

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^{* 1}

郑昌玲 王春乙

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

针对 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对冬小麦影响, 改进了农田生态系统碳氮生物化学模型(DNDC), 并利用模型模拟了 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长发育和产量的影响, 检验了模型的模拟效果。通过对原 DNDC 模型适用性的调整, 使之适用于固城站, 为进一步改进作物模型打下了可靠的基础。通过试验资料验证表明, 模型较好地反映了 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长发育和产量形成的影响。通过敏感性分析得出, 模型对温度变化反映灵敏; 在 CO₂ 浓度倍增情况下, O₃ 浓度变化对冬小麦的复合影响分析看出, 一定浓度范围内, CO₂ 可缓解 O₃ 对作物影响的负效应, O₃ 对 CO₂ 带来的正效应有削弱作用。

关键词: 臭氧, 二氧化碳, 冬小麦, 影响, 数值模拟。

1 引 言

有关 O₃ 对作物影响, 许多学者在大量试验研究和模型模拟研究的基础上, 对 O₃ 造成的作物产量损失以及农业经济损失进行评估。美国建立全国作物损失评价网(National Crop Loss Assessment Network, NCLAN), 在全美范围利用农田 OTCs (Open Top Chambers) 研究 O₃ 对农作物(棉花、小麦、大豆等)生长和产量的影响^[1], 并利用 Wellbull 分布方程描述了 O₃ 浓度变化与作物产量之间的关系^[2,3], 这种暴露-响应关系对不同作物的产量损失评估都取得了较好效果^[4]。Chameides 等^[5]利用三维全球化学传输模型按洲际尺度计算北美东部、欧洲、中国东部和日本三个区域的臭氧浓度, 利用 O₃ 暴露-作物产量关系, 估测全球有 10%~35% 的谷类作物在其生长季节受到 O₃ 的伤害而造成减产。日本小林和彦等^[6]从 O₃ 对作物生理机制影响角度建立了 O₃ 对水稻影响的生长模型。Marion 等^[7]建立了短期臭氧暴露对叶片羧化有效率影响的光合作用模型, 反映植物吸收的有效 O₃ 量与羧化率下降的关系。

中国利用开顶式气室进行了 O₃ 对作物影响的试验研究^[8~11], 本文将在此基础上, 利用数值模拟的方法评估臭氧和气候变化对作物生长和产量的影响。为了反映 O₃ 影响作物的机理和动态过程, 以及与其他环境因素的复合作用, 本文以农田生态系统碳氮生物化学模型(DNDC)为基础, 改进原模型中的作物生长模型, 嵌入 O₃ 对冬小麦光合作用和叶片生长影响的模拟, 并结合原模型中 CO₂ 对光合作用影响的模拟, 建立考虑 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦影响的改进 DNDC 模型。

关于建模思路和模型结构在文献[12]进行了描述。本文的主要内容是在对 DNDC 模型改进的基础上, 分别模拟了不同 O₃ 和 CO₂ 浓度条件下冬小麦的生长发育和产量, 并利用试验资料进行验证, 表明模型较好的反映了 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦的影响。

2 试验资料

有关 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦直接影响的试验资料分别来源于王春乙等于 1999 年和 1993 年在中国气象科学研究院河北固城农业气象试验基地

* 初稿时间: 2004 年 4 月 15 日, 修改稿时间: 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。

(位于河北省定兴县固城镇)进行的试验研究,并参考了王春乙等于 1999 年和 2000 年进行的 O₃ 对水稻、油菜等作物影响的试验研究资料。试验所用设备为王春乙等自行设计的 OTC-1 型开顶式气室,其构造结构、物理性能等见文献[8]。有关 CO₂ 和 O₃ 对冬小麦影响的试验采取盆栽方式,盆顶口直径 36

cm,深 26 cm,一般在播种次年正值冬小麦返青后期移入气室,每日 09:00~16:00 通气,试验期间各项农业管理措施相同,水肥不是限制因子,基本上做到无病虫害和杂草影响,可以看成为单要素控制试验,具体的处理见表 1。

表 1 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对冬小麦影响试验简介
Table 1 Experiments about impacts of [CO₂] and [O₃] changes on winter wheat

	试验处理	试验场地	试验设备	释放气体时间	作物品种	播种—收获	移入气室时间
CO ₂	350×10 ⁻⁶	河北省定兴县固城镇	开顶式气室 (OTCs)	1993 年 4 月 6 日~6 月 4 日	冬小麦 (京冬 6 号)	1992 年 10 月 1 日~1993 年 6 月 7 日	1993 年 4 月 5 日
	700×10 ⁻⁶						
O ₃	50×10 ⁻⁹	河北省定兴县固城镇	开顶式气室 (OTCs)	1999 年 4 月 3 日~6 月 3 日	冬小麦 (京冬 6 号)	1998 年 10 月 3 日~1999 年 6 月 5~8 日	1999 年 3 月 31 日
	100×10 ⁻⁹						
	200×10 ⁻⁹						
	背景大气 AA 活性碳过滤 CF						

3 模型有效性检验及计算分析

3.1 DNDC 模型适用型检验

张宇^[13]曾利用山东泰安冬小麦试验资料验证 DNDC 模型,取得较好效果。为了使模型适用于华北地区,特别是在固城单点能取得较好效果,本研究首先对不考虑 O₃ 影响情况下的冬小麦生长模式做了修正。利用 1992~1993 年和 1998~1999 年冬小麦试验研究中背景环境大气下(CO₂

浓度为 350×10⁻⁶ (V/V), O₃ 浓度约为 40×10⁻⁹ (V/V),但模型中不考虑大气 O₃ 含量)的数据检验修正后的 DNDC 模型是否适用于固城站。

表 2 为 1993 年和 1999 年背景环境下冬小麦收获后茎干物重和产量的比较。从表中可以看出,除了 1999 年冬小麦产量误差超过 15%,其余的误差均在 10%以内,因为试验条件限制,缺少更多的试验样本进行检验,本文认为这样的误差是可以接受的,模拟效果理想。

表 2 冬小麦茎秆干物重和产量模拟结果与实测比较(kg/hm²)
Table 2 Simulated winter wheat stem biomass compare with the observed

年份	模拟茎干重	实测茎干重	误差(%)	模拟产量	实测产量	误差(%)
1993	3646.7	4028.2	-9.5	4410.8	4078.0	8.2
1999	3776.5	3999.0	-5.5	5102.9	6290.0	-18.8

