

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10
第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM_{2.5}垂直分布及输送 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)

聊城市冬季 PM_{2.5}中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM_{2.5}和 PM₁₀排放因子及碳组分源谱 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)

城市生活垃圾露天焚烧排放 PM_{2.5}中重金属污染特征及其暴露健康风险 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)

某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)

南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)

广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性 李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)

郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)

民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)

镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)

长江源区大气降水化学特征及离子来源 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)

连续极端降雨对东江流域水质影响分析 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)

基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)

金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)

太湖不同介质电导率时空变化特征 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)

太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)

岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 任坤, 潘晓东, 曾浩, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)

岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)

δ-MnO₂/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)

不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)

不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)

启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析 孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)

典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)

5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)

药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制 肖亮亮, 丁园 (4668)

磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)

生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征 黄福义, 周曙屹聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)

柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)

增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)

O₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)

2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)

《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)

O₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟

徐静馨^{1,2}, 郑有飞^{2*}, 王圣¹, 王立稳², 赵秀勇¹, 麦博儒³

(1. 国电环境保护研究院有限公司国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室, 南京 210031; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080)

摘要: 基于涡度相关系统, 并引入 O₃ 损耗半机制模型, 分析了南京地区冬小麦主要生育期总初级生产力(GPP)的变化, 并模拟了不同 O₃ 含量胁迫条件下冬小麦 GPP 的损耗。结果表明:①冬小麦 GPP 随其生育期变化, 呈现出“中间时段高, 前后期低”的分布趋势, 最大值为 40 μmol·(m²·s)⁻¹; ②基于高、低两种 O₃ 敏感度效应, 150、100 和 50 nL·L⁻¹ 组和本研究(CK 组)胁迫条件下, 冬小麦 GPP 损耗率分别为: -72%、-36%、-6%、-10% 和 -13%、-6%、-1%、-2%。损耗评估结果可为我国制定防御 O₃ 对作物伤害对策提供科学依据。

关键词: 臭氧(O₃); 总初级生产力(GPP); 冬小麦; 损耗; 涡度相关

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4725-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903038

Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field

XU Jing-xin^{1,2}, ZHENG You-fei^{2*}, WANG Sheng¹, WANG Li-wen², ZHAO Xiu-yong¹, MAI Bo-ru³

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Physical Modeling and Pollution Control, State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China)

Abstract: An eddy-covariance system combined with a semi-mechanistic model was used to analyze variations in gross primary productivity (GPP) and to simulate the impact of ozone (O₃) on GPP under different levels O₃ concentrations over a winter wheat field in Nanjing. The results showed that GPP was higher during the middle of the growth period and low during the early and late growth periods, reaching a maximum of 40 μmol·(m²·s)⁻¹. Using high and low ozone sensitivity settings, O₃-damage in 150, 100, 50 nL·L⁻¹ and control treatment (CK) reduced GPP by -72%, -36%, -6%, and -10%, and by -13%, -6%, -1%, and -2%, respectively. These results provide a scientific basis for formulating defense strategies for O₃ damage to crops.

Key words: ozone(O₃); gross primary productivity (GPP); winter wheat; damage effect; eddy-covariance

近地层臭氧(O₃)是主要的二次污染物, 对人类健康和陆地生态系统均有很强毒害作用^[1]. 有研究表明北半球平均 O₃ 浓度将从目前的 35 ~ 50 nL·L⁻¹ 可能上升至 2100 年的 60 nL·L⁻¹, 其中南亚和北亚(特别是中国东部地区)、中非和北美的生物多样性区域将面临高浓度 O₃ 胁迫的风险^[2,3]. O₃ 通过抑制植物气孔活动、降低其光合作用能力、改变其叶面积和总初级生产力(GPP), 从而对植物产生负效应, 并显著影响作物产量^[4-9]. 当前的 O₃ 浓度水平已经造成作物大幅度减产(例如大米、大豆、小麦、土豆和玉米等), 造成每年直接经济损失高达 11 ~ 18 亿美元^[10,11]. 小麦是一种对 O₃ 较为敏感的作物^[12], Van Dingenen 等^[13] 计算出全球因 O₃ 胁迫造成的小麦减产率达 12%. 因此, 准确评估 O₃ 污染对农作物的影响是提升全球粮食安全的迫切

需求.

O₃ 对作物的伤害是由累积效应造成的, 开展 O₃ 对作物产量的影响及其风险评估需要相应的指标和模型. 早期研究主要从最初的 O₃ 浓度响应和剂量响应模型, 发展到基于开顶式气室(OTC)和 FACE 大田试验资料开展的通量响应模型, 近年来一些结合作物产量统计及机制的模型开始得到应用^[14-19]. 但评估 O₃ 对农作物产量影响的结果仍存在较大的不确定性, 大多数评估模型主要是基于 O₃ 浓度和剂量及作物产量损失建立的统计模型, 而对 O₃ 损耗的机制模拟研究还较少. O₃ 对作物的

收稿日期: 2019-03-05; 修订日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475108, 41771498)

作者简介: 徐静馨(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境和应用气象, E-mail: xjx_0718@163.com

