

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

冬小麦田 O_3 气孔与非气孔沉降及风险评估

徐静馨¹, 郑有飞^{1,2*}, 赵辉¹, 储仲芳², 黄积庆², 袁月²

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 为了深入了解农田生态系统的 O_3 干沉降过程, 并基于 O_3 通量(尤其是气孔 O_3 累积通量)指标进行风险评估, 利用涡度相关系统对冬小麦田的 O_3 干沉降过程进行了连续动态观测, 初步分析 O_3 浓度和总 O_3 通量的变化过程, 着重探析气孔 O_3 沉降和非气孔 O_3 沉降的变化特征及其与主要气象因子的关系, 并基于剂量指标(AOT40)和通量指标(DF_{06})分别推算出冬小麦的产量损失率。结果表明, 观测期间(自2016年3月16日至5月30日)日平均 O_3 浓度(c_{O_3})为 $32.9 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$; 白天(08:00~18:00)和夜间平均总 O_3 通量(F_{O_3})分别为 $-7.6 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-3.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日均 F_{O_3} 为 $-5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。逐日平均气孔 O_3 通量(F_s)的变化范围为 $0 \sim -5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日均 F_s 为 $-1.43 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。逐日平均非气孔 O_3 通量(F_{ns})的变化范围为 $-1.43 \sim -10.31 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日均 F_{ns} 为 $-3.66 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。较强的太阳辐射(SR)、较高的温度(T)和适度湿润的条件有利于冬小麦气孔沉降; 较强的SR、适度的 T 和湿润条件是有利于冬小麦非气孔沉降。在整个观测期间, 总 O_3 累积吸收通量(DF_{O_3})、气孔 O_3 累积吸收通量(DF_s)和非气孔 O_3 累积吸收通量(DF_{ns})分别为 31.58 、 9.99 和 $21.59 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$, 总 DF_s 和总 DF_{ns} 分别占总 DF_{O_3} 的 32% 和 68% 。通过剂量指标 AOT40 和通量指标 DF_{06} 响应方程计算出的冬小麦产量损失率分别为 $11.58\% \sim 20.37\%$ 和 $20\% \sim 23.56\%$ 。

关键词: O_3 干沉降; 冬小麦; 气孔与非气孔 O_3 沉降通道; 产量损失评估

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4427-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702122

Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field: Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways

XU Jing-xin¹, ZHENG You-fei^{1,2*}, ZHAO Hui¹, CHU Zhong-fang², HUANG Qi-qing², YUAN Yue²

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To better understand the ozone deposition and risk assessment over agroecosystems based on the ozone flux indices, an eddy-covariance system was used for measuring the ozone deposition continuously and dynamically in a winter wheat field. We analyzed the variations in ozone concentration, total ozone flux, and stomatal and non-stomatal flux. The relationships between stomatal/non-stomatal ozone deposition velocity and the main meteorological factors were investigated. Finally, the yield losses of winter wheat based on the ozone-dose index (AOT40) and ozone flux index (DF_{06}) were calculated. Results showed that average daily ozone concentration (c_{O_3}) was $32.9 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$. The daytime (08:00-18:00) and nighttime total ozone flux (F_{O_3}) were $-7.6 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $-3.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively, and the mean diurnal F_{O_3} was $-5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. The mean daily stomatal ozone flux (F_s) and non-stomatal ozone flux (F_{ns}) ranged from 0 to $-5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and from -1.43 to $-10.31 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. The mean diurnal F_s and F_{ns} were $-1.43 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $-3.66 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. High solar radiation (SR), high temperature (T), and moderate humidity were used to analyze stomatal ozone deposition; high SR, moderate T , and high humidity were suitable to analyze non-stomatal ozone deposition. The cumulative total ozone flux (DF_{O_3}), cumulative stomatal ozone flux (DF_s), and cumulative non-stomatal ozone flux (DF_{ns}) were 31.58 , 9.99 , and $21.59 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ during the entire experimental period, and DF_s and DF_{ns} accounted for 32% and 68% of DF_{O_3} . The ranges of yield loss in winter wheat were estimated at $11.58\% \sim 20.37\%$ and $20\% \sim 23.56\%$ using different assessment models based on the ozone dose index AOT40 and ozone flux index DF_{06} , respectively.

Key words: ozone dry deposition; winter wheat; stomatal and non-stomatal pathways; yield risk assessment

近年来, 由于人类活动造成的 NO_x 和 VOCs 等的排放量迅速增加, 近地层背景臭氧(O_3)浓度不断升高, 其中北半球中纬度地区的 O_3 以每年 $0.5\% \sim 2.5\%$ 的速度增长^[1]。作为一种对植物有很强毒性的

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475108, 41575110); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0837)

作者简介: 徐静馨(1985~), 女, 博士, 主要研究方向为大气环境, E-mail: jingxin.xu@mail.utoronto.ca

* 通信作者, E-mail: xjx_0718@163.com

强氧化剂, O_3 可以通过气孔或非气孔被植物吸收, 造成植物生理和生化的改变, 阻碍植物的光合生产, 加速植物老化和形成叶片可见的损伤^[2~11]. 这些负效应直接导致了作物的减产和随之而来的经济损失. 预计到 2030 年, 小麦将减产 10.6% ~ 15.6%, 玉米减产 4.5% ~ 6.3%, 大豆减产 12.1% ~ 16.4%, 每年的经济损失将高达 120 ~ 350 亿美元^[12].

O_3 一般通过干沉降的方式进入陆地生态系统, 总 O_3 干沉降通量一般分为气孔 O_3 沉降通量与非 O_3 气孔沉降通量. 在叶片尺度, 气孔 O_3 沉降不仅被认为是主要的 O_3 沉降通道^[13, 14], 而且是造成植物损伤的重要原因, 其中气孔的开闭主要受气象因子, 如太阳辐射、温湿度和土壤含水量等影响. 非气孔沉降包括表面沉降、土壤沉降和化学分解沉降通道, 约占总 O_3 干沉降通量的 30% ~ 70%^[15]. 因此准确区分气孔与非气孔 O_3 沉降量及其分配比对进行 O_3 风险评估有着重要的现实意义.

O_3 对植物的伤害是由累积效应造成的, 开展臭氧对作物产量损失的影响及其风险评估需要确立可靠的 O_3 风险评估指标. 为了这个目标, 从最初的浓度响应和剂量响应模型, 发展到基于 OTC 和 FACE 大田试验资料开展的通量响应模型^[9, 16~20], 以及基于自然农田生态系统的观测和干沉降模型研究^[21~23]. 欧洲普遍采用 O_3 剂量指标 AOT40, 即大气中 O_3 浓度高于 40 $nL \cdot L^{-1}$ 时的小时累计效应指数. 由于 AOT40 忽略了植物的气孔 O_3 吸收, 在 O_3 浓度较高的地区容易造成 O_3 危害的明显高估^[24], 因此为了达到更为准确的 O_3 风险评估, 单一使用 AOT40 是不够的, 必须结合 O_3 通量指标, 尤其是植物气孔累积吸收的 O_3 通量.

冬小麦是我国主要粮食产物之一, 且是一种对 O_3 影响比较敏感的作物^[25, 26]. 目前我国长三角地区 O_3 浓度快速增长, 是 O_3 污染严重的区域^[27, 28]. 鉴于此, 本研究基于涡度相关技术观测南京地区冬小麦田的 O_3 干沉降过程, 初步分析 O_3 浓度和总 O_3 干沉降通量的变化过程, 着重探析气孔 O_3 沉降和非气孔 O_3 沉降的变化特征及其与主要气象因子的关系, 并基于剂量指标 AOT40 和通量指标(气孔 O_3 累积吸收通量)分别推算出冬小麦的产量损失, 以期为该领域的后续研究提供一定理论参考.