图 1 和图 2 分别为 1993 年和 1999 年原模型、

修正模型对冬小麦生长过程模拟状况与实际观测的

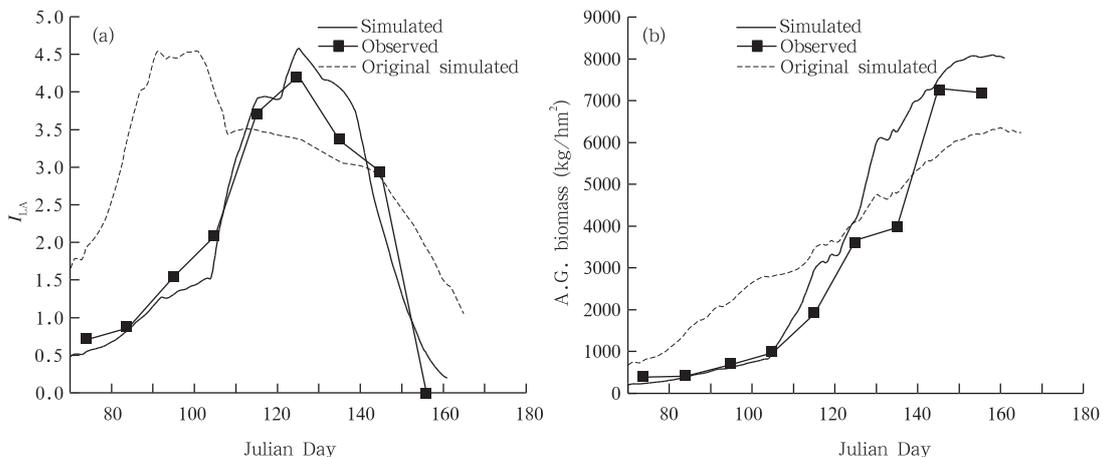


图 1 1993 年冬小麦叶面积(a)和地上部分生物量(b)模拟值和观测值比较

Fig. 1 Simulated winter wheat I_{LA} (a) and aboveground biomass (b) compare with the observed in 1993

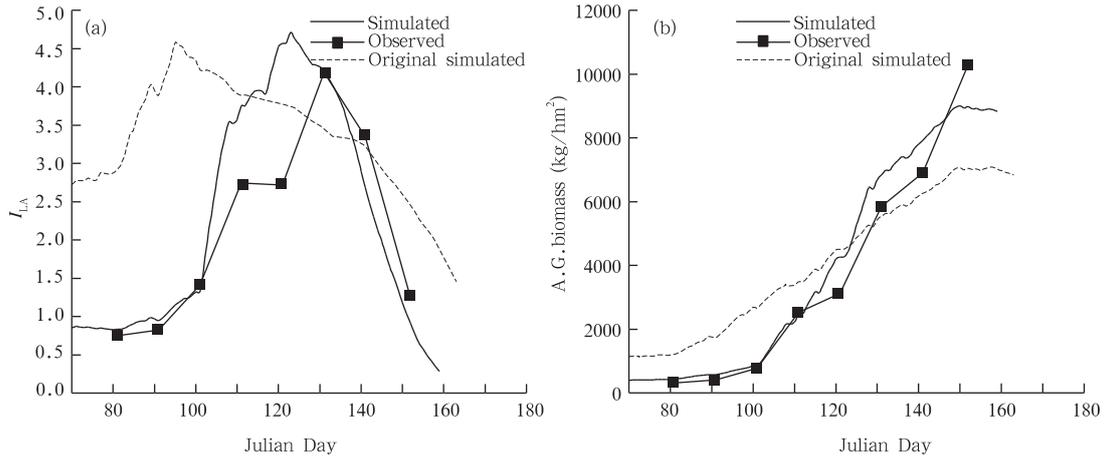


图 2 1999 年冬小麦叶面积和地上部分生物量模拟值和观测值比较

Fig. 2 Winter wheat simulated I_{LA} and aboveground biomass compare with the observed in 1999

比较。由图可以看出：原模型模拟的两年试验中冬小麦的叶面积指数都比实际观测提前达到峰值期，这是因为原模型中越冬期较短，与固城站实际情况相比，冬小麦较早返青生长，因而模拟结果中，冬小麦生长前期叶面积指数明显高于实际观测量；原模型对于生物量的模拟，在冬小麦生长前期明显高于观测值，在生长后期比观测值低，这说明原模型对同化物分配的模拟存在不合理的方面。经过修正的模型，对叶面积指数和生物量的模拟，变化趋势符合实际观测，模拟值接近观测值。因此，修正过的模型模拟效果较好，可以反映现有大气环境下固城站冬小麦生长状况，为模拟 CO_2 和 O_3 浓度变化对冬小麦影响，反映冬小麦生长对这两种气体浓度变化的敏感性，打下可靠的基础。

3.2 CO_2 浓度变化对冬小麦生长影响模拟结果及验证

针对原模型中已建立的 CO_2 浓度变化对冬小麦光合作用影响的模拟，本研究根据 1992~1993 年 CO_2 浓度变化对冬小麦影响的试验研究结果对模型进行验证。

图 3 和图 4 分别是 CO_2 浓度为 500×10^{-6} (V/V) 和 700×10^{-6} (V/V) 时冬小麦生长过程模拟状况与实际观测的比较。从图中可以看出，在这两种情况下，对于叶面积指数的变化，模拟状况和实际观测都相当一致，模拟效果很好。对于生物量的模拟，地上部分整体生物量的动态变化曲线与观测基本一致，但在生长后期，模拟值稍有偏大；这说明模型中所模拟的 CO_2 浓度上升造成光合作用加强、光合产物增多的程度可能比实际情况要大，因而造成产量比实际观测偏高。要验证是否如此，还需要更多的试验研究数据。

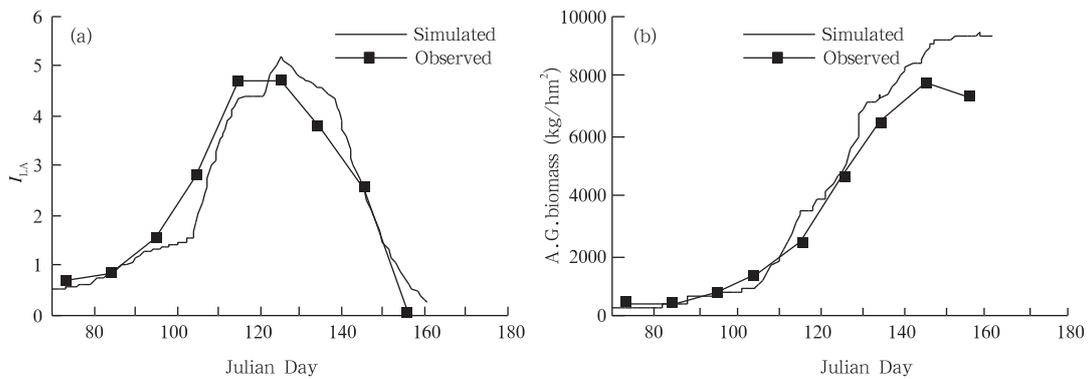
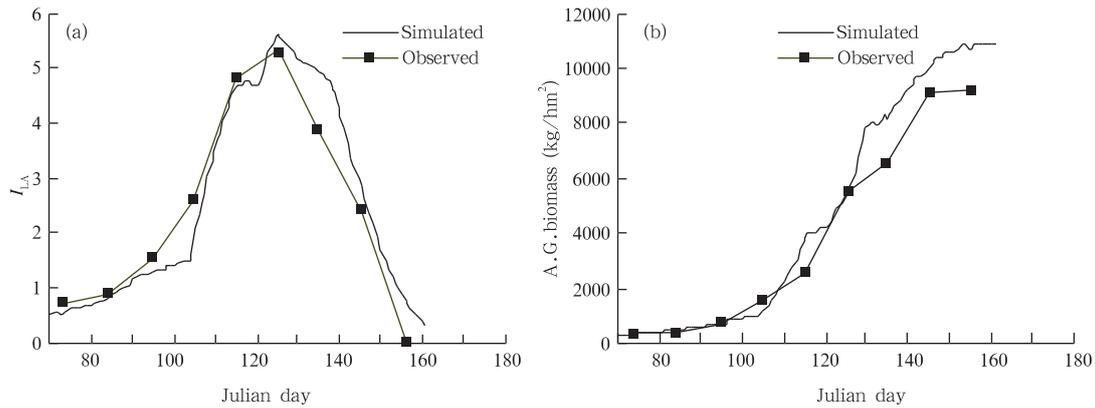