* 通信作者, E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

负效应包含对作物光合速率和气孔活动的双重破坏,从而使作物 GPP 下降,最终导致产量的损失.与统计模型不同,损耗机制模型主要分为两个部分,一是 O_3 破坏作物的光合作用和气孔活动, O_3 会阻碍作物的光合速率和气孔吸收通量,而气孔在被破坏的同时控制着进入叶片的 O_3 和 CO_2 通量;二是影响作物的碳分配和产量的响应. O_3 对碳吸收的损耗,会导致碳分配的总量减少,影响同化物累积,最终影响作物的产量.刘建栋等^[20]将光合作用和气孔调节模型进行了耦合,考虑了 O_3 和 CO_2 等对作物光合作用的影响.郑昌玲等^[21]以生物化学模型为基础,加入了 O_3 对光合作用的影响,建立了 O_3 、 CO_2 对作物产量形成的模型.姚芳芳等^[22]确立了 O_3 对叶片光合速率的影响函数,并以此建立了 O_3 对作物产量形成影响的模型. Stiche 等^[15]首次将 O_3 对光合作用和气孔吸收通量的影响耦合起来,作物叶片气孔受损的同时会抑制进入叶片的 O_3 和 CO_2 通量. Yue 等^[23]基于 Stiche 等^[15]的 O_3 损耗机制模型,评估了美国地区不同植被类型的 GPP 损耗比例.这些研究从臭氧损耗原理出发,将作物的碳吸收和产量形成相结合,为有效地建立和改进 O_3 损耗机制模型奠定了基础. O_3 损耗机制模型既考虑了 O_3 对作物光合作用和气孔吸收通量的影响,也具有时间累积效应和伤害阈值的确立,因此成为评估 O_3 胁迫对农作物影响的重要手段.

基于此,本文利用涡度相关系统观测的通量数据,并引入了 O_3 损耗半机制模型,开展了不同 O_3 浓度胁迫条件下的冬小麦 GPP 损耗模拟,以期为我国制定防御 O_3 对作物伤害对策提供科学依据,对更好地指导我国粮食生产和保障国家粮食安全也具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于南京信息工程大学盘城镇永丰生态试验地(32°19'N, 118°71'E, 海拔 22 m),为稻麦轮作区.该站周围相对较为开阔平坦,面积约为 150 m(长)×265 m(宽),构成了较大范围均一的下垫面,基本满足试验要求的盛行风方向的风浪区要求;属于北亚热带季风性气候,四季分明,日照资源较丰富.年均气温 15℃,其中 7 月最高,为 28.6℃,1 月份最低,为 3.4℃.年降雨量在 737.3~1 658.3 mm 之间,平均为 1 106 mm;太阳辐射强度为 4 500 MJ·(m²·a)⁻¹.供试作物为冬小麦——扬麦 13 号(*Triticum aestivum* L. cv. Yangmai 13),由江苏里下河农业科学研究所提供,为当地主要品

种,于 2015 年 11 月上旬撒播,至 2016 年 6 月 6 日成熟收割.

1.2 试验仪器

本试验于 2016 年 3 月 16 日至 5 月 30 日(冬小麦主要生育期:拔节期-抽穗期-扬花期-灌浆期-成熟期)进行连续观测.观测仪器主要为涡度相关系统,由 H_2O/CO_2 浓度红外分析仪(LI-7500, LI-COR, USA)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, USA)、快速化学发光 O_3 分析仪(FOSV12, Sextant, New Zealand)、慢速紫外 O_3 分析仪(EC9810- O_3 , Casella Measurement, England)和 CR3000 数据采集器组成.传感器和采样口安装在距地面 7 m 高度.系统昼夜连续自动采集数据,原始采样频率是 10 Hz,由 CR3000 数据采集器自动存储并在线计算每 30 min 平均动量、感热、潜热、 H_2O 、 CO_2 和 O_3 通量的初步结果.涡度相关系统观测通量的同时,也对常规气象要素进行了观测,包含太阳总辐射(TBQ-5A, JWF, 中国上海)、四分量净辐射(CNR4, Kipp & Zonen, the Netherlands)、空气温湿度(HOBO U23-001 data-logger, Onset Computer, USA)、风速风向、降水量、土壤温湿度(Watchdog, 2900ET, Spectrum Technologies, USA)和 5 cm、10 cm 的土壤热通量(HFP01SC, Hukseflux Thermal Sensors B. V.)等.其中光量子通量密度(PPFD)由 TBQ-5A 仪器观测的瞬时总辐射($W \cdot m^{-2}$)转换而来.具体仪器介绍参照文献[24].

1.3 通量数据处理方法

本研究在分析数据前对原始通量数据做了必要的质量控制,主要包括原始通量数据的校正、删除和插补.数据校正均基于 Eddypro[®] 通量处理软件(Eddypro 6.00, Lincoln, NE, USA),包括坐标轴旋转校正、通量的延迟时间校正、超声虚温和密度响应校正、湍流积分统计特性检验、平稳时间序列谱分析(主要包括功率谱分析和协谱分析)、能量闭合分析和通量贡献区分析.对于数据删除,去除大于 3 倍方差的异常数据(2.1%);去除湍流积分统计特性检验结果中非中性条件下的数据(4.6%);去除 O_3 浓度过低($< 1 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$)的数据(2.2%);去除湍流发展不充分情况下[摩擦速度(u^*) $< 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$])的数据(13.2%).经过剔除后的通量数据占原始数据的 77.9%.观测期间由于断电、仪器故障或恶劣天气等外界因素的干扰导致了部分缺省数据,以及 22.1%的剔除数据.因此对以上数据进行了插补.小于 3 h 的缺省的通量数据,直接采用线性插补方法进行插补^[25];大于 3 h 的缺省的通量数据,采取平均昼夜变化法^[26],对缺省数

据采用临近天(采用 7 d 为滑动窗口)同时刻观测数据的滑动平均值进行插补。

对涡度相关系统所观测的 CO₂ 通量值(F_c)的数据进行插补主要分为白天和夜间 2 种不同方法。白天数据(08:00 ~ 18:00)和夜间时间分布根据双曲线方程和指数方程进行插补。

双曲线方程用于模拟白天 F_c (即白天 NEE, NEE_d) 随 PPFD 的响应过程, 公式如下^[27]:

$$NEE_d = \overline{R_{gd}} - \frac{a_1 \times PPFD}{a_2 \times PPFD} \quad (1)$$

式中, NEE_d 取值为白天且无降雨的 CO₂ 通量值 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; $\overline{R_{gd}}$ 为白天生态系统呼吸平均值 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 即为 PPFD = 0 时的截距; a_1 为光饱和时的最大光合吸收率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; a_2 为半饱和光强时光合吸收率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$].