1 材料与方法

1.1 试验场地和试验设置

本试验是在南京信息工程大学盘城镇永丰试验

地(118°42'25"E, 32°11'6"N, 海拔 22 m)稻麦轮作区进行的. 试验地周围开阔平坦, 属于北亚热带湿润气候, 四季分明, 日照资源较丰富, 年平均温度和降水量分别约为 15℃ 和 1 100 mm. 耕作土壤类型为黄棕壤, 土质细腻均匀, 肥力中等. 供试作物为当地常规品种‘扬麦 13 号’(*Triticum aestivum* L. cv. Yangmai 13), 于 2015 年 11 月上旬撒播, 至 2016 年 6 月 6 日成熟收割.

观测从 2016 年 3 月 16 日(冬小麦拔节初期)开始, 于 2016 年 5 月 30 日(冬小麦蜡熟期)结束. 观测仪器主要基于涡度相关系统, 该系统自 2015 年 7 月开始安装, 进行了半年的调试和校准, 于 2016 年 3 月正式运行. 系统主要由 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 数据采集系统组成, 其中快慢速 O_3 分析仪均放置于一个带有空调的集成箱内. O_3 浓度由慢速紫外 O_3 分析仪进行观测, 该仪器的精度为 1×10^{-9} ; O_3 的快速响应则利用快速 O_3 分析仪监测, 该仪器的主要工作原理为香豆素涂层片被 O_3 氧化消耗发出蓝光, 被光电倍增管探测到后转化成为电压输出, 获得的数据需要利用慢速紫外 O_3 分析仪获得的 30 min 平均 O_3 浓度进行时时校准, 因此快慢速 O_3 分析仪的采样进气高度相同, 均为 7 m. 由于香豆素会不断地被消耗, 试验期每 5 d 左右更换一次香豆素涂层片. H_2O 和 CO_2 浓度主要由闭路的 H_2O/CO_2 浓度红外分析仪进行观测. 原始涡度系统数据的采样频率是 10 Hz. 其他气象要素也同时进行了观测, 包含太阳辐射(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、风向和降雨量(Watchdog, 2900ET, Spectrum Technologies, USA)等. 并从 3 月 16 日起每隔 7 d 对冬小麦叶面积进行测量, 测量方法参照文献[29].

遵循涡度相关技术的理论^[14, 30], O_3 、 H_2O 和 CO_2 浓度与垂直风速速率相关, 则气体通量(F_c) [$\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$]的计算公式如下:

$$F_c = \overline{w' \cdot c'} \quad (1)$$

式中, w 为垂直风速速率($m \cdot s^{-1}$), c 为观测气体浓度($nL \cdot L^{-1}$), 上面的横线表示时间平均, 撇号代表

变量的脉动. 正值通量定义为由麦田向大气进行向上的传输, 负值则相反.

气体采样与仪器响应之间的时间延迟设置由垂直风速和气体浓度脉动之间的最大化协方差而确定. 传感器分离和高频信号衰减所造成的观测误差利用谱分析方法进行纠正^[31]. 风速数据需要通过两次坐标旋转成自然坐标系^[32]. 此外, 为了确保气体通量数据的有效性, 对观测的原始数据进行了必要的筛选和数据质量控制, 以下情况的数据需要剔除: ①平稳性试验结果高于 60% 的值^[33]; ②麦田边界以外的通量源区的估算值^[34]; ③湍流发展不充分的值[即摩擦速度(u^*) < 0.15 m·s⁻¹].

1.2 冠层导度(G_c)与冠层 O₃ 气孔导度(G_s)的计算

基于大叶干沉降理论, 冠层导度(G_c)主要由 O₃ 沉降速率(V_d)、空气学阻力(R_a)和边界层阻力(R_b)计算得到. V_d 、 R_a 和 R_b 的计算主要参照朱治林等^[22] 和 Baldocchi 等^[35] 的方法. G_c 的具体公式为:

$$G_c = V_d / [1 - V_d(R_a + R_b)] \quad (2)$$

冠层 O₃ 气孔导度(G_s)的计算主要基于不同干湿条件下, 利用彭曼公式并结合 CO₂ 同化量(GPP)共同获得, 计算过程详见 Lamaud 等^[36] 的方法. G_s 的具体公式为:

$$G_s = \alpha \times GPP \quad (3)$$

式中, α 为在干燥条件下[即相对湿度(RH) < 60%]时的 G_{sl} 与 GPP 的斜率, 其中 G_{sl} 为干燥条件下利用彭曼公式计算的冠层 O₃ 气孔导度, 具体公式如下:

$$G_{sl} = \frac{DO_3}{DH_2O} \frac{E/\delta}{1 + (E/\delta)(R_a + R_b)(\beta s/\gamma) - 1} \quad (4)$$

式中, DO_3 和 DH_2O 是 O₃ 和 H₂O 的分子扩散率(m²·s⁻¹), $DO_3/DH_2O \approx 0.66$; E 是水汽通量[kg·(m²·s)⁻¹]; δ 是水蒸气饱和密度差(kg·m⁻³); β 是波文比; s 是饱和曲线斜率(Pa·K⁻¹); γ 是湿度常数(Pa·K⁻¹).

1.3 气孔 O₃ 通量(F_s)与非气孔 O₃ 通量(F_{ns})的计算

总 O₃ 通量(F_{O_3})主要通过涡度相关系统直接观测获得, 并将其分成气孔 O₃ 通量(F_s)与非气孔 O₃ 通量(F_{ns}). 其中 F_s 的计算公式如下:

$$F_s = G_s(c_{O_3} - c_{O_{3i}}) \quad (5)$$

式中, c_{O_3} 为冠层 O₃ 浓度(nL·L⁻¹); $c_{O_{3i}}$ 为细胞内

O₃ 浓度(nL·L⁻¹), 通常假设该浓度为 0 (即 $c_{O_{3i}} = 0$).

F_{ns} 是 F_{O_3} 与 F_s 的差值, 计算公式如下:

$$F_{ns} = F_{O_3} - F_s \quad (6)$$

1.4 O₃ 累积吸收通量、AOT40 的计算

O₃ 累积吸收通量的公式如下:

$$DF_{O_3}/F_s/F_{ns} = \int_{t_1}^{t_2} F_{O_3}/F_s/F_{ns}(t) dt \quad (7)$$

式中, $DF_{O_3}/F_s/F_{ns}$ 分别为总 F_{O_3} 累积吸收通量、气孔 O₃ 累积吸收通量和非气孔 O₃ 累积吸收通量(mmole·m⁻²); t_1 和 t_2 分别是观测起始小时和观测结束小时.

AOT40 是臭氧浓度(c_{O_3}) > 40 nL·L⁻¹ 且太阳辐射(SR) ≥ 50 W·m⁻² 的小时累计效应指数(× 10⁻⁶·h). AOT40 的计算公式如下:

$$AOT40 = \sum (c_{O_3} - 40) \Delta t \quad (8)$$

$$(c_{O_3} > 40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} \text{ \& } SR \geq 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$$

式中, Δt 是小时时间间隔.