图 3 CO_2 浓度为 500×10^{-6} (V/V) 时冬小麦生长状况

Fig. 3 Winter wheat growth and development when $[CO_2]$ is 500×10^{-6} (V/V)

图 4 CO₂ 浓度为 700×10^{-6} (V/V) 时冬小麦生长状况Fig. 4 Winter wheat growth and development when $[\text{CO}_2]$ is 700×10^{-6} (V/V)

结合上述不同 CO₂ 浓度情景模拟的冬小麦生长发育和产量状况,可以看出 CO₂ 浓度上升对冬小麦的影响(图 5)。由图 5 中叶面积指数变化曲线图,可以看出不同 CO₂ 浓度对冬小麦叶面积增长的影响:在冬小麦营养生长前期,叶片生长较为缓慢,影响明显;到营养生长后期和生殖生长前期,叶面积快速增长,可以看出 CO₂ 浓度越高,叶面积增长越快;在冬小麦生长中后期,叶片处于衰老黄枯时期,

叶面积下降,最后三种浓度下的叶面积基本一样,说明了 CO₂ 浓度越高,叶片衰老的越快。无论是从叶面积变化量还是变化速度看,CO₂ 浓度升高对冬小麦叶面积影响明显,且浓度越高,影响越大。对于不同 CO₂ 浓度下冬小麦生物量变化曲线的比较,可以看出不同 CO₂ 浓度,冬小麦生长趋势曲线是一致的,符合作物生长规律,但随着 CO₂ 浓度上升,在生长后期各器官生物量明显上升,浓度越大,增长幅度越大。

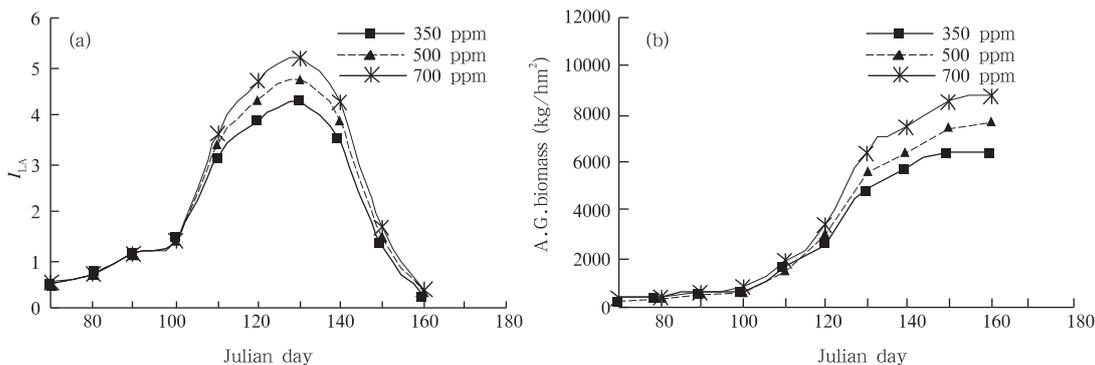
图 5 CO₂ 浓度上升对冬小麦生长和产量的影响Fig. 5 Impacts of $[\text{CO}_2]$ increasing on winter wheat growth and yield

表 3 给出了不同 CO₂ 浓度对冬小麦产量的影响,可以看出,CO₂ 浓度上升,冬小麦产量明显增加。但与实际观测相比,产量增加幅度过高,在 CO₂ 浓度为 500×10^{-6} (V/V) 时,模拟值随浓度变化量要比观测值高出 15% 之多,在 700×10^{-6} (V/V) 时也要高出 10%,这说明模型的模拟可能有不准确的地方,同时模型假设的作物生长环境如水分、温度和营养等与实际环境之间的差异影响也可能造成误差。参考周晓东(1999 年)^[14] 的研究成果,他认为当 CO₂ 浓度升高到 500×10^{-6} (V/V) 时,冬小麦生物

量可能增加 20%, 600×10^{-6} (V/V) 时增加量约为 30%,因此本文认为模型的结果是合理的。

表 3 不同 CO₂ 浓度对冬小麦产量(kg/hm²)影响比较Table 3 Impacts of $[\text{CO}_2]$ changes on winter wheat yields(kg/hm²)

CO ₂ 浓度($\times 10^{-9}$)	模拟值及比较(%)		观测值及比较(%)	
350	4410.8	0.0	4078.0	0.0
500	5201.7	17.9	4225.8	3.6
700	6069.3	37.6	5202.7	27.5

3.3 O₃ 浓度变化对冬小麦生长影响模拟及验证

3.3.1 两种不同方法模拟效果的比较

方法一:根据日本小林和彦等的研究成果,借鉴 O₃ 对水稻冠层太阳有效辐射利用率的影响;方法二:引进中国气象科学研究院刘建栋研究员的研究成果,将 O₃ 浓度对光合作用的直接影响加入到小麦光合作用模式中。

从方法一模拟的结果看出:O₃ 浓度为 50 × 10⁻⁹ (V/V) 时模拟效果较好,冬小麦叶面积指数变化和生长趋势与实际观测基本一致。但随着 O₃ 浓度上升,模拟效果变得不理想,当 O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 时,模拟的冬小麦生长中后期叶面积指数明显高于观测值,当浓度达到 200 × 10⁻⁹ (V/V) 时,模拟值高于观测值两倍之多;而对于生物量, O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 时,模拟值则明显低于观

测值,随着 O₃ 浓度增加,偏低的趋势越明显,偏差更大。从方法二模拟的结果看出:O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 和 200 × 10⁻⁹ (V/V) 时,也存在模拟的叶面积指数明显高于观测值的问题;但对于生物量的模拟效果要好得多,除了 O₃ 浓度为 200 × 10⁻⁹ (V/V) 时小麦生长后期的穗生物量偏高,其他的模拟结果都与实际观测比较一致。图 6 和图 7 以 O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 时为例,比较两种方法的模拟效果,可以看出,第二种方法要优于第一种方法。这可能是因为方法一是根据 O₃ 对水稻影响的资料建立的关系式,是否适用于冬小麦,有待于验证;从本文的结果看出,直接引用的效果不好,但若是根据大量冬小麦的试验资料,重新确定参数,也可能取得较好的效果。本文因为资料缺乏,不再重新确定系数,选用第二种方法,并在此基础上对叶面积