夜间 F_c 也可表示为夜间生态系统呼吸通量 (R_{gn}) 与 5 cm 土壤温度的指数关系式^[27]:

$$R_{gn} = F_{c,15} \times Q_{10}^{(T_s-15)/10} \quad (2)$$

式中, R_{gn} (即夜间 F_c) 取值为夜间 $u^* \geq 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且无降雨的 CO₂ 通量值 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; $F_{c,15}$ 是土壤温度为 15°C 下 CO₂ 通量值 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], Q_{10} 是敏感性系数; T_s 是 5 cm 土壤温度 (°C). 该拟合方程同时被用于生态系统白天呼吸通量 (R_{gd}) 的计算。

总初级生产力 (GPP) 是生态系统呼吸通量 (R_g) 与净生态系统交换通量 (NEE) 的差值. 具体公式为:

$$GPP = R_g - NEE \quad (3)$$

1.4 作物 GPP 损耗的计算方法

Stich 等^[15] 提出了可以估算 O₃ 损耗的半机制模型, 即同时考虑 O₃ 胁迫对光合作用和气孔导度的双重影响. 在该模型的基础上, 将原模型中的净碳同化量 (A_{net}) 参数更换为 GPP, 同时气孔导度也是通过 GPP 计算, 则作物 GPP 损耗的计算方法如下:

$$A = F \times GPP \quad (4)$$

式中, A 为光合损耗量 [以 C 计, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; F 为减小的比例, 具体计算公式如下:

$$F = 1 - \alpha \times U_{>O_3T} \quad (5)$$

式中, α 为损耗敏感性系数 ($\text{mmol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), 采用了高、低两种 O₃ 敏感度. 由于冬小麦是 C3 类作物, α 的取值^[15] 分别为: $\alpha_{\text{高}} = 1.4 \text{ mmol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $\alpha_{\text{低}} = 2.5 \text{ mmol}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $U_{>O_3T}$ 是有效气孔吸收 O₃ 通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 计算公式为:

$$U_{>O_3T} = \max[(F_s - O_3T), 0] \quad (6)$$

式中, F_s 为气孔吸收 O₃ 通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; O_3T 为 O₃ 对作物产生伤害的阈值通量^[23], 取值为 $5 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

$$F_s = \frac{[O_3]}{r_b + k \cdot r'_s} \quad (7)$$

式中, $[O_3]$ 是冠层 O₃ 浓度 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$); r_b 是叶片边界层阻力, 取值为 $1138 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ^[14]; k 是叶片对 O₃ 阻力和对水蒸气阻力的比率, 取值为 1.67 ^[15]; r'_s 是气孔阻力 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 公式如下:

$$r'_s = \frac{1}{F \cdot G_{sto}} \quad (8)$$

$$G_{sto} = b \times GPP \quad (9)$$

式中, G_{sto} 是通过本试验涡度相关系统观测的冬小麦气孔 O₃ 导度 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], b 为干燥条件下 (即相对湿度 < 60%) 时的气孔导度与 GPP 的斜率, 具体计算和结果详见文献^[28]. 当冬小麦受到 O₃ 胁迫时, 进入到其叶片的 O₃ 通量使 $F < 1$, 当气孔阻力增大时 GPP 减小, 此时叶片在减少 O₃ 吸收的同时也减少了碳的累积, 因此该公式比 Stich 等^[15] 原模型更能直观反映出 O₃ 胁迫下冬小麦光合生产和气孔导度相互协同的作用. 假设 O₃ 导致的光合速率和气孔通量的损耗程度是相同的, 根据公式 (4) ~ (9) 形成闭合方程组, 可求解出 F 的值, 从而得到 GPP 损耗率.

2 结果与分析

2.1 观测期间 GPP 的变化过程

图 1 是冬小麦主要生育期 GPP 的时间序列和平均日变化过程. 从中可以看出, GPP 随着冬小麦的生育期变化, 呈现出“中间时间段高, 前后期低”的分布趋势. 在 76 ~ 90 d (冬小麦拔节期) 时 GPP 在 $20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 左右, 到 90 ~ 120 d 时 GPP 显著增大, 最大值为 $40 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 此时是抽穗-灌浆期, 为冬小麦较为旺盛的时期, 冬小麦田表现出强 CO₂ 吸收; 120 d 以后 GPP 又逐渐减小, 这主要因为是该时期趋于冬小麦成熟期, 光合能力逐渐减弱. 从 GPP 平均日变化过程看, 从早上 08:00 开始迅速增大, 至中午达到最大值 [$16.65 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 后迅速减小.