2 结果与讨论

2.1 气象因子和叶面积指数的时间序列和平均日变化过程

图 1 为观测期间气象因子[太阳辐射(SR)、空气温度(T)、相对湿度(RH)]、降雨量和冬小麦叶面积指数(LAI)的时间序列和平均日变化. 观测期间(76 ~ 151 d)主要处于春季, 并逐渐向夏季过渡. 从图 1 中可见, 逐日的 SR 和 T 随时间序列推移不断增加, 但增幅并不大, 由观测初期的峰值 SR 低于 800 W·m⁻² 和峰值 T 低于 15℃ 分别增长至高于 1 000 W·m⁻² 和接近 30℃. 逐日 RH 并没有随时间序列的推移呈现明显的增减波动, 主要变化范围在 30% ~ 90%. 在 90 ~ 100、110 ~ 120、125、135 和 140 ~ 150 d 期间出现了明显的降雨, 最大降雨量达到 35 mm. 此外观测初期冬小麦的 LAI 为 1.5 m²·m⁻², 于 112 d (扬花期前后) 达到最大值(3.5 m²·m⁻²) 后逐渐减小至 1.05 m²·m⁻². 从平均日变化中可看出(图 1), SR 从清晨(06:00)开始增加, 至中午(12:00)达到最大值(600 W·m⁻²) 后下午逐渐减小. T 与 SR 有着相同的日变化趋势, 从早晨开始增加, 到午后达到最大值(22℃) 后夜间减小. RH 则是在夜间 ~ 清晨时最大(75%), 然后逐渐减小到午后最小值(47%). 观测期间日平均 SR、 T 、RH 分别为 165.9 W·m⁻²、17.8℃、61.7%.

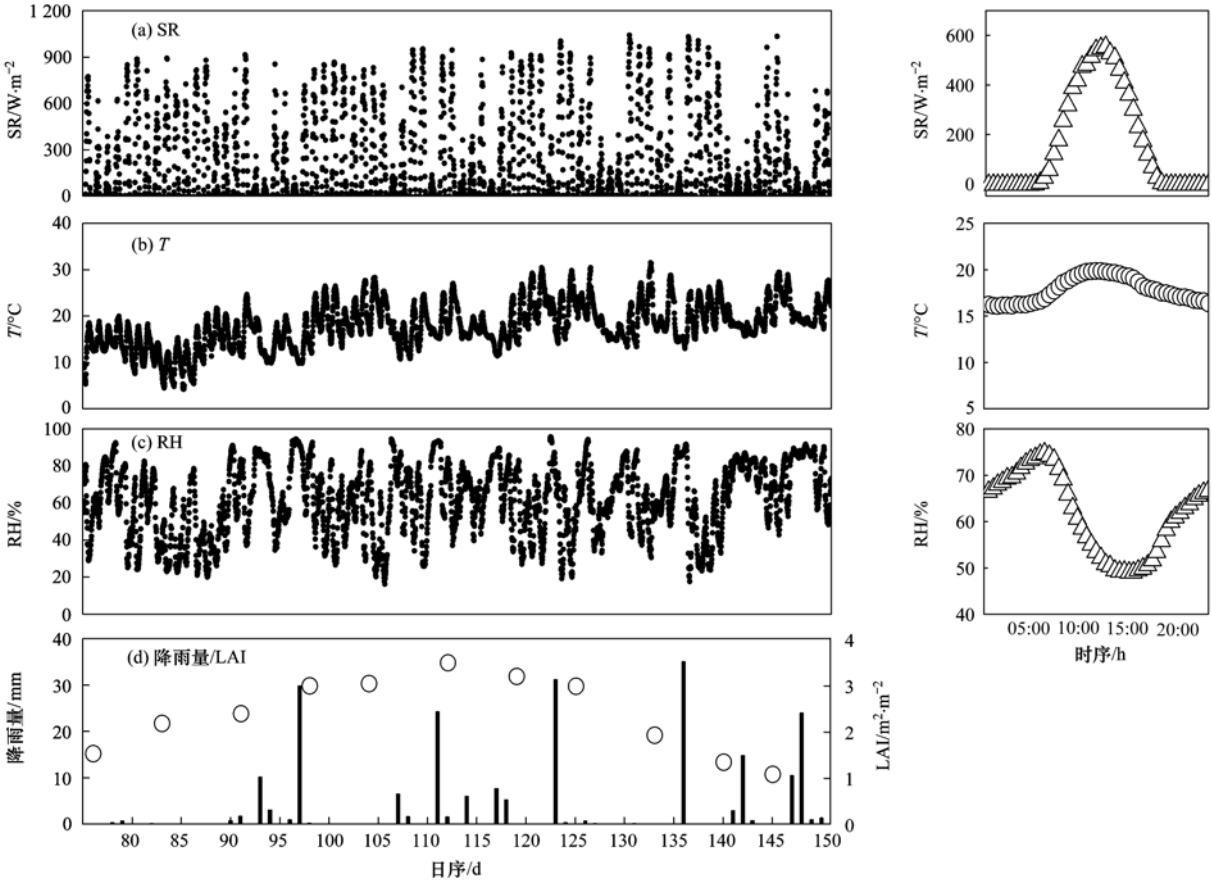


图1 气象要素和冬小麦叶面积指数 (LAI) 的时间序列和平均日变化

Fig. 1 Time series and mean diurnal variations of meteorological factors and the leaf area index (LAI) of winter wheat during the entire experimental period

2.2 O₃ 含量的时间序列和平均日变化过程

图2是观测期间冠层O₃含量(c_{O_3})的时间序列与平均日变化. 从中可以看出, c_{O_3} 随着时间序列的推移有增加的趋势,变化范围在0~120 nL·L⁻¹,峰值由观测初期的普遍低于60 nL·L⁻¹增加至高于100 nL·L⁻¹. 在图2中可见, c_{O_3} 呈现出明显的“钟形”曲线趋势,在清晨(06:00)值最低(16 nL·L⁻¹),之后 c_{O_3} 持续上升,在午后16:00达到最大值(58 nL·L⁻¹)后又迅速减小,前半夜 c_{O_3} 呈现出

慢速下降的过程,后半夜则保持相对平稳的过程. 观测期间白天平均(08:00~18:00)和夜间平均 c_{O_3} 分别为44.5 nL·L⁻¹和23.8 nL·L⁻¹,日平均 c_{O_3} 为32.9 nL·L⁻¹. c_{O_3} 的变化与较强的SR和较高的 T 密切相关. c_{O_3} 与SR呈现显著的正相关关系,与 T 也呈现出正相关关系,但相比SR较弱;与RH呈现负相关关系. 说明SR是影响 c_{O_3} 变化的最重要驱动因子,而 T 和RH也是主要的影响因子,这与朱治林等^[22]在玉米田的O₃干沉降观测研究结果一致,这

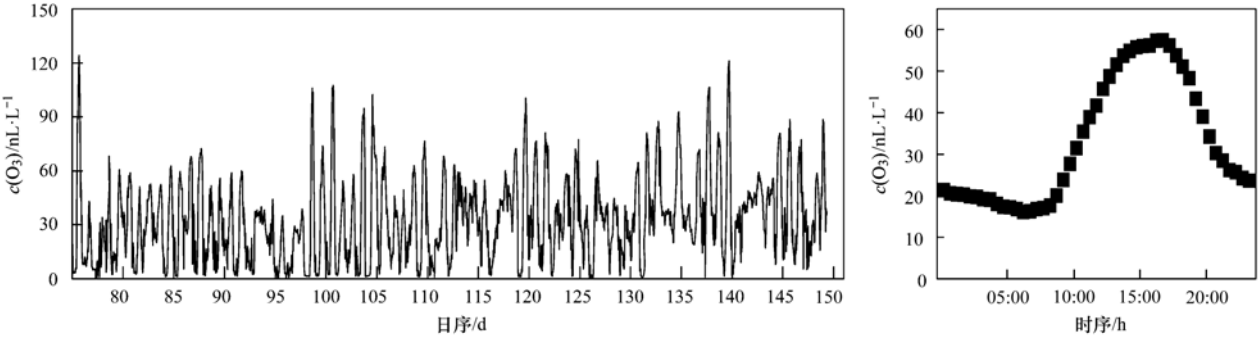


图2 O₃ 含量(c_{O_3}) 的时间序列和平均日变化

Fig. 2 Time series and mean diurnal variations of ozone concentrations (c_{O_3})