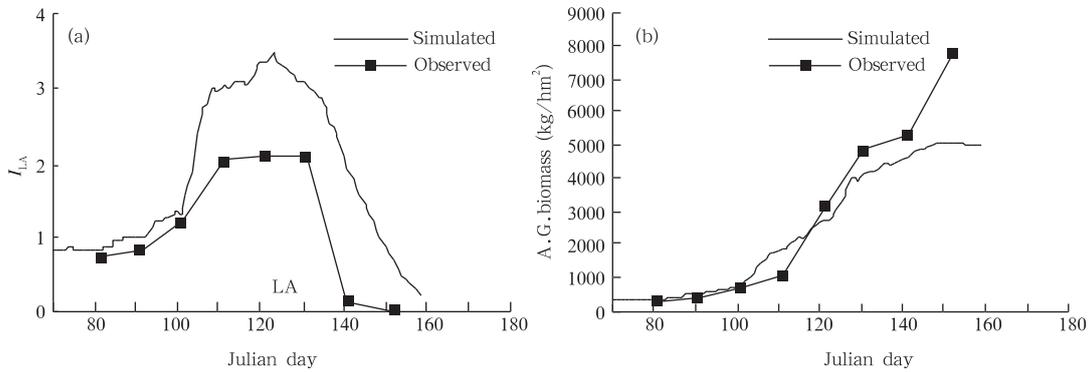


图 6 O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 时利用方法一模拟的冬小麦生长状况
Fig. 6 Simulated winter wheat growth and development when [O₃] is 100 × 10⁻⁹ (V/V) by the first method

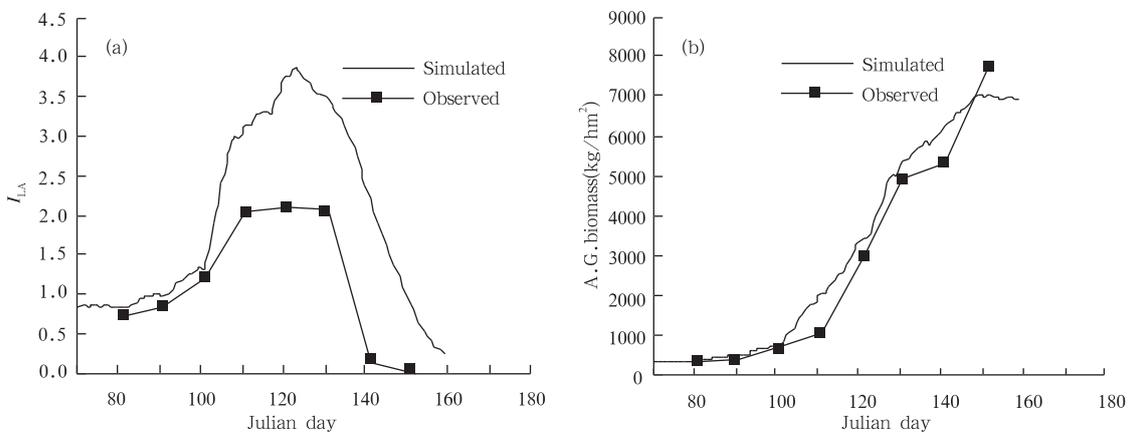


图 7 O₃ 浓度为 100 × 10⁻⁹ (V/V) 时利用方法二模拟的冬小麦生长状况
Fig. 7 Simulated winter wheat growth and development when [O₃] is 100 × 10⁻⁹ (V/V) by second method

模拟做进一步改进。

3.3.2 考虑 O_3 对叶片伤害, 进一步修改 O_3 影响模型并验证

在作物模型中引进 O_3 浓度变化对光合作用的直接影响, 较好地反映出了 O_3 对冬小麦生物量和产量的影响, 但不能反映出高浓度下冬小麦叶片的生长状况。为了更好的反应高浓度 O_3 暴露对冬小麦的影响, 需要进一步考虑 O_3 对冬小麦叶片的直接影响。

图 8, 9, 10 分别是考虑 O_3 对叶片影响后, O_3 浓度为 50×10^{-9} (V/V)、 100×10^{-9} (V/V)、 200×10^{-9} (V/V) 时模拟值与观测值的比较。从图中可以看出, 3 种浓度情况下模拟效果都比较好, 叶面积变

化与实际观测基本一致, 与仅考虑 O_3 对光合作用影响相比, 各器官生长趋势曲线和生物量大小也更接近观测值。因此, 对于 O_3 对叶面积伤害的考虑是必要的, 确定的影响系数是合理的。同时也存在一些问题: 当 O_3 浓度为 100×10^{-9} (V/V) 和 200×10^{-9} (V/V) 时, 在冬小麦生长后期, 模拟的叶面积指数变化下降趋势落后于实际观测, 这说明模型还不足以反映 O_3 所造成的叶片加快老化的影响; 对于高浓度 O_3 冬小麦生长模拟, 叶片、茎和叶器官的生长趋势符合作物生长实际状况, 在生长后期, 各器官生物量的模拟值与观测值相比偏低, 而穗生物量则高于观测值, 从地上部分整体生长趋势和生物量来看, 模拟结果和实际观测值是比较一致的。这

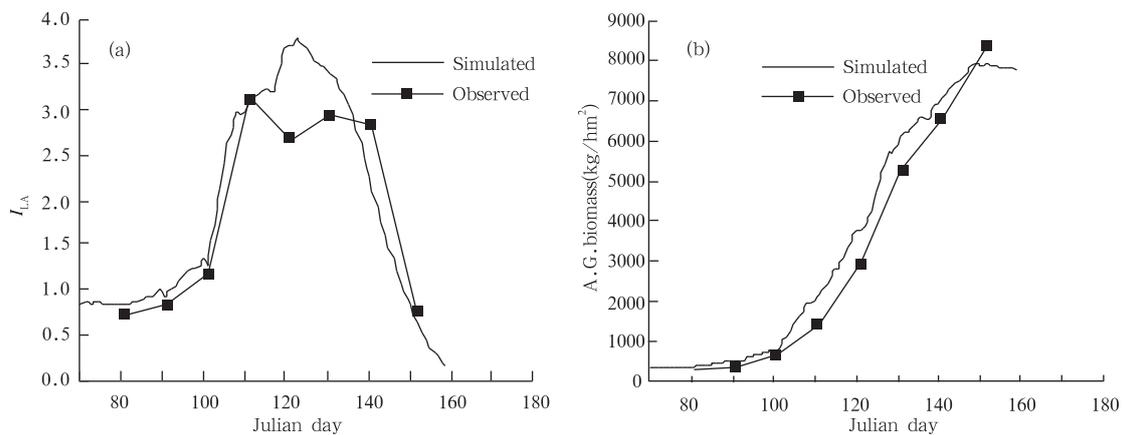


图 8 考虑 O_3 对叶片伤害, O_3 浓度为 50×10^{-9} (V/V) 模拟值与观测值比较
Fig. 8 Simulated I_{LA} and aboveground biomass compare with the observed when $[O_3]$ is 50×10^{-9} (V/V) by simulating O_3 's damage to leaves