2.2 不同 O₃ 含量胁迫下冬小麦气孔和有效气孔吸收 O₃ 通量

为了解和区分不同 O₃ 含量胁迫下冬小麦气孔吸收 O₃ 通量和有效气孔吸收 O₃ 通量对 GPP 损耗的影响, 将 O₃ 含量分为以下 3 个水平: 定值 50

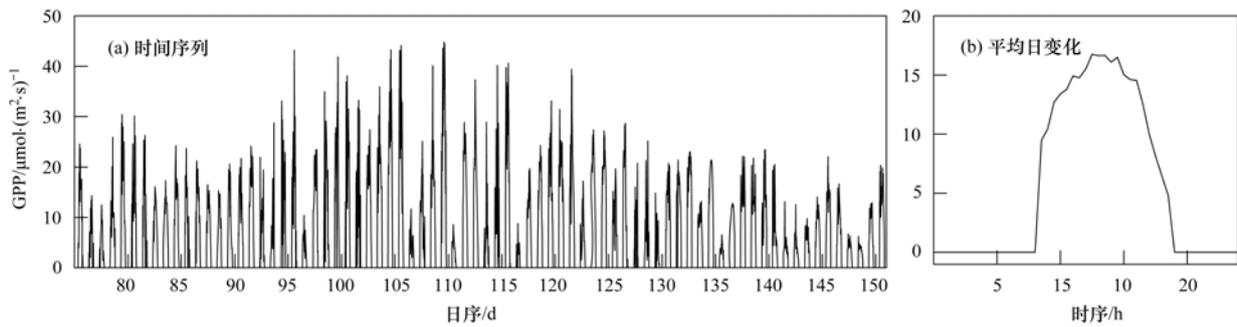


图1 冬小麦主要生育期 GPP 的时间序列和日变化过程

Fig. 1 Time series and diurnal mean variations in gross primary productivity (GPP) of winter wheat

$\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组、定值 $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组和定值 $150\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组,其中本试验观测的 O_3 含量作为对照组(定义为CK组:白天平均 O_3 含量为 $44.5\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围为 $1\sim 124\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$).对于 O_3 含量水平设置的主要依据:①目前国内外大部分此类研究都采用这样的浓度,便于处理计算;②基于中国区域大气本底站瓦里关山、龙凤山和临安的实际观测结果;长三角地区白天的大气本底值已接近或超过 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ [29-31];③试验田较长时间的观测结果,含量分别为 $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $150\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 大致为农田本底含量的2倍和3倍,也是一般认为的 O_3 对作物伤害阈值的2~3倍.图2和图3分别是不同 O_3 浓度胁迫下累积气孔吸收 O_3 通量(DF_s)及气孔吸收 O_3 通量(F_s)的平均日变化过程和累积有效气孔吸收 O_3 通量($\text{DU}_{>\text{O}_3\text{T}}$)的时间序列及有效气孔 O_3 通量($U_{>\text{O}_3\text{T}}$)的平均日变化过程.

从图2(a)可见,CK组与 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组的 DF_s 结果几乎重合,150、100、 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和CK组最终

DF_s 分别为 32.51 、 21.67 、 10.83 和 $10.7\text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$;对比图3(a),CK组的 $\text{DU}_{>\text{O}_3\text{T}}$ 在105 d后略高于 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组,且 $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $150\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组的 $\text{DU}_{>\text{O}_3\text{T}}$ 也均在105 d附近大幅度增加,150、100、 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和CK组最终的 $\text{DU}_{>\text{O}_3\text{T}}$ 分别为 19.74 、 9.80 、 1.58 和 $2.77\text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.对比图2(b)和图3(b)可看出,不同 O_3 水平下的 F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 均呈现出明显的日变化特征,由于作物叶片的气孔一般在夜间关闭,因此夜间 F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 均为0,150、100和 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组的 F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 日变化趋势相似, F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 自09:00开始增大,至下午14:00分别达到最大值后减小. CK组的 F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 日变化过程略有不同,与 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组对比发现: F_s 和 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 在早晨至中午(08:00~11:00)增长速度小于 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组; F_s 在中午至下午的变化趋势与 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组接近,但 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 在中午至下午变化趋势明显高于 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组.不同 O_3 浓度水平下 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 的最大值均集中在每天的13:00~16:00时段.

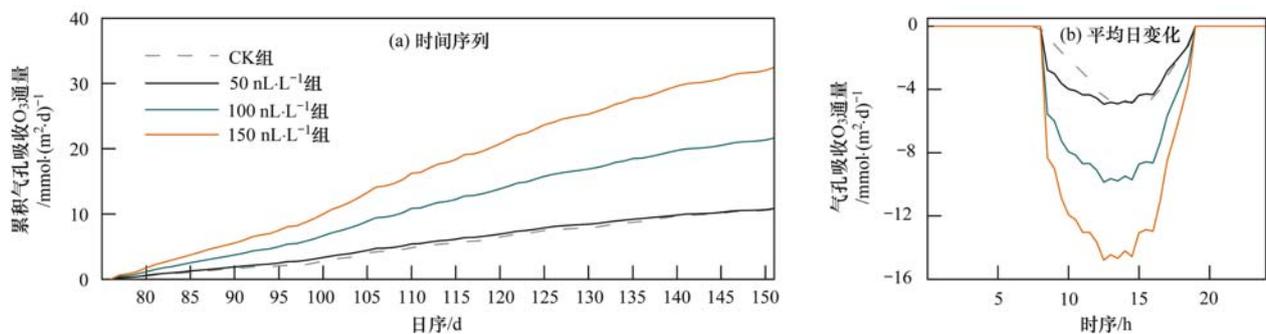


图2 不同 O_3 浓度胁迫下冬小麦累积气孔吸收 O_3 通量(DF_s)的时间序列和气孔吸收 O_3 通量(F_s)的平均日变化过程

Fig. 2 Time series variation of cumulative stomatal ozone flux (DF_s) and diurnal mean variation of stomatal ozone flux (F_s) under different ozone concentrations