主要是因为 O_3 是通过局地前体物进行光化学反应产生的, 而这些前体物的含量变化也同时依赖于 SR 和 T 的变化。

2.3 总 O_3 通量、气孔与非气孔 O_3 通量的时间序列和平均日变化过程

图 3 是逐日平均 O_3 通量的[总 O_3 通量(F_{O_3})、气孔 O_3 通量(F_s)]时间序列和平均日变化。从中可以看出, F_{O_3} 在 76~95 d 时值较小, 至 116 d 达到最大[$-12.8 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]后又逐渐变小。 F_{O_3} 夜间值较小且保持较为平稳的状态, 上午 F_{O_3} 快速的生长, 到午后 14:00 左右达到最大[$-10.8 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 之后 F_{O_3} 又迅速减少。 F_{O_3} 的变化范围为 $-2 \sim -12.8 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 观测期间白天平均和夜间平均 F_{O_3} 分别为 $-7.6 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-3.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日平均 F_{O_3} 为 $-5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。笔者观测的 F_{O_3} 值介于其他麦田和玉米田等研究观测结果的大小范围之内[$0 \sim -20 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]^[37~40]。通过对比图 2 中 c_{O_3} 的平均日变化, 发现 F_{O_3} 与 c_{O_3} 之间有相似又有异同, F_{O_3} 在 09:00 之后随 c_{O_3} 的增大而增大, 16:00 以后随 c_{O_3} 的减小而减小, 但两者出现峰值的时刻并不相同, 峰值 F_{O_3} 出现在 15:00 之前, 而 c_{O_3} 出现在 15:00 以后。这种 F_{O_3} 与 c_{O_3} 峰值出现并不同步的现象在其他研究中也有报道^[41]。说明 F_{O_3} 在一定程度上除了依赖 c_{O_3} 的变化外, 还受其他因素不同程度的影响, 包括 O_3 干沉降速率、气象因子、植物的气孔吸收等^[22, 42~45]。

F_s 在 100~140 d 时期明显大于 76~99 d 和 141~151 d 时期, 100~140 d 时期的 F_s 峰值[$-4.4 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]基本是 76~100 d 和 141~151 d 时期的 2 倍多, 100~140 d 时期正处于冬小麦活跃的生育期(抽穗~灌浆期), F_s 达到峰值的时候也是冬小麦叶面积指数最大的时候[如图 1(d)], 光合作用较强, 在冬小麦打开气孔吸收 CO_2 进行光合作用时, 气孔也同时吸收 O_3 。植物气孔在夜间是关闭的, 因此夜间的 F_s 在这里忽略不计。上午 F_s 快速增大, 到午后达到最大[$-5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]后又迅速减小。从图 3 可以看出, F_s 与 F_{O_3} 的平均日变化过程存在较好的一致性, 且达到峰值的时刻均相同。这说明白天 O_3 的干沉降过程与植物的气孔运动密切联系, 这与朱治林等^[22]在玉米田的 O_3 干沉降研究结果一致。而在 c_{O_3} 达到最大时, 气孔 O_3 吸收却在减少, 这是因为冬

小麦气孔会在傍晚前逐渐关闭(结果未展示), F_s 减小, 从而导致了 F_{O_3} 变小, 这也为 c_{O_3} 和 F_{O_3} 峰值出现时间并不一致提供了依据。逐日 F_s 的变化范围为 $0 \sim -5.1 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日均值为 $-1.43 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。

从图 3 可以发现气孔 O_3 沉降并不是冬小麦田最主要的 O_3 干沉降通道。笔者之前假设细胞内 O_3 浓度是忽略不计的(即 $c_{O_{3i}} = 0$), 但是实际上植物气孔内的 $c_{O_{3i}}$ 可能大于 $0 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而造成 F_s 的高估。Fares 等^[41]在研究中指出当周围环境 c_{O_3} 小于 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时候, $c_{O_{3i}} = 0$ 的假设是成立的; 而当 c_{O_3} 大于 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, $c_{O_{3i}}$ 最大值可达到 $20 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。100~140 d 时期的部分 c_{O_3} 峰值超过了 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明这期间存在 F_s 被高估的情况, 当 c_{O_3} 高于 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 总 F_s 将会被高估 10% 左右^[41]。

当 $RH \geq 60\%$ 时气孔导度与冠层导度的比值(即 G_s/G_c)随 RH 的增加而增加, 因此这里将 $RH = 60\%$ 界定为干湿条件的阈值, 该阈值与 Lamaud 等^[36]研究玉米田时的结果一致, 但低于 Altimir 等^[46]在森林研究中提出的 70% 的阈值。为了探析不同干湿条件下 G_c 是否能近似等于 G_s , 笔者对 G_s 与 G_c 之间的关系进行了分析(图 4)。在 $RH < 60\%$ 的时候, G_c 与 G_s 的存在一定的正相关关系, 这同样也表明 F_{O_3} 一定程度上是受冬小麦气孔运动控制。但是 G_c 明显大于 G_s , 揭示了非气孔沉降对 F_{O_3} 的巨大贡献。从图 4 可以间接得出非气孔导度为 $0.4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 可占 G_c 的 50% 左右。在 $RH \geq 60\%$ 的时候, G_c 与 G_s 关系之间出现大量的散点, 其中部分 G_c 的值是 G_s 的 2 倍以上, 可见此时非气孔沉降的贡献更高。尽管植物夜间气孔关闭, 气孔沉降对 O_3 干沉降影响很小, 但由于非气孔沉降的存在, O_3 干沉降在夜间也很重要。当 G_s 为 0、 $RH < 60\%$ 时 G_c 的范围为 $0 \sim 0.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $RH \geq 60\%$ 时 G_c 的范围为 $0 \sim 1.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见在所有干湿条件下 G_s 并不能用来估算 G_c 。

逐日平均非气孔 O_3 通量(F_{ns})的时间序列和 F_{ns} 日平均变化可以由图 3 间接得出, 可以发现 F_{ns} 占 F_{O_3} 的比例很高。逐日 F_{ns} 的变化范围为 $-1.43 \sim -10.31 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 日平均值为 $-3.66 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。 F_{ns} 在上午~中午时刻的值比下午的大, 这也间接证明了当 c_{O_3} 最大值出现在 16:00 时并不是 F_{O_3} 出现峰值的时候。