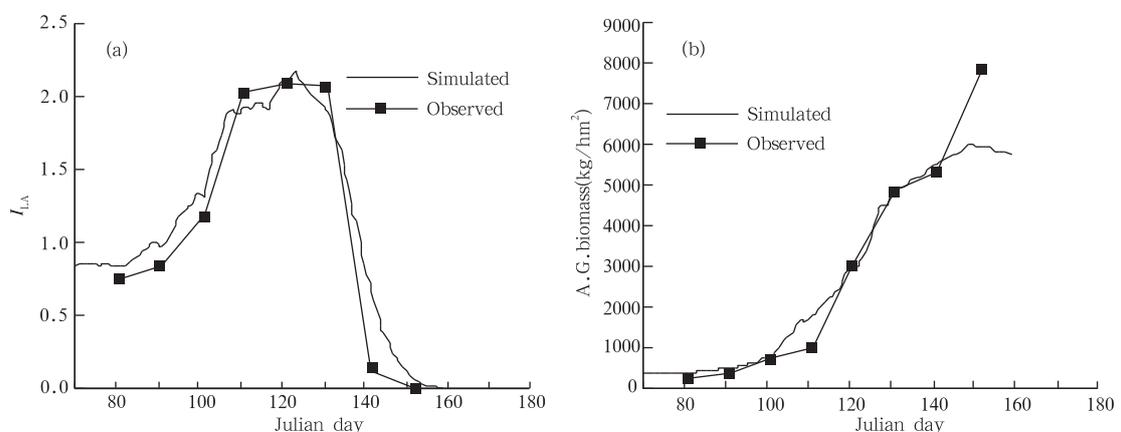


图 9 考虑 O_3 对叶片伤害, O_3 浓度为 100×10^{-9} (V/V) 模拟值与观测值比较
Fig. 9 Simulated I_{LA} and aboveground biomass compare with the observed when $[O_3]$ is 100×10^{-9} (V/V) by simulating O_3 's damage to leaves

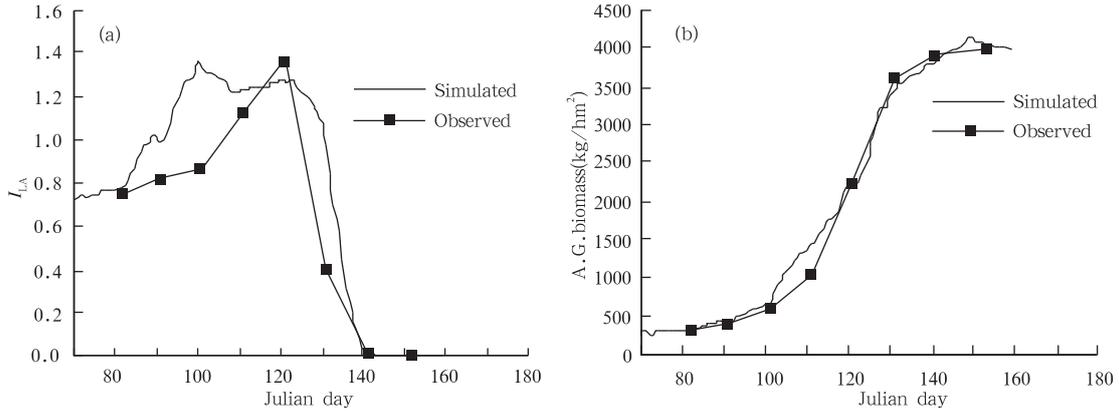


图 10 考虑 O₃ 对叶片伤害, O₃ 浓度为 200×10⁻⁹ (V/V) 模拟值与观测值比较
 Fig. 10 Simulated I_{LA} and aboveground biomass compare with the observed when [O₃] is 200×10⁻⁹ (V/V) by simulating O₃'s damage to leaves

除了可能是模型参数的确定不够准确造成的, 还可能是因为 O₃ 影响冬小麦同化物的分配^[15], 但由于这方面研究不多, 影响机制不明确, 模型没有考虑。

结合上述不同 O₃ 浓度环境下模拟的冬小麦生长发育和产量状况, 可以看出模型一定程度上反映出 O₃ 浓度上升对冬小麦的影响, 如图 11 所示。从图中看出: O₃ 浓度上升使冬小麦叶片受到严重伤害; 在生长后期, 冬小麦生物量下降, 籽粒产量下降,

浓度越高, 造成的损失越大。O₃ 浓度为 50×10⁻⁹ (V/V) 时, 冬小麦叶面积和生物量有所下降, 但伤害程度不大。当 O₃ 浓度达到 100×10⁻⁹ (V/V) 时, 在生长后期, 冬小麦叶面积迅速下降, O₃ 加速叶片老化, 使之提前死亡, 在浓度为 200×10⁻⁹ (V/V) 时更为明显; 在 O₃ 暴露下, 冬小麦的生物量下降, 籽粒产量明显下降, 浓度越高, 下降幅度越大, 但生长趋势曲线符合自然生长趋势。

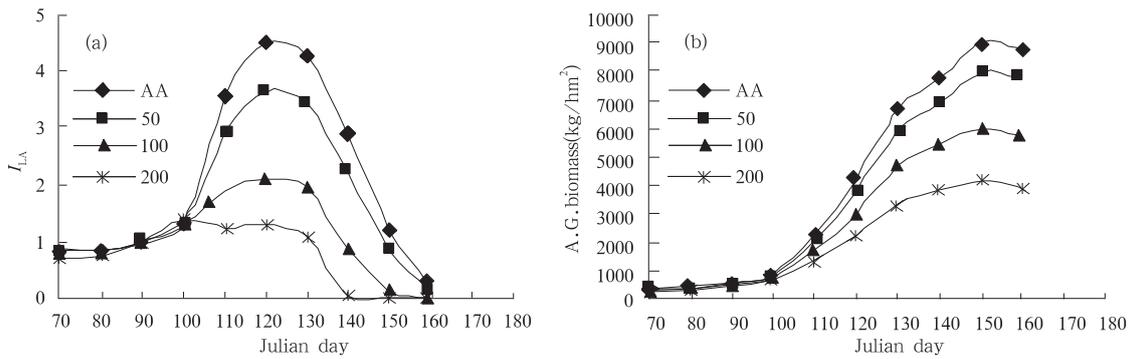


图 11 不同 O₃ 浓度对冬小麦生长影响
 (AA 是背景大气环境; 50 是 O₃ 浓度为 50×10⁻⁹ (V/V); 100 是 O₃ 浓度为 100×10⁻⁹ (V/V); 200 是 CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 200×10⁻⁹ (V/V))
 Fig. 11 Impacts of [O₃] changes on winter wheat yields (kg/hm²)