2.3 不同 O_3 浓度胁迫下基于高、低敏感度效应的冬小麦 GPP 损耗评估

结合公式(4)~(9),计算了冬小麦不同 O_3 浓度在高、低 O_3 敏感度效应下的日均 $U_{>\text{O}_3\text{T}}$ 及其对应的日均 GPP 损耗量和无 O_3 胁迫下的 GPP 产生量

(图4).从图4(a)中可以看出,150、100、 $50\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和CK组基于高、低 O_3 敏感度效应的日均气孔 O_3 通量分别为: 0.62 、 0.21 、 0.017 、 $0.03\text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 0.11 、 0.036 、 0.003 、 $0.005\text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.图4(b)中无 O_3 胁迫效应是指作

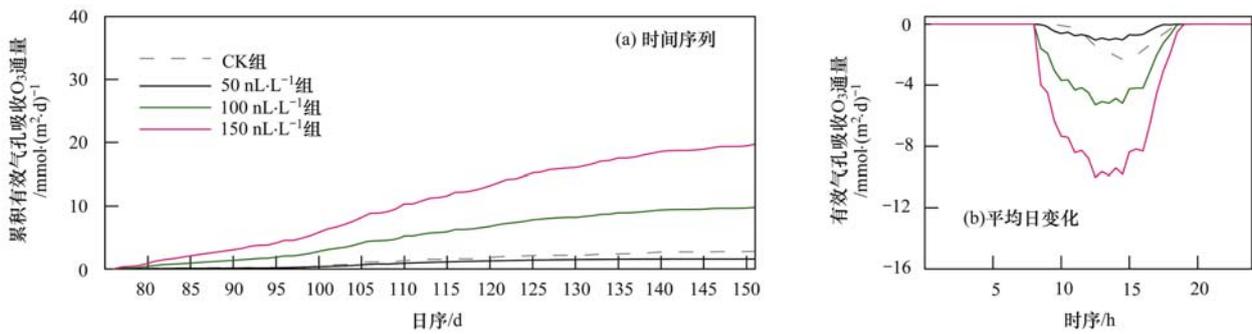


图3 不同 O₃ 浓度胁迫下冬小麦累积有效气孔吸收 O₃ 通量 (DU_{>O_{3T}}) 时间序列变化和有效气孔 O₃ 通量 (U_{>O_{3T}}) 的平均日变化过程

Fig. 3 Time series variation of cumulative effective stomatal ozone flux (DU_{>O_{3T}}) and diurnal mean variation of effective stomatal ozone flux (U_{>O_{3T}}) under different ozone concentrations

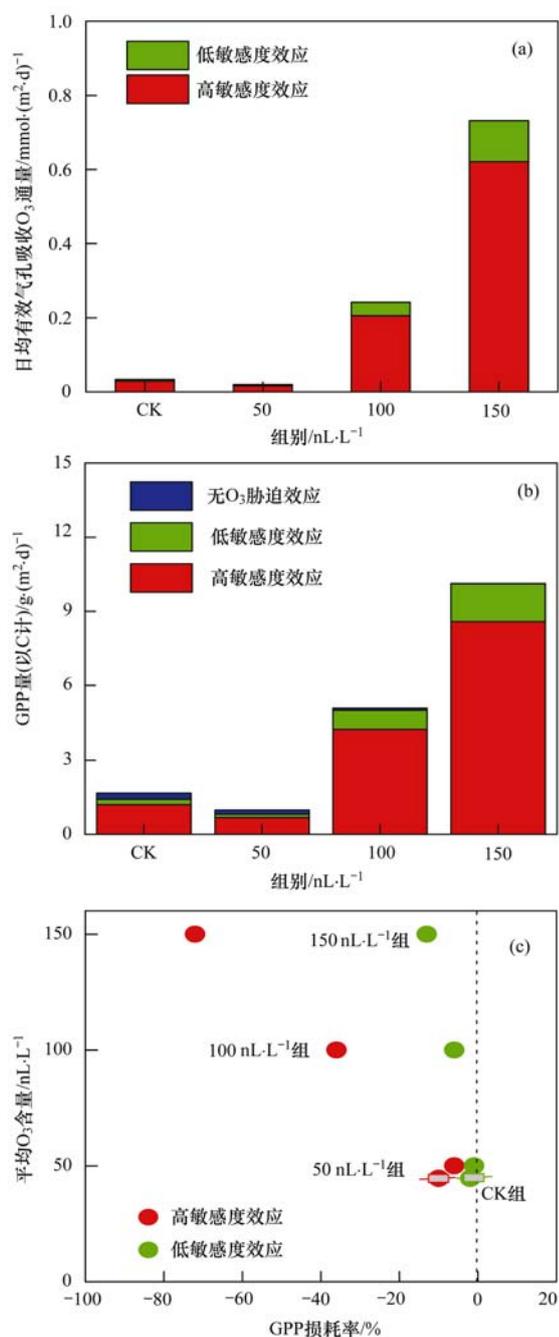
物小于 O₃ 对其伤害的阈值通量 [即 $F_s < 5 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 150、100、50 nL·L⁻¹ 和 CK 组在无 O₃ 胁迫效应的日 GPP 产生量 (以 C 计, 下同) 为 0.019、0.087、0.163 和 0.253 g·(m²·d)⁻¹. 150、100、50 nL·L⁻¹ 和 CK 组基于高、低敏感度效应的日均 GPP 损耗量分别为 8.58、4.26、0.68、1.20 g·(m²·d)⁻¹ 和 1.53、0.76、0.12、0.21 g·(m²·d)⁻¹. CK 组日均 U_{>O_{3T}} 约是 50 nL·L⁻¹ 组的两倍, 最终导致日均 GPP 损耗量也近似是 50 nL·L⁻¹ 组的两倍. 在气孔 O₃ 导度一定的情况下, 对比 50、100 和 150 nL·L⁻¹ 组, 当 O₃ 含量呈一定倍数增加时, 日均 U_{>O_{3T}} 变化并不呈相应地倍数增加, 例如 100 nL·L⁻¹ 组的 O₃ 含量是 50 nL·L⁻¹ 组的 2 倍, 但前者 U_{>O_{3T}} 是后者的 6 倍多; 其中日均 GPP 损耗量与 U_{>O_{3T}} 增加的倍数相似, 说明 GPP 的变化与 U_{>O_{3T}} 密切相关.