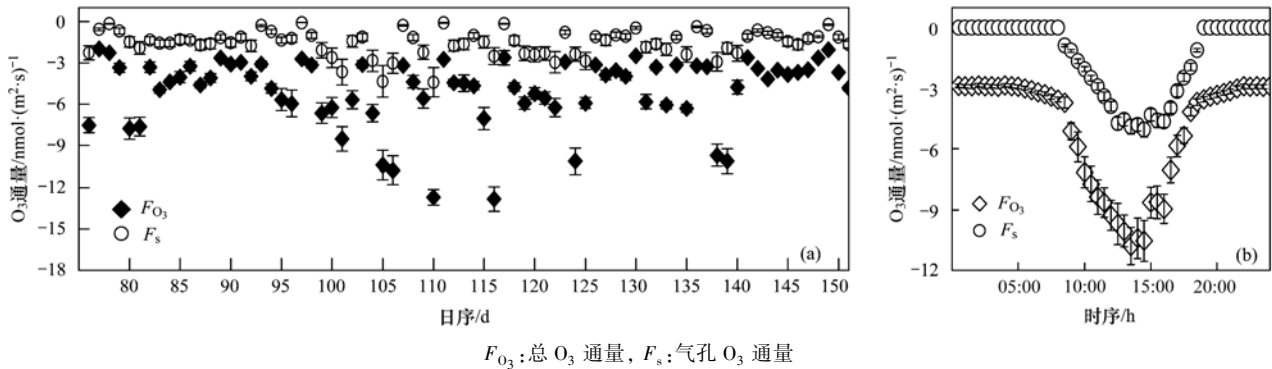
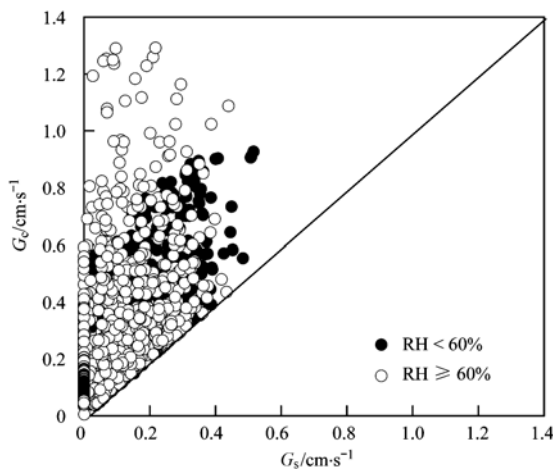
图3 逐日平均 O_3 通量的时间序列与平均日变化

Fig. 3 Times series and mean diurnal variations of mean daily flux

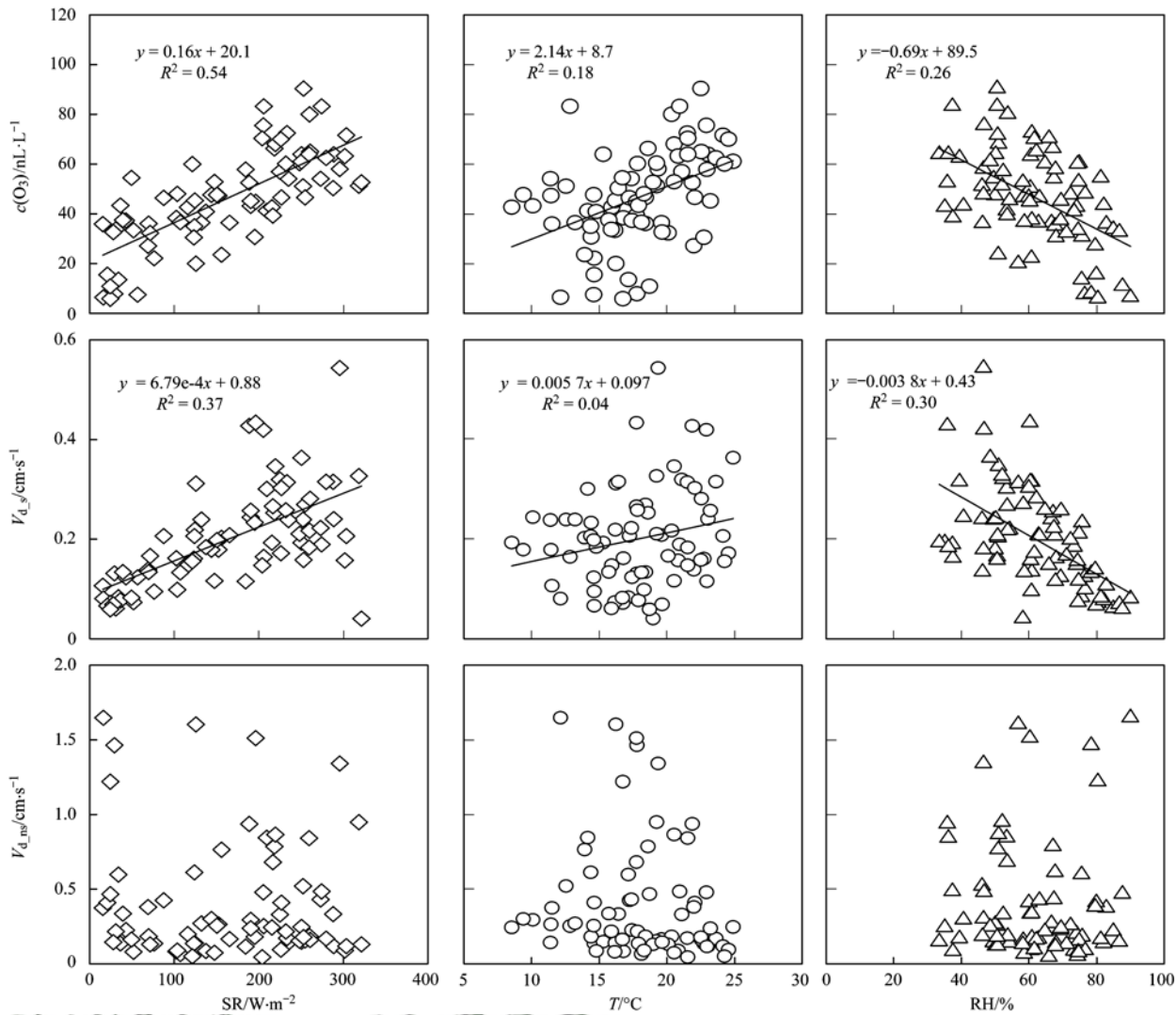
图4 不同干湿条件下冠层导度(G_c)与 O_3 气孔导度(G_s)的相关关系Fig. 4 Relationships between canopy conductance (G_c) and stomatal conductance for ozone (G_s) in two ranges of air relative humidity (RH)

2.4 气孔与非气孔 O_3 沉降速率与主要气象因子的关系

为了消除 O_3 浓度的影响,采用气孔 O_3 沉降速率($V_{d,s}$)与非气孔 O_3 沉降速率($V_{d,ns}$)来研究它们与主要气象因子(SR、 T 和 RH)的关系(图5)。从图5中可以看出, $V_{d,s}$ 与SR和RH分别呈现较为显著的正相关($R^2 = 0.37$)和负相关($R^2 = 0.30$)关系;与 T 的正相关关系并不显著($R^2 = 0.04$)。 $V_{d,ns}$ 与SR、 T 和RH的关系并不是简单的线性关系,存在不少散点,但仍可以看出一些趋势, $V_{d,ns}$ 随SR增大而增大,但增大趋势并不明显; $V_{d,ns}$ 与 T 和RH的关系相似,均先随 T 或RH的增加有增加趋势,后随 T 或RH的增加有减小趋势。

根据 $V_{d,s}$ -SR 和 $V_{d,ns}$ -SR 的关系,发现较强的SR是有利于气孔和非气孔沉降的,因此推断较强的光照有利于 O_3 干沉降过程;基于 $V_{d,s}$ - T 和 $V_{d,ns}$ - T