表 4 为不同 O₃ 浓度下冬小麦最终茎干重和产量及其变化量, 从表中可以看出, 高浓度的 O₃ 将严重影响冬小麦生长, 造成产量大幅度下降, 当 O₃ 浓度为 200×10⁻⁹ (V/V) 时, 茎生物量下降 50%, 籽粒产量下降 60% 左右, 但与试验数据中下降 60% 和 80% 相比, 模拟结果还不足以反映高浓度 O₃ 对冬小麦的伤害程度和造成的损失。

模拟结果反映出 O₃ 浓度上升影响冬小麦叶片生长, 叶面积指数明显低于正常大气环境下, 生物量下降; 高浓度 O₃ 暴露可导致冬小麦叶片提前死亡, 产量严重损失, 与试验研究结果^[9~10] 一致。试验研究发现, 在 O₃ 浓度增加的情况下冬小麦生育期缩短, 植株矮化, 但本文模型中冬小麦发育期主要有温度确定, 模型中没有进行株高的模拟, 所以无法直接

表 4 不同 O₃ 浓度对冬小麦产量影响(kg/hm²)Table 4 Impacts of [O₃] changes on winter wheat yields (kg/hm²)

处理	茎生物量		茎生物量		产量		产量	
	模拟值	变化量(%)	观测值	变化量(%)	模拟值	变化量(%)	观测值	变化量(%)
对照	3776.5	0.0	3999.0	0.0	5102.9	0.0	6290.1	0.0
50	3360.8	-11.0	2842.7	-28.9	4438.7	-13.0	5375.6	-14.5
100	2646.7	-29.9	2331.4	-41.7	3158.9	-38.1	2483.8	-60.5
200	1898.4	-49.4	1673.5	-58.2	2104.1	-58.8	1178.0	-81.3

反映,但冬小麦叶片老化加快,茎生物量下降可以对此有所体现。至于 O₃ 浓度上升是否会影响冬小麦同化物的分配和转移,由于机理研究和试验数据的限制,本研究不予考虑,这也可能是对地上部分整体生物量模拟好于单个器官的原因之一。

4 参数灵敏度分析

灵敏度分析可以显示计算结果是否与我们的设计和假设相一致,是否与一般知识和观测结果相一致,还可显示不同变量的总体影响情况。在前文中,不同 CO₂ 浓度和 O₃ 浓度下的模拟结果与实际观测的比较可以看出,模型对大气中这两种气体浓度变化反应灵敏,定量地反映了两种气体浓度变化对冬小麦产生的影响。这里,还将对温度以及 O₃ 和 CO₂ 对冬小麦综合影响进行分析。

4.1 温度的变化对冬小麦影响

温度是目前气候变化研究中主要考虑因素之一。本文以 O₃ 浓度为 50×10^{-9} 试验为例,在其他参数不变的条件下,假定冬小麦生长季内日平均气温分别升高和降低 1 °C, 2 °C, 模拟了温度变化对冬小麦发育期、产量和叶面积指数、叶片、茎和地上部分整体生物量的影响。

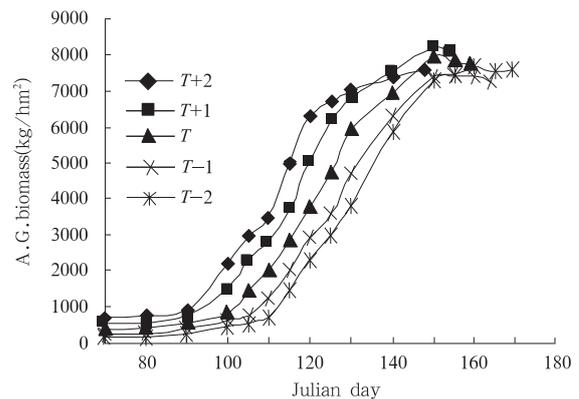
从表 5 和图 12 可以看出,温度升高,冬小麦生长速率加快,发育期变短,温度下降,冬小麦生长速率变慢,发育期延长;温度变化对产量影响的趋势不明显。因此,冬小麦生长对温度变化敏感,但受到的影响很复杂。这主要是因为:温度升高使冬小麦越冬期推迟,返青期提前,同时温度升高也能增强小麦的光合作用、提高其他资源(辐射、水分、肥料)的利用率,进而有助于营养生长期的干物质积累;但另一方面,温度过高时可造成高温逼熟导致减产,所引起的负效应就有可能大于升温所带来的正效应。温度降低冬小麦提前进入越冬期,并且温度降低不利于作物的光合作用;但由于越冬期延长,冬小麦的返青、拔节期推迟,进入春季温度稳定上升阶段,受霜

冻的机会减少,同时,可能延长灌浆期而增加产量。以上结果是在假设水分充足的情况下得出的,如果存在水分胁迫,或是温度变化引起降水的变化,将会产生更复杂的影响,同时温度变化对冬小麦的影响,还与作物品种特性有关。因此,气候变暖对冬小麦以及其他农作物将可能产生不利影响。

表 5 温度变化对冬小麦产量(kg/hm²)和发育期的可能影响

Table 5 Potential impacts of temperature change on winter wheat yield and development stage

温度变化量	产量及变化量(%)		发育期及变化量(d)	
+2 °C	4358.9	-1.8	238	-11
+1 °C	4767.0	+9.4	244	-5
0 °C	4438.7	0.0	249	0
-1 °C	3785.9	-20.6	254	+5
-2 °C	4142.9	+9.4	259	+10

图 12 温度变化对冬小麦的影响
Fig. 12 Potential impact of temperature change on winter wheat biomass

4.2 O₃ 和 CO₂ 浓度变化对冬小麦生长的综合影响

由于城市化发展、化石燃料的大量使用,大气中 O₃ 浓度和 CO₂ 浓度明显上升。从以往研究中可以看出,O₃ 浓度上升对冬小麦产生不利影响,造成产量损失;CO₂ 浓度上升,对冬小麦光合作用有利,促进产量增长。针对目前大气状况下,本文就这两种

气体浓度同时上升对冬小麦综合影响进行了简单的评估。为了检验 CO₂ 浓度上升引起的正效应是否能抵消 O₃ 浓度上升带来的负效应,本文以 1998~1999 年对照试验相关资料为模型输入数据,对这几种情景进行了比较:(1) 当前大气条件下不考虑 O₃ 和 CO₂ 浓度变化时冬小麦生长状况;(2) CO₂ 浓度倍增(700×10⁻⁶ (V/V)), O₃ 浓度为 50×10⁻⁹ (V/V);(3) CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 70×10⁻⁹ (V/V);(4) CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 80×10⁻⁹; (5) CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 100×10⁻⁹ (V/V);(6) CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 200×10⁻⁹ (V/V);(4) 不考虑 O₃ 影响下, CO₂ 浓度倍增时的冬小麦生长状况。