图 4(c) 是不同 O₃ 含量胁迫下基于高、低 O₃ 敏感度效应的 GPP 损耗率. 从中看出, GPP 损耗率随 O₃ 浓度增加而增大的. 150、100、50 nL·L⁻¹ 组基于高、低 O₃ 敏感度效应的冬小麦 GPP 损耗率分别为: -72%、-36%、-6% 和 -13%、-6%、-1%; CK 组基于高、低 2 种 O₃ 敏感度效应的冬小麦 GPP 损耗率分别为 -10% 和 -2%. 50 nL·L⁻¹ 组和 CK 组的 O₃ 浓度均值接近, GPP 损耗率也差别不大, CK 组作为对照组, 其 GPP 损耗率对 50 nL·L⁻¹ 组的结果具有一定参考价值.

3 讨论

本研究在利用涡度相关系统观测的通量数据和 O₃ 损耗半机制模型的基础上, 对不用 O₃ 含量胁迫下的冬小麦 GPP 损耗进行了模拟. 该方法主要以气孔吸收的 O₃ 通量为基础, 考虑了 O₃ 破坏了冬小麦的光合作用和气孔活动, O₃ 可直接降低和抑制光合速率和气孔运动, 气孔被破坏的同时又控制着进

入叶片的 O₃ 通量和 CO₂ 通量, 造成对碳吸收的损耗, 进一步降低碳同化物的累积, 从而使冬小麦 GPP 和产量减少. 选择了 3 种不同 O₃ 含量水平 (定值 50 nL·L⁻¹ 组、定值 100 nL·L⁻¹ 组和定值 150 nL·L⁻¹ 组) 模拟计算得到了 GPP 损耗率, 将本试验观测的 O₃ 含量作为 CK 组 (白天均值 44.5 nL·L⁻¹), 接近定值 50 nL·L⁻¹ 组, 为对比模型结果有一定意义, 冬小麦是 C3 类植物, 对 O₃ 胁迫较为敏感^[12], 本研究选择了高、低两种 O₃ 敏感度效应方案. 本研究中发现气孔 O₃ 通量和有效气孔 O₃ 通量的变化并不相同. 在相同冬小麦气孔 O₃ 导度的条件下, O₃ 含量越高, 累积气孔吸收 O₃ 通量和累积有效气孔 O₃ 通量越大, 其中当 O₃ 含量一定时, 累积气孔吸收 O₃ 通量与累积有效气孔 O₃ 通量变化趋势并不相同. 通过对比 50 nL·L⁻¹ 和 CK 组的结果发现, CK 组的平均 O₃ 含量与 50 nL·L⁻¹ 组接近且略小, 但是有效气孔 O₃ 通量却更大, 尤其在每天的午后 [图 3(b)], 说明该段时间内 CK 组的 O₃ 含量是高于或远远高于 50 nL·L⁻¹, 因此在评估 O₃ 对植物胁迫效应的时候, 需要考虑 O₃ 含量的日变化过程, 研究指出 O₃ 含量随着太阳辐射强度的增加及大气中的光化学反应的增强而不断上升, 并于 15:00 ~ 16:00 达到峰值^[32]. 这些结果也同样证实了 O₃ 对作物的影响是一个不断累积的过程, 其自身细胞壁抗坏血酸盐等抗氧化剂会清除部分 O₃, 只有当作物气孔 O₃ 吸收通量累积超过某一临界阈值时, 才会对作物造成显著的影响^[33,34]. 通过本研究得出以下 4 个结论: ①在气孔 O₃ 导度相同的条件下, 略高的 O₃ 平均含量并不意味着最终 GPP 损耗量越大; ②在相同的气孔吸收 O₃ 通量条件下, 有效气孔吸收 O₃ 通量并不相同; ③在气孔 O₃ 导度相同的条件下, 有效气孔吸收 O₃ 通量的增加比例与 O₃ 含量的增加比例并不相同. ④有效气孔吸收 O₃ 通量是控制作物最终 GPP 损耗的主要因素.



