模拟小麦群体的光合作用,是本文的独特之处。本模型考虑了温度和生育期对小麦群体光合作用的影响,对呼吸作用的模拟包括光呼吸和暗呼吸,并考虑了温度对呼吸的影响。通过对模型的有效性检验,在对照组和不同 O_3 浓度条件下冬小麦群体干物质生产和积累的模拟结果与相应的实测值没有显著的差异,表明模型具有一定的预测性,建立的系统动力学模型是可靠的。在此基础上,根据 150、100 $nL \cdot L^{-1}$ 和对照组的干物质累积模拟值的动态变化(图3)可知,在 150 和 100 $nL \cdot L^{-1}$ 处理累积的干物质分别是对照组的 70.5% 和 83.4%,表明在 150 和 100 $nL \cdot L^{-1}$ 的 O_3 浓度的胁迫下,干物质分别损失了 29.5% 和 16.6%。

然而,由于小麦生长发育系统的复杂性和生长发育过程中的生理生态试验数据的不充分,模型仍存在一些不足:①对于同化物的分配仅仅考虑地上部分和地下部分,而在模型中考虑干物质在不同器官的分配;②模型只考虑了温度、日总辐射两个气候环境条件,对于水分和氮素对植物生长的影响有待验证,磷、钾、微量元素等影响小麦生长的关键因子未予考虑;③没有考虑不同的发育期和不同组织的碳水化合物和干物质含量不同,本模型中转换系数 β 、 λ 用了某一定值。

因此,下一步研究应该考虑不同生育期的同化物分配系数,综合考虑根系生长、茎叶的生长,增强机理性,同时,综合考虑水分、氮素对小麦生长的影响。在机理方面,更为重要的是建立 O_3 对冬小麦光合系统影响的生化模型,将其与本文建立的模拟耦合,改进和完善本文建立的系统动力学模型,更为准确的模拟其冬小麦在 O_3 胁迫下的生长生理过程。

参考文献:

- [1] 王春乙, 白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WANG Cun-yi, BAI Yue-ming. Research into the impacts of variation of ozone and aerosols on crops[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.
- [2] Soja G, Barnes J D, Posch M, et al. Phenological weighting of ozone expo-