从图 13 和表 6 可以看出,与当前状况下比较,仅 CO₂ 浓度倍增时,冬小麦叶面积指数明显增加,在生长中后期,生物量迅速上升,最终产量增加幅度

达到 34.6%,这是因为 CO₂ 浓度上升促进冬小麦光合作用,增加同化物积累;当 O₃ 浓度为 50×10⁻⁹ (V/V)时,CO₂ 浓度上升的正效应明显高于 O₃ 浓度引起的负效应,冬小麦生长状态好于当前情况,产量高出 18.5%;当 O₃ 浓度为 70×10⁻⁹ (V/V)~80×10⁻⁹ (V/V)时, O₃ 浓度上升对冬小麦造成的负效应抵消 CO₂ 浓度倍增所带来的正效应;若 O₃ 浓度继续上升,则 O₃ 造成的损失将大于 CO₂ 倍增对冬小麦生长的促进作用,当 O₃ 浓度上升到 200×10⁻⁹ (V/V)时,冬小麦产量比当前情景下降 45.3%,这是因为当 O₃ 浓度升高时,破坏叶片细胞,使叶片甚至茎秆死亡,不可再恢复生长。因此,从总体上来看,在 O₃ 浓度上升程度不大的情况下,CO₂ 浓度上升仍可促进冬小麦的生长,但其反映机理如何发生还不清楚,尚待进一步研究;但当 O₃ 浓度很高时,使作物死亡,不可能恢复生长,仍将造成严重损失。

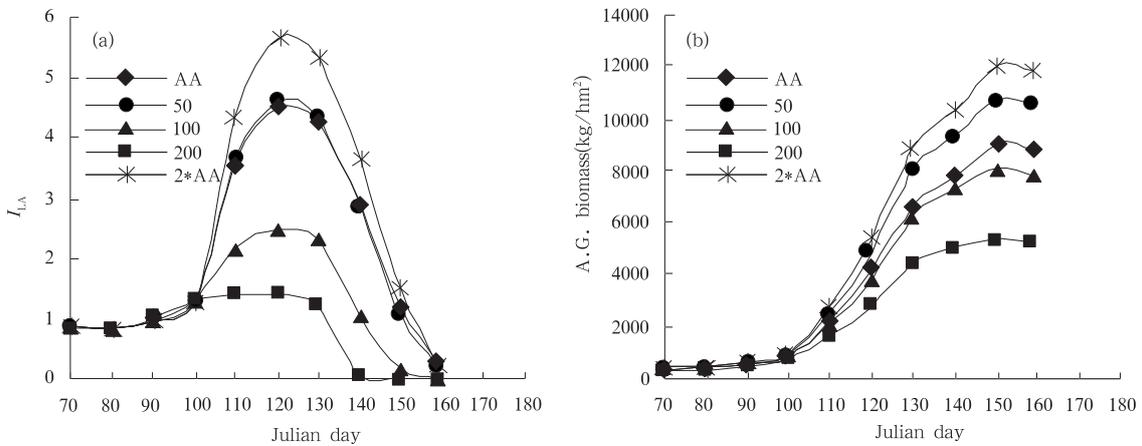


图 13 CO₂ 浓度倍增情况下 O₃ 浓度上升对冬小麦影响

(AA 为当前情况下不考虑 O₃ 和 CO₂ 浓度变化; 50 为 CO₂ 浓度倍增(700×10⁻⁶ (V/V)), O₃ 浓度为 50×10⁻⁹ (V/V); 100 为 CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 100×10⁻⁹ (V/V); 200 为 CO₂ 浓度倍增, O₃ 浓度为 200×10⁻⁹ (V/V)时; 2*AA 为不考虑 O₃ 影响, CO₂ 浓度倍增)

Fig. 13 Combined impacts of [O₃] and [CO₂] changes on winter wheat I_{LA} and biomass

表 6 O₃ 浓度变化和 CO₂ 浓度倍增对冬小麦的综合影响

Fig 6 Combined impacts of [O₃] and [CO₂] changes on winter wheat yield

CO ₂ 浓度	O ₃ 浓度	籽粒产量(kg/hm ²)及其变化(%)	
350	当前浓度	5102.9	0.0
700	当前浓度	6870.0	+34.6
700	50×10 ⁻⁹	6049.3	+18.5
700	70×10 ⁻⁹	5254.9	+3.0
700	80×10 ⁻⁹	4890.5	-4.2
700	100×10 ⁻⁹	4262.3	-16.5
700	200×10 ⁻⁹	2792.6	-45.3

5 结果和讨论

本文以农田生态系统碳氮生物化学模型(DNDC)为基础,根据国内外有关大气 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对作物影响的研究成果,在 DNDC 模型加入 O₃ 对冬小麦光合作用和叶片生长影响的模拟,改进 DNDC 模型,综合考虑了气象条件、CO₂ 和 O₃ 浓度变化等对冬小麦生长发育和产量形成的影响。通过对原 DNDC 模型适用性的调整,适用于固城站,为进一步改进作物模型打下了可靠的基础。利

用模型模拟了不同 CO₂ 浓度冬小麦的生长发育和产量形成状况,通过验证,取得了良好的效果,反映出 CO₂ 浓度上升增加光合产物、提高产量的有利影响。利用改进的 DNDC 模型模拟了不同 O₃ 浓度下冬小麦的生长发育和产量形成状况,通过试验资料的验证,模型较好的反映了 O₃ 浓度上升导致冬小麦叶面积下降,叶片加快老化、提前死亡,生物量下降,最终大幅度减产的试验观测事实。

本文建立的 O₃ 影响模型反映了 O₃ 对冬小麦生长过程动态的影响,与国外其他有过 O₃ 对作物影响的模型研究相比,有着鲜明的特点。与 Wellbull 方程等 O₃ 浓度-作物产量响应关系式的统计方法相比,本研究考虑了作物的生长过程,并一定程度上反映了 O₃ 对作物影响的机理,但 Wellbull 方程对产量损失评估可能比本模型更准确;与利用光化学模型输出的 O₃ 浓度与响应方程结合,评估作物产量、经济损失的模拟方法相比,优点与统计模型类似,不足是缺少对大气 O₃ 浓度的模拟;若将这两种模型的优点结合,则将连续预测大气中 O₃ 浓度变化与评估 O₃ 对生态系统影响融为一体,这将是我们的研究方向;与日本的 O₃ 影响下水稻生长模型相比,本模型考虑的作物生长的生理过程全面、详细,具有更强的机理性,更综合全面的反映了 O₃ 对作物的影响。

本文研究通过试验和模型模拟相结合的方法,系统分析了 O₃ 和 CO₂ 浓度可能的变化对冬小麦生长的影响,对评估全球环境变化对农作物的可能影响具有一定的理论指导意义;文中对于冬小麦的研究方法还可以在进行了其他农作物类似研究中起到参考借鉴作用。同时,本文研究处于初步阶段,机理理论和研究方法都还存在许多不足之处,在以后的研究中需要深入了解和不断改进。

(1) O₃ 和 CO₂ 对作物影响机理十分复杂,目前还有许多问题有待解释,因此 O₃ 和 CO₂ 对作物影响机理有待进一步研究,为模型发展提供依据。

(2) 本研究中用于模型验证的有关 CO₂ 和 O₃ 浓度变化对冬小麦影响试验都是在水分、肥料充足,管理措施良好的条件下进行的,考虑的是单因子影响;但实际环境中作物所处的农田生态系统是非常复杂的。因此,在未来研究中,将在模型中考虑 CO₂ 和 O₃ 以及温度、降水等环境因子之间的交互作用,考虑作物的水分胁迫、氮营养胁迫,使模型更符合实际生态环境。