(a) 日均有效气孔吸收 O_3 通量 ($U_{>O_3T}$); (b) 无 O_3 胁迫效应下日均 GPP 产生量和基于高、低 O_3 敏感度的日平均 GPP 损耗率; (c) GPP 损耗率

图 4 不同 O_3 浓度胁迫下基于高、低 O_3 敏感度效应的变化

Fig. 4 Variations in ozone concentrations under high and low ozone sensitivity model settings

本研究不同 O_3 含量胁迫下基于高、低两种 O_3 敏感度效应的 GPP 损耗率范围为 $-6\% \sim -72\%$ 和 $-1\% \sim -13\%$. 与其他研究相比, Yue 等^[23] 利用相同方法评估了 O_3 对北美不同生态系统碳吸收的影响并指出, 美国东部地区 GPP 损耗平均为 $-4\% \sim -8\%$, 而在工业排放相对密集的中部地区可达到 $-11\% \sim -17\%$. 冬小麦及其他作物的研究中也开展了很多光合损耗的试验, 对本研究有一定的借

鉴对比作用. 冬小麦研究中 Feng 等^[7] 指出: 当 O_3 含量为 $55 nL \cdot L^{-1}$ 时, 平均光合损耗率为 -12.9% ; Biswas 等^[35] 指出当 O_3 含量为 $82 nL \cdot L^{-1}$ 时, 光合损耗率为 $-12\% \sim -35\%$; 郑有飞等^[6] 指出当 O_3 含量为 $100 nL \cdot L^{-1}$ 时, 光合损耗率为 $-8.2\% \sim -38.2\%$; 当 O_3 含量为 $150 nL \cdot L^{-1}$ 时, 光合损耗比例为 $-5.8\% \sim -42.5\%$. 其他作物的研究中: Pang 等^[36] 在水稻田研究指出当 O_3 含量为 $54 nL \cdot L^{-1}$ 时, 光合损耗比例为 $-8.4\% \sim -22.7\%$; Yuan 等^[37] 在油豆角田研究中指出当 O_3 含量为 $80 nL \cdot L^{-1}$ 时, 光合损耗比例为 $-4.5\% \sim -38.8\%$. 本研究当 O_3 含量为 $50 nL \cdot L^{-1}$ 时, GPP 损耗率为 $-1\% \sim -6\%$, 与之前的研究结果相比有些低估; 当 O_3 含量为 $100 nL \cdot L^{-1}$, GPP 损耗率为 $-12\% \sim -36\%$, 在之前的研究结果范围之内; 当 O_3 含量为 $150 nL \cdot L^{-1}$ 时, GPP 损耗率为 $-13\% \sim -72\%$, 明显高于之前的研究结果, 表明利用该模型计算的结果可能低估了低含量 O_3 的胁迫效应, 而高估了高含量 O_3 胁迫对作物的影响. 作物本身有一定的解毒、防御和夜间的修复能力, 因此在一定程度上会高估 O_3 的胁迫效应, 因此现有研究采用有效气孔吸收 O_3 通量指标, 是指作物吸收的 O_3 通量超过某一个设定的伤害阈值时才会对其产量等造成损失, 没有 O_3 吸收或其值较低时将不会抑制光合作用. 之前的研究表明伤害阈值通量范围为 $2 \sim 14 nmol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ 时^[14,17,38~40], 与不同作物产量损失相对值的相关性最高, 并没有给出统一的伤害阈值通量取值. 不同作物类型、不同生育期和气象因子的差异, 均会影响作物对 O_3 的清除能力, 即使同一种作物, 由于品种间的不同, 对 O_3 的胁迫响应也会存在差异^[41]. 有研究指出伤害阈值通量是光合速率的函数, 随光合能力的变化而变化^[42]. 本文选择的 $5 nmol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ 是定值, 并不能动态地反映出作物本身对 O_3 的解毒能力, 从而可能导致了 GPP 损耗低估或高估现象的存在. 此外, 气孔吸收通量由 O_3 含量和气孔导度共同决定, 在 O_3 含量一定时, 主要取决于气孔导度. 本研究的气孔导度是基于 GPP 计算的, 气孔导度与 GPP 的相关性为 0.81 ^[28], 因此该方法在一定程度上造成了气孔导度计算的误差, 从而导致了 GPP 损耗率的低估或高估. 需要指出的是本研究 $50 nL \cdot L^{-1}$ 组的 GPP 损耗率与 CK 组的结果相似, 表明利用该模型计算的结果具有一定的可靠性, 但仍需要开展更多的观测试验用于校正耗损机制的参数, 采用动态的伤害阈值通量, 得到我国不同作物类型相匹配的数值, 以此

来评估 O₃ 胁迫对我国农业生态系统碳吸收的影响。

4 结论

利用涡度相关系统观测的通量数据并结合 O₃ 损耗半机制模型, 对不同 O₃ 含量胁迫的冬小麦 GPP 损耗进行了模拟, 主要结果如下: 冬小麦 GPP 随其生育期变化, 呈现出“中间时段高, 前后期低”的分布趋势, 最大值为 40 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 150、100 和 50 $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组基于高、低两种 O₃ 敏感度效应的冬小麦 GPP 损耗率分别为: -72%、-36%、-6% 和 -13%、-6%、-1%; 本研究(CK 组)的 GPP 损耗率分别为 -10% 和 -2%。

参考文献:

- [1] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, *et al.* Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(2): 396-424.
- [2] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Sicard P, Anav A, De Marco A, *et al.* Projected global ground-level ozone impacts on vegetation under different emission and climate scenarios [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(19): 12177-12196.
- [4] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 170-175.
Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Effects of elevated ozone on biomass and yield of rice planted in open-top chamber with revolving ozone distribution [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 170-175.
- [5] 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.
- [6] 郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦光合作用、膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1643-1651.
Zheng Y F, Hu C D, Wu R J, *et al.* Effects of ozone stress upon winter wheat photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant systems [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1643-1651.
- [7] Feng Z Z, Pang J, Kobayashi K, *et al.* Differential responses in two varieties of winter wheat to elevated ozone concentration under fully open-air field conditions [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(1): 580-591.
- [8] Payne R J, Stevens C J, Dise N B, *et al.* Impacts of atmospheric pollution on the plant communities of British acid grasslands[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2602-2608.
- [9] Proietti C, Anav A, De Marco A, *et al.* A multi-sites analysis on the ozone effects on gross primary production of European forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **556**: 1-11.
- [10] Ashmore M, Toet S, Emberson L. Ozone-a significant threat to future world food production[J]. *New Phytologist*, 2006, **170**(2): 201-204.
- [11] Avnery S, Mauzerall D L, Liu J F, *et al.* Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2284-2296.
- [12] Wang X K, Zhang Q Q, Zheng F X, *et al.* Effects of elevated O₃ concentration on winter wheat and rice yields in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **171**: 118-125.
- [13] Van Dingenen R, Dentener F J, Raes F, *et al.* The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 604-618.
- [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**(14): 3022-3040.
- [15] Sitch S, Cox P M, Collins W J, *et al.* Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink [J]. *Nature*, 2007, **448**(7155): 791-794.
- [16] LRTAP Convention. Mapping Manual 2004. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risk and trends[EB/OL]. <http://icpvegetation.ceh.ac.uk>. Chapter 3. Mapping critical levels for vegetation[M]. 2010.
- [17] 佟磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 等. 冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较分析[J]. *生态学报*, 2012, **32**(9): 2890-2899.
Tong L, Feng Z W, Sudebilige, *et al.* Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(9): 2890-2899.
- [18] Feng Z Z, Sun J S, Wan W X, *et al.* Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **193**: 296-301.
- [19] 赵辉, 郑有飞, 李硕, 等. 麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5315-5325.
Zhao H, Zheng Y F, Li S, *et al.* Long term variations of ozone concentration of in a winter wheat field and its loss estimate based on dry matter and yield [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5315-5325.
- [20] 刘建栋, 周秀骥, 于强. 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[J]. *气象学报*, 2002, **60**(6): 715-721.
Liu J D, Zhou X J, Yu Q. Numerical simulation of the influence of O₃, CO₂ and spectrum variation on the photosynthesis of crop canopy [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(6): 715-721.
- [21] 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 C L, Wang C Y. 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.
- [22] 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 F F, Wang X K, Ouyang Z Y, *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.

- [23] Yue X, Unger N. Ozone vegetation damage effects on gross primary productivity in the United States [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(17): 9137-9153.
- [24] 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 等. 冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4427-4437.
Xu J X, Zheng Y F, Zhao H, *et al.* Ozone deposition and risk assessment for a winter wheat field: partitioning between stomatal and non-stomatal pathways[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4427-4437.
- [25] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 479-492.
- [26] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **107**(1): 43-69.
- [27] Kowalski S, Loustau D, Berbigier P, *et al.* Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe[J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(10): 1707-1723.
- [28] 徐静馨, 郑有飞, 麦博儒, 等. 基于涡度相关法的麦田 O₃ 干沉降及不同沉降通道分配的特征[J]. *植物生态学报*, 2017, **41**(6): 670-682.
Xu J X, Zheng Y F, Mai B R, *et al.* Characteristics and partitioning of ozone dry deposition measured by eddy-covariance technology in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, **41**(6): 670-682.
- [29] 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.
- [30] 杨关盈, 樊曙先, 汤洁, 等. 临安近地面臭氧变化特征分析[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 31-35.
Yang G Y, Fan S X, Tang J, *et al.* Characteristic of surface ozone concentrations at Lin'an [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(3): 31-35.
- [31] 金赛花, 樊曙先, 王自发, 等. 青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(3): 198-202.
Jin S H, Fan S X, Wang Z F, *et al.* The variation characteristics of surface ozone concentration at Waliguan in Qinghai[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(3): 198-202.
- [32] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- [33] Feng Z Z, Kobayashi K, Ainsworth E A. Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(11): 2696-2708.
- [34] 梁晶, 曾青, 朱建国, 等. 开放式臭氧浓度升高对水稻叶片气体交换和荧光特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(4): 991-995.
Liang J, Zeng Q, Zhu J G, *et al.* Effects of O₃-FACE (ozone-free air control enrichment) on gas exchange and chlorophyll fluorescence of rice leaf[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(4): 991-995.
- [35] Biswas D K, Xu H, Li Y G, *et al.* Genotypic differences in leaf biochemical, physiological and growth responses to ozone in 20 winter wheat cultivars released over the past 60 years[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(1): 46-59.
- [36] Pang J, Kobayashi K, Zhu J G. Yield and photosynthetic characteristics of flag leaves in Chinese rice (*Oryza sativa* L.) varieties subjected to free-air release of ozone [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **132**(3-4): 203-211.
- [37] Yuan X Y, Calatayud V, Jiang L J, *et al.* Assessing the effects of ambient ozone in China on snap bean genotypes by using ethylenediurea (EDU) [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **205**: 199-208.
- [38] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, *et al.* Quantification of ozone exposure and stomatal uptake-yield response relationships for soybean in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 710-720.
- [39] Danielsson H, Karlsson G P, Karlsson P E, *et al.* Ozone uptake modelling and flux-response relationships-an assessment of ozone-induced yield loss in spring wheat [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 475-485.
- [40] Wu R J, Zheng Y F, Hu C D. Evaluation of the chronic effects of ozone on biomass loss of winter wheat based on ozone flux-response relationship with dynamical flux thresholds [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **142**: 93-103.
- [41] 张巍巍, 王光华, 王美玉, 等. 东北春大豆品种东生1号对臭氧胁迫的响应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1473-1478.
Zhang W W, Wang G H, Wang M Y, *et al.* Responses of soybean cultivar Dongsheng-1 to different O₃ concentrations in Northeast China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1473-1478.
- [42] Massman W J. Toward an ozone standard to protect vegetation based on effective dose: a review of deposition resistances and a possible metric [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(15): 2323-2337.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PNA Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	Ji Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)