- sures in the calculation of critical levels for wheat, bean and plantain[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109:517-524.
- [3] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 臭氧对原位条件下冬小麦叶片光合色素、脂质过氧化的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(11):2240-2244. ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the *in situ* leaves of winter wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2005, 25(11):2240-2244.
- [4] Nali C, Pucciariello C, Lorenzini G. Ozone distribution in central Italy and its effect on crop productivity[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90:277-289.
- [5] Pleijel H, Berglen Eriksen A, Danielsson H, et al. Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar—grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomatal conductance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56:63-71.
- [6] Vandermeiren K, Black C, Pleijel H, et al. Impact of rising tropospheric ozone on potato: Effects on photosynthesis, growth, productivity and yield quality[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28:982-996.
- [7] Goumenaki E, Fernandez I C, Papanikolaou A, et al. Derivation of ozone flux-yield relationships for lettuce: A key horticultural crop[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146:699-706.
- [8] Mills G, Ball G, Hayes F, et al. Development of a multi-factor model for predicting the effects of ambient ozone on the biomass of white clover[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109:533-542.
- [9] Nussbaum S, Remun J, Rihm B, et al. High-resolution spatial analysis of stomatal ozone uptake in arable crops and pastures[J]. *Environment International*, 2003, 29:385-392.
- [10] 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: I 模型结构[J]. 气象学报, 2005, 63(2):184-191. ZHENG Chang-ling, WANG Chun-yi. Numerical simulation study on the impacts of troposphere O₃ and CO₂ concentrations changes on winter wheat: I Model description[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(2):184-191.
- [11] 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[J]. 气象学报, 2005, 63(2):192-202. ZHENG Chang-ling, WANG Chun-yi. Numerical simulation study on the impacts of troposphere O₃ and CO₂ concentrations changes on winter wheat: II Simulation results and analyses[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(2):192-202.
- [12] 刘建栋, 周秀骥, 于强, 等. 近地层大气臭氧对作物光合作用影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2004, 28(1):59-68. LIU Jian-dong, ZHOU Xiu-ji, YU Qiang, et al. A numerical simulation of the impacts of ozone in the ground layer atmosphere on crop photosynthesis[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(1):59-68.
- [13] 姚芳芳, 王效科, 欧阳志云, 等. 臭氧胁迫下冬小麦物质生产与分配的数值模拟[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11):2586-2593. YAO Fang-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, et al. A simulation model of ozone stress on photosynthetic production and its allocation of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2586-2593.
- [14] Pleijel H, Danielsson H, Emberson L, et al. Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41:3022-3040.
- [15] Lrtap Convention. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 2004 <http://www.icpmapping.org>.
- [16] Luo C, S T John J C, Zhou X, et al. A nonurban ozone air pollution episode over Eastern China: Observation and model simulations[J]. *J Geophys Res*, 2000(105):1889-1908.
- [17] 王效科, 庄亚辉, 李长生. 中国农田土壤 N₂O 排放通量分布格局研究[J]. 生态学报, 2001, 21(8):10-17. WANG Xiao-ke, ZHUANG Ya-hui, LI Chang-sheng. The distribution pattern of N₂O emission from agricultural soil in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8):10-17.
- [18] 王效科, 欧阳志云, 苗鸿. DNDC 模拟在长江三角洲农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放量估算中的应用[J]. 环境科学, 2001, 22(3):15-19. Wang Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong. Application of DNDC model in estimation of CH₄ and N₂O emissions in agricultural ecosystems in Yangtze River Delta[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2001, 22(3):15-19.
- [19] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004. ZHOU Xiu-ji. The interaction between the atmosphere and ecosystems in Yangtze Delta Region[M]. Beijing: Meteorological Press, 2004.
- [20] Connor D J, 穆兴民. 模拟软件 stella 在小麦生长发育模拟中的应用[J]. 河北农业大学学报, 1996, 19(1):108-112. Connor D J, MU Xing-min. An application of STELLA in simulation of wheat development and growth[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 1996, 19(1):108-112.
- [21] 朱玉洁, 冯利平, 易鹏, 等. 紫花苜蓿光合生产与干物质积累模拟模型研究[J]. 作物学报, 2007, 33(10):1682-1687. ZHU Yu-jie, FENG Li-ping, YI Peng. A Dynamic Model Simulating Photosynthetic Production and Dry Matter Accumulation for Alfalfa[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10):1682-1687.
- [22] 高晓飞, 谢云, 王晓岚. 冬小麦冠层消光系数日变化的实验研究[J]. 资源科学, 2004, 26(1):137-140. GAO Xiao-fei, XIE Yun, WANG Xiao-lan. Daily variation of extinction coefficients in winter wheat canopy in experiment [J]. *Resource Science*, 2004, 26(1):137-140.
- [23] Pleijel H, Danielsson H, Vandermeiren K, et al. Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield—results from the European CHIP programme[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17:303-317.
- [24] Gelang J, Pleijel H, Sild E, et al. Rate and duration of grain filling in relations to flag leaf senescence and grain yield in spring wheat (*Triticum aestivum*) exposed to different concentrations of ozone[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110:366-375.
- [25] Danielsson H, Pihl Karlsson G, Karlsson P E, et al. Ozone uptake mod-

- elling and flux-response relationships—an assessment of ozone-induced yield loss in spring wheat[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37, 475–485.
- [26] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦物质生产与积累的模拟模型[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3):26–31.
- LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong et al. A simulation model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(3):26–31.
- [27] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001:34–47.
- CAO Wei-xing, LUO Wei-hong. Crop system simulation and intelligent management[M]. Beijing: High Education Press, 2001:34–47.
- [28] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦器官间干物质分配动态的定量模拟[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1):25–31.
- LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. Quantitative simulation on dry matter partitioning dynamic in wheat organs[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(1):25–31.
- [29] Forrester J W. From the ranch to system dynamics: An autobiography [C]. Bedeian A G. Management Laureates: A collection of autobiographical essays. Greenwich: JAI Press, 1992:343–369.
- [30] 吴荣军, 郑有飞. 紫外辐射胁迫下小麦干物质生产和积累的动力学模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2325–2331.
- WU Rong-jun, ZHENG You-fei. A dynamical model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat under increment UV-B radiation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2325–2331.
- [31] Connor D J, Fereres E. A dynamic model of crop growth and partitioning of biomass[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63:139–157.