(3) 本文采用的是大气平均 O₃ 浓度,但在实际大气中 O₃ 浓度变化很大,因此,应建立中国的 O₃ 光化学模型,将大气环流模型与作物模型结合,预测和评估大气中 O₃ 浓度的变化对地表作物影响。

(4) 本文的模型只针对固城单点,若是用于其他地区或是较大范围,需要进一步验证和改进;因为试验条件的限制,CO₂ 和 O₃ 对冬小麦试验研究均只进行了一年,用于验证模型不能充分说明模型的普遍性。另外,本文研究中的试验是在开顶式气室内进行的,与大田环境还有一定差距;因此,通过其他试验方法,获得大田环境下不同气候情景的试验数据,在此基础上建立模型,才更具有普遍性,更符合实际情景。

参考文献

- [1] Heck W C, Adams R M. A reassessment of crop loss from ozone. *Environment Science Technol*, 1983(a), 572-581
- [2] Larsen, R M, Heck, W W. An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reductions: part 8. an effective mean O₃ crop reduction mathematical model. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1984, 34: 1023-1034
- [3] Lesser, V M, Rawlings, J O et al. Ozone effects on agricultural crops: statistical methodologies and estimated dose-response relationships. *Crop Science*, 1990, 30: 148-155
- [4] Adams R M, Glyer S L, Johnson S L, et al. A reassessment of economic effects of O₃ on U. S. agriculture. *JAPCA*, 1989, 39: 960-968
- [5] Chameides W L. Growth of continental-scale metro-agro-plexes, Regional O₃ pollution, and world food production. *Science*, 1994, 264: 74-77
- [6] 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
- [7] 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 elevated ozone episodes. *Aust J Plant Physiol*, 2000, 27: 211-219
- [8] 王春乙, 郭建平, 白月明等. OTC-1 型开顶式气室 O₃ 发生、控制与测量系统及物理性能评价. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 383-384
Wang Chunyi, Guo Jianping, Bai Yueming, et al. O₃ produced, controlled and measured system and the estimate of physical capability of OTC-1. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, 11(3): 383-384

- [9] 白月明,郭建平. 水稻与冬小麦对臭氧的反应及其敏感性试验研究. 中国生态农业学报,2002,10(1):13~16
Bai Yueming, Guo Jianping, et al. The reaction and sensitivity experiment of O_3 on rice and winter wheat. Chinese Journal of Eco-Agriculture(in Chinese), 2002,10(1):13-16
- [10] 王春乙,郭建平,白月明. O_3 浓度增加对冬小麦影响的试验研究. 气象学报,2002,60(2):238~241
Wang Chunyi, Guo Jianping, Bai Yueming. The experimental study of the impacts of increasing O_3 concentration on winter wheat. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 2002,60(2):238-241
- [11] 白月明,王春乙. O_3 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 O_3 on pakchoi. Quarterly Journal of Applied Meteorology(in Chinese), 2002,13:(3), 364-370
- [12] 郑昌玲,王春乙. 近地层 O_3 和 CO_2 浓度变化对冬小麦影响的数值模拟: I 模型结构. 气象学报,2005,63(2):184~191
Zheng Changling, Wang Chunyi. numerical simulation study on the impacts of tropospheric O_3 and CO_2 concentrations changes on winter wheat: I model description. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2005,63(2):184~191
- [13] 张宇. 农田生态系统中碳、氮生物地球化学过程的模拟:[博士学位论文]. 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(in Chinese), 1999
- [14] 周晓东. 二氧化碳浓度增加对冬小麦生产直接影响和间接影响的数值模拟初步研究:[硕士学位论文]. 北京:中国气象科学研究院,1999
Zhou Xiaodong. Numerical simulation study on direct and indirect impacts of CO_2 concentration change on winter wheat: [Master paper]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese), 1999
- [15] 金明红,冯宗伟. 大气 O_3 浓度变化对农作物影响的实验研究:[博士学位论文]. 北京:中国科学院,2001
Jin Minghong, Feng Zongwei. The experimental study on the impacts of changes of atmospheric O_3 concentrations on crops:[Doctor paper]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (in Chinese),2001

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE IMPACTS OF CHANGES OF TROPOSPHERE O₃ AND CO₂ CONCENTRATIONS ON WINTER WHEAT: II SIMULATION RESULTS AND ANALYSES

Zheng Changling Wang Chunyi

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

With the rapid development of industrialization and urbanization, the increase of the troposphere ozone and carbon dioxide concentration at striking rates has adverse effects on biosphere, especially on crops. It is generally accepted that the increase of carbon dioxide concentration has beneficial effects on plant productivity while ozone is reported as the air pollutant most damaging to agricultural crops and other plant. The Model of Carbon and Nitrogen Biogeochemistry in Agroecosystems (DNDC) is adapted to evaluate simultaneously impacts of climate change on winter wheat. Growth development and yield formation of winter wheat under different O₃ and CO₂ concentration conditions were simulated with the improved DNDC model which structure has been described in another paper. Through adjusting the DNDC model applicability, winter wheat growth and development in Gucheng station was simulated well in 1993 and 1999, which was in favor of modifying the model further. The model was validated against experiment observation, including development stage data, leaf area index, single organ biomass and total aboveground biomass. Sensitivity tests demonstrated that the simulated results in development stage, biomass were sensitive to temperature change. The main conclusions of the paper were as follows: (1) Growth and yield of winter wheat under CO₂ concentration of 500×10^{-6} (V/V), 700×10^{-6} (V/V) and the current ozone concentration was simulated respectively by the model. The results were well fitted with the observed values from the OTCs experiment. The results indicated that the increase of concentration of CO₂ may improve the growth of winter wheat and elevate the yield. (2) The growth and yield of winter wheat under O₃ concentration of 50×10^{-9} (V/V), 100×10^{-9} (V/V), 200×10^{-9} (V/V) and the current CO₂ concentration were simulated respectively by the model. The simulated curves of the growths of stem, leaf and spike organs as well as leaf area index were well in agreement with the observed data. The results revealed that ozone has a detrimental effect on the growth and yield of winter wheat. Ozone accelerated the process of leaf senescence and caused the loss of the yield. Under very high ozone concentration, crops were affected dramatically and even dead. (3) At last, by the model the possible effects of changes of air temperature and the combined effects of O₃ and CO₂ were estimated respectively. The results showed that doubled CO₂ concentration may alleviate the negative effect of O₃ on biomass and yield of winter wheat when ozone concentration was about $70 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9}$ (V/V). The obverse effects of CO₂ were less than the adverse effects of O₃ when the concentration of ozone is up to 100×10^{-9} (V/V). Future work should determine whether it is applied to other species by adjusting the values of related parameters, and whether the model can be adapted to predict ozone effects on crops in farmland environment.

Key words: Ozone, Carbon dioxide, Winter wheat, Effect, Numerical simulation.