的关系可以发现, $V_{d,s}$ - T 之间有微弱正相关关系,而 $V_{d,ns}$ 和 T 的关系存在一定的阈值,阈值区域在 T 为15~20℃之间,与之前研究得出的 $V_{d,ns}$ 随SR单调增长,与 T 呈指数增长的结论并不一致^[47, 48];通过该结果可推断较低的 T 时不利于 O_3 干沉降过程,但当 T 继续升高到一定阈值时, F_{O_3} 可能增多也可能减小。对比 $V_{d,s}$ -RH 和 $V_{d,ns}$ -RH 的关系可以发现, $V_{d,s}$ -RH 是负相关关系,而 $V_{d,ns}$ -RH 的关系存在一定的阈值,阈值区域在RH=60%范围。过于干燥的条件可能不利于非气孔沉降,过于湿润的环境既不利于气孔沉降也不利于非气孔沉降,因此推断在过于湿润的条件下 F_{O_3} 随RH的增加必定是减小的,Zhang等^[49]指出植物在湿润条件下的 F_{O_3} 比干燥的减小30%~70%。通过以上分析发现较强的SR、较高的 T 和适度湿润的条件有利于冬小麦气孔 O_3 沉降,其中SR、 T 与RH之间并不是彼此独立的,SR和RH会影响植物气孔开度,而 T 不仅会影响RH,而且也会驱动植物叶片的酶反应^[50];较强的SR、适度的 T 和湿润的条件下有利于冬小麦非气孔沉降。由此综合以上可推断出较弱的SR,较低的 T 和过于湿润的条件下不适合 O_3 干沉降过程。从图3中看出90~95、110~115、125、135和140~145 d前后 F_s 均有减小的趋势,而这些天均有降雨[如图1(d)],说明阴雨天会导致植物气孔的关闭,这主要是因为当叶片处于湿润条件下,由于水滴或水滴薄膜阻塞植物气孔,从而降低气孔 O_3 吸收^[41, 49]。Zhang等^[51]指出在上述条件下,气孔 O_3 吸收减小的同时会使非气孔 O_3 吸收增加,这与本研究结果并不一致。此外由图5发现, $V_{d,ns}$ 值的大小基本是 $V_{d,s}$ 的2倍多,说明非气孔 O_3 通量大约是气孔 O_3 通量的2倍左右。研究指出非气孔 O_3 通量占总 O_3 通量的很大比例,即使在夏季或植物生长



数据为逐日平均值

图5 O₃ 浓度(c_{O_3})、气孔 O₃ 沉降速率($V_{d,s}$)和非气孔 O₃ 沉降速率($V_{d,ns}$)与气象因子的关系

Fig. 5 Relationships between ozone concentration (c_{O_3}), stomatal ($V_{d,s}$) and non-stomatal ($V_{d,ns}$) ozone depositions with solar radiation (SR), temperature (T) and relative humidity (RH)

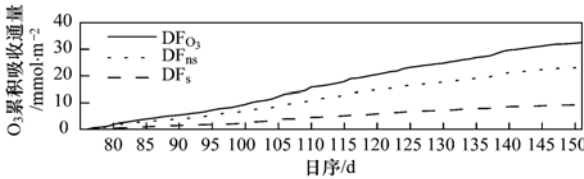
旺盛季，仍可以占到总 O₃ 通量的 50% 左右^[49]。

2.5 累积 O₃ 吸收通量

2.5.1 累积 O₃ 吸收通量的时间序列变化

图 6 是累积 O₃ 吸收通量(DF_{O_3} 、 DF_s 和 DF_{ns})的时间序列变化，在 76 ~ 95 d 和 135 ~ 151 d, DF_{O_3} 、 DF_s 和 DF_{ns} 的增加趋势较小，在 100 ~ 140 d 的时段 DF_{O_3} 、 DF_s 和 DF_{ns} 增加较快。在整个观测期间， DF_{O_3} 、 DF_s 和 DF_{ns} 分别为 31.58、9.99 和 21.59 $mmol \cdot m^{-2}$ ，总 DF_s 和总 DF_{ns} 分别占总 DF_{O_3} 的 32% 和 68%。100 ~ 140 d 处于冬小麦的主要生育期，此时的冬小麦叶面积最大、光合作用最强，气孔运动活跃，冠层完全被覆盖， DF_{O_3} 、 DF_s 和 DF_{ns} 均迅速增加。这表明 O₃ 干沉降过程会受冬小麦生育期的

影响，研究指出气孔 O₃ 沉降与非气孔 O₃ 沉降均依赖于植物冠层结构；冠层高度和叶面积指数增加，使从大气进入地表的臭氧传输将减少^[51,52]，而气孔沉降则随 LAI 的增大而增大^[53,54]。



DF_{O_3} :总 F_{O_3} 累积吸收通量, DF_s :累积气孔 O₃ 通量,
 DF_{ns} :累积非气孔 O₃ 通量

图6 累积 O₃ 吸收通量的时间序列变化

Fig. 6 Time series variations in accumulated absorbed ozone flux

2.5.2 AOT40、累积气孔 O₃ 吸收通量(DF_s)和产量的评估

图 7 是 AOT40 和累积气孔 O₃ 吸收通量(DF_s)的时间序列变化. 基于这两种方法对作物产量评估的模型是不同的, 量纲也不相同(×10⁻⁶h 和 mmol·m⁻²), 因此它们之间并没有可比性. 但有研究指出如果 AOT40 和 DF_s 的变化趋势相似或者这个两个变量之间成一定比例, 那么可以近似认为两者是等同的^[37]. 但是从图 7 可以看出, AOT40 和 DF_s 并不同步, AOT40 和 DF_s 前期增长速度相近, 但中后期 DF_s 较 AOT40 相比迅速增长, 最终 AOT 和 DF_s 的值分别为 8.93 × 10⁻⁶h 和 9.99 mmol·m⁻². 两个指标之间的差别主要是因为 c_{O₃} 和 F_{O₃} 的日变化趋势并不相同, 其中它们达到各自峰值的时刻不相同. 早晨和下午相同大小的 c_{O₃} 值对应 F_{O₃} 值并不相同, 下午的 F_{O₃} 值更小(图 2 和图 3), 因此下午较高的 c_{O₃} 造成的伤害比早晨低.

植物体内可以通过自身的抗氧化系统来清除进入体内的部分 O₃^[55], 使植物在气孔吸收通量低于某一个临界值时具有一定的解毒能力. 有研究指出, 当气孔吸收通量小于 6 nmol·(m²·s)⁻¹ 时, 植物具有一定的解毒能力, 因此将累积高于此临界值的气

孔吸收通量之和称之为植物累积毒害通量(DF_{s06}), 且研究指出 DF_{s06} 的变化与冬小麦产量的相关性最为显著^[56,57]. 在已有研究建立的剂量 AOT40 及通量 DF_{s06} 与冬小麦产量相应关系的基础上, 结合本文实际计算的 AOT40 和 DF_{s06} (累积值为 4.16 mmol·m⁻²), 推算出冬小麦的产量损失率(RY). 由表 1 可以看出, 通过剂量 AOT40 和通量 DF_{s06} 响应方程计算出的冬小麦产量损失分别为 11.58% ~ 20.37% 和 20% ~ 23.53%.

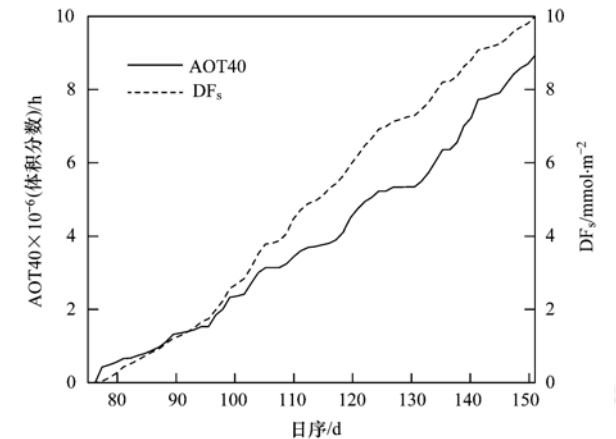


图 7 AOT40 和累积气孔 O₃ 累积吸收通量(DF_s)的时间序列变化

Fig. 7 Time series of AOT40 and accumulated stomatal absorbed ozone flux (DF_s)

表 1 冬小麦相对产量与 AOT40/DF_{s06} 的关系方程及产量评估

Table 1 Correlation function of relative yield of the winter wheat, AOT40/DF_{s06}, and yield risk assessment

指标	试验装置	反应方程	相对产量/%	减产量/%	文献
AOT40	FACE	RY = -2.05AOT40 + 100	81.69	18.31	[58, 59]
	OTC	RY = 100exp(-0.025 5AOT40)	79.63	20.37	[17]
	OTC	RY = -1.296AOT40 + 100	88.42	11.58	[60]
DF _{s06}	OTC	RY = (-0.048DF _{s06} + 1) × 100	80	20	[56]
	OTC	RY = (-0.056DF _{s06} + 0.998) × 100	76.47	23.53	[57]
	OTC	RY = (-0.058DF _{s06} + 1.008) × 100	76.64	23.36	[61]

3 结论

(1) 观测期间白天(08:00 ~ 18:00)平均和夜间平均 O₃ 浓度(c_{O₃}) 分别为 44.5 nL·L⁻¹ 和 23.8 nL·L⁻¹, 日平均 c_{O₃} 为 32.9 nL·L⁻¹; 观测期间白天平均和夜间平均总 O₃ 通量(F_{O₃}) 分别为 -7.6 nmol·(m²·s)⁻¹ 和 -3.1 nmol·(m²·s)⁻¹, 日均 F_{O₃} 为 -5.1 nmol·(m²·s)⁻¹. 逐日平均 F_s 的变化范围为 0 ~ -5.1 nmol·(m²·s)⁻¹, 日均 F_s 为 -1.43 nmol·(m²·s)⁻¹. 逐日平均 F_{ns} 的变化范围为 -1.43 ~ -10.31 nmol·(m²·s)⁻¹, 日均 F_{ns} 为 -3.66

nmol·(m²·s)⁻¹. 其中非气孔沉降是 O₃ 干沉降的主要沉降通道.

(2) 较强的 SR、较高的 T 和适度湿润的条件有利于冬小麦气孔沉降; 较强的 SR、适度的 T 和湿润条件有利于冬小麦非气孔沉降. 由此推断出较弱的 SR, 较低的 T 和过于湿润的条件下不适合 O₃ 干沉降过程.

(3) 在整个观测期间, DF_{O₃}、DF_s 和 DF_{ns} 分别为 31.58、9.99 和 21.59 mmol·m⁻², 总 DF_s 和总 DF_{ns} 分别占总 DF_{O₃} 的 32% 和 68%. 通过剂量指标 AOT40 和通量指标 DF_{s06} 响应方程计算出的冬小麦产量损失分别为 11.58% ~ 20.37% 和 20% ~

23.53%.

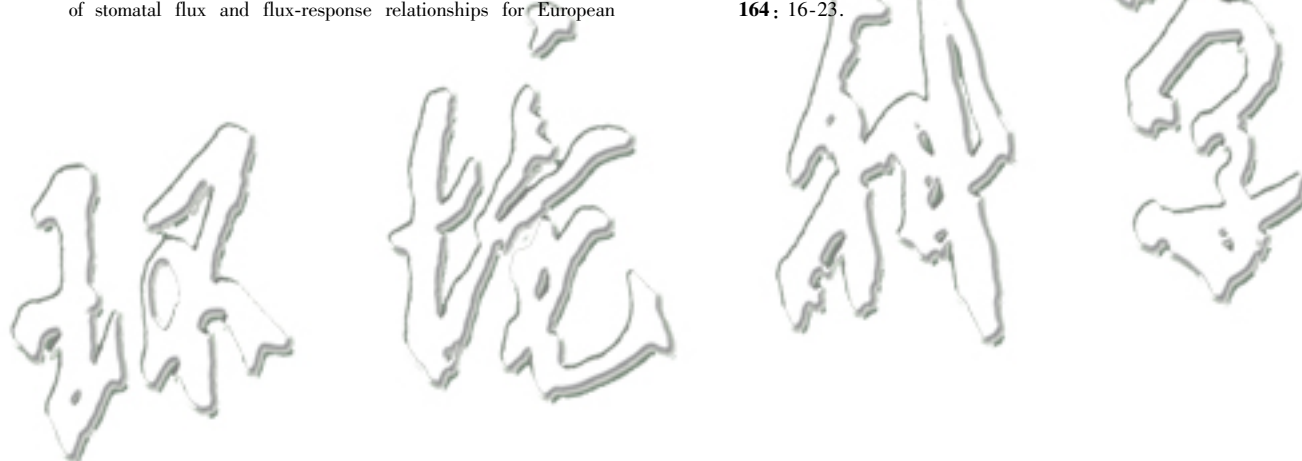
(4) 目前非气孔 O₃ 的沉降还存在很大的不确定性, 尤其是针对非气孔阻力参数化的研究. 确定和完善表面阻力、土壤阻力和化学分解等参数化方案, 精细定量非气孔 O₃ 沉降通道的分配比将是下一阶段的研究重点.

参考文献:

- [1] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [2] 郑启伟, 王效科, 谢居清, 等. 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响[J]. *生态学报*, 2006, **26**(4): 1131-1137.
Zheng Q W, Wang X K, Xie J Q, *et al.* Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in situ rice leaves under O₃ stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1131-1137.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 472-479.
Zheng Y F, Zhao Z, Wu R J, *et al.* Effects of Long-term ozone exposure on chlorophyll a fluorescence and gas exchange of winter-wheat leaves[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 472-479.
- [6] Mills G, Hayes F, Simpson D, *et al.* Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-)natural vegetation in Europe (1990-2006) in relation to AOT40-and flux-based risk maps[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(1): 592-613.
- [7] 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.
- [8] Vandermeiren K, De Bock M, Horemans N, *et al.* Ozone effects on yield quality of spring oilseed rape and broccoli[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 76-83.
- [9] 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.
- [10] 李苗苗. 臭氧对几种楠木气体交换参数的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1888-1901.
Li M M. Effects of ozone on photosynthesis of several plants[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1888-1901.
- [11] 辛月, 高峰, 冯兆忠. 不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2359-2367.
Xin Y, Gao F, Feng Z Z. Photosynthetic characteristics and ozone dose-response relationships for different genotypes of poplar[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2359-2367.
- [12] Avnery S, Mauzerall D L, Liu J F, *et al.* Global crop yield reductions due to surface ozone exposure; 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2297-2309.
- [13] Loreto F, Fares S. Is ozone flux inside leaves only a damage indicator? Clues from volatile isoprenoid studies[J]. *Plant Physiology*, 2007, **143**(3): 1096-1100.
- [14] Fares S, McKay M, Holzinger R, *et al.* Ozone fluxes in a *Pinus ponderosa* ecosystem are dominated by non-stomatal processes: evidence from long-term continuous measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(3): 420-431.
- [15] Launiainen S, Katul G G, Grönholm T, *et al.* Partitioning ozone fluxes between canopy and forest floor by measurements and a multi-layer model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **173**: 85-99.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 王亮, 曾青, 冯兆忠, 等. 开放式臭氧浓度升高对2个冬小麦品种光合损伤的研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 527-534.
Wang L, Zeng Q, Feng Z Z, *et al.* Photosynthetic damage induced by elevated O₃ in two varieties of winter wheat with free air controlled enrichment approach[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 527-534.
- [19] Tong L, Wang X K, Geng C M, *et al.* Diurnal and phenological variations of O₃ and CO₂ fluxes of rice canopy exposed to different O₃ concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(31): 5621-5631.
- [20] 赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 等. 大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 412-422.
Zhao H, Zheng Y F, Cao J C, *et al.* Influencing mechanism and spatio-temporal pattern of stomatal ozone flux of winter wheat under ozone pollution[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 412-422.
- [21] 潘小乐, 王自发, 王喜全, 等. 秋季在北京城郊草地地下垫面上的一次臭氧干沉降观测试验[J]. *大气科学*, 2010, **34**(1): 120-130.
Pan X L, Wang Z F, Wang X Q, *et al.* An observation study of ozone dry deposition over grassland in the suburban area of Beijing[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2010, **34**(1): 120-130.
- [22] 朱治林, 孙晓敏, 董云社, 等. 鲁西北平原玉米地涡度相关臭氧通量日变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(2): 292-301.
Zhu Z L, Sun X M, Dong Y C, *et al.* Diurnal variation of ozone flux over corn field in Northwestern Shandong Plain of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(3): 503-511.

- [23] 李硕, 郑有飞, 吴荣军, 等. 冬麦田臭氧干沉降过程的观测[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 1811-1819.
Li S, Zheng Y F, Wu R J, *et al.* Observation of ozone dry deposition in the field of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 1811-1819.
- [24] Simpson D, Ashmore M R, Emberson L, *et al.* A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study[J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(3): 715-725.
- [25] 白月明, 郭建平, 王春乙, 等. 水稻与冬小麦对臭氧的反应及其敏感性试验研究[J]. 中国农业生态学报, 2002, **10**(1): 13-16.
Bai Y M, Guo J P, Wang C Y, *et al.* The reaction and sensitivity experiment of O₃ on rice and winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, **10**(1): 13-16.
- [26] Soja G, Barnes J D, Posch M, *et al.* Phenological weighting of ozone exposures in the calculation of critical levels for wheat, bean and plantain[J]. Environmental Pollution, 2000, **109**(3): 517-524.
- [27] Wang H X, Zhou L J, Tang X Y. Ozone concentrations in rural regions of the Yangtze Delta in China[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2006, **54**(3): 255-265.
- [28] 许宏, 杨景成, 陈圣宾, 等. 植物的臭氧胁迫污染效应研究进展[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(6): 1205-1213.
Xu H, Yang J C, Chen S B, *et al.* Review of plant responses to ozone pollution [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, **31**(6): 1205-1213.
- [29] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [30] Goldstein A H, Hultman N E, Fracheboud J M, *et al.* Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, **101**(2-3): 113-129.
- [31] RiBmann J, Tetzlaff G. Application of a spectral correction method for measurements of covariances with fast-response sensors in the atmospheric boundary layer up to a height of 130 m and testing of the corrections [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994, **70**(3): 293-305.
- [32] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, **99**(1): 127-150.
- [33] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, **78**(1-2): 83-105.
- [34] Hsieh C I, Katul G, Chi T W. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows[J]. Advances in Water Resources, 2000, **23**(7): 765-772.
- [35] Baldocchi D D, Meyers T P. Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest: 1. Evaporation and CO₂ efflux[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, **96**(D4): 7271-7285.
- [36] Lamaud E, Loubet B, Irvine M, *et al.* Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, **149**(9): 1385-1396.
- [37] Gerosa G, Cieslik S, Ballarin-Denti A. Micrometeorological determination of time-integrated stomatal ozone fluxes over wheat: a case study in Northern Italy [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(6): 777-788.
- [38] Stella P, Personne E, Loubet B, *et al.* Predicting and partitioning ozone fluxes to maize crops from sowing to harvest: the Surf-atm-O₃ model[J]. Biogeosciences, 2011, **8**(10): 2869-2886.
- [39] Stella P, Personne E, Lamaud E, *et al.* Assessment of the total, stomatal, cuticular, and soil 2 year ozone budgets of an agricultural field with winter wheat and maize crops[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, **118**(3): 1120-1132.
- [40] Loubet B, Cellier P, Fléhard C, *et al.* Investigating discrepancies in heat, CO₂ fluxes and O₃ deposition velocity over maize as measured by the eddy-covariance and the aerodynamic gradient methods [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, **169**: 35-50.
- [41] Fares S, Weber R, Park J H, *et al.* Ozone deposition to an orange orchard: Partitioning between stomatal and non-stomatal sinks[J]. Environmental Pollution, 2012, **169**: 258-266.
- [42] Kurpius M R, McKay M, Goldstein A H. Annual ozone deposition to a Sierra Nevada ponderosa pine plantation [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(28): 4503-4515.
- [43] Vitale M, Gerosa G, Ballarin-Denti A, *et al.* Ozone uptake by an evergreen mediterranean forest (*Quercus ilex* L.) in Italy—Part II: flux modelling. Upscaling leaf to canopy ozone uptake by a process-based model[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(18): 3267-3278.
- [44] Altimir N, Kolari P, Tuovinen J P, *et al.* Foliage surface ozone deposition: a role for surface moisture? [J]. Biogeosciences, 2006, **3**(2): 209-228.
- [45] Rannik Ü, Altimir N, Mammarella I, *et al.* Ozone deposition into a boreal forest over a decade of observations: evaluating deposition partitioning and driving variables [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(24): 12165-12182.
- [46] Altimir N, Tuovinen J P, Vesala T, *et al.* Measurements of ozone removal by Scots pine shoots: calibration of a stomatal uptake model including the non-stomatal component [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(15): 2387-2398.
- [47] Hole L R, Semb A, Tørseth K. Ozone deposition to a temperate coniferous forest in Norway; gradient method measurements and comparison with the EMEP deposition module [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(15): 2217-2223.
- [48] Hogg A, Uddling J, Ellsworth D, *et al.* Stomatal and non-stomatal fluxes of ozone to a northern mixed hardwood forest [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2007, **59**(3): 514-525.
- [49] Zhang L M, Vet R, Brook J R, *et al.* Factors affecting stomatal uptake of ozone by different canopies and a comparison between dose and exposure[J]. Science of the Total Environment, 2006, **370**(1): 117-132.
- [50] Turnipseed AA, Burns S P, Moore D J P, *et al.* Controls over ozone deposition to a high elevation subalpine forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, **149**(9): 1447-1459.
- [51] Zhang L M, Brook J R, Vet R. On ozone dry deposition—with

- emphasis on non-stomatal uptake and wet canopies [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(30): 4787-4799.
- [52] Van Pul W A J, Jacobs A F G. The conductance of a maize crop and the underlying soil to ozone under various environmental conditions[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, **69**(1-2): 83-99.
- [53] 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.
- [54] Tuovinen J P, Ashmore M R, Emberson L D, *et al.* Testing and improving the EMEP ozone deposition module[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(15): 2373-2385.
- [55] 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 modelling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(9): 2890-2899.
- [56] 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.
- [57] LRTAP Convention. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends [EB/OL]. Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation, 2010 revision. <http://www.icpvegetation.ceh.ac.uk>.
- [58] Zhu X K, Feng Z Z, Sun T F, *et al.* Effects of elevated ozone concentration on yield of four Chinese cultivars of winter wheat under fully open-air field conditions[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(8): 2697-2706.
- [59] Tang H Y, Takigawa M, Liu G, *et al.* A projection of ozone-induced wheat production loss in China and India for the years 2000 and 2020 with exposure-based and flux-based approaches [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(9): 2739-2752.
- [60] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, *et al.* Effects of ground-level ozone (O_3) pollution on the yields of rice and winter wheat in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(3): 360-362.
- [61] Feng Z Z, Tang H Y, Uddling J, *et al.* A stomatal ozone flux-response relationship to assess ozone-induced yield loss of winter wheat in subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **164**: 16-23.



CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)