

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

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

赵辉^{1,2}, 郑有飞^{1,2,3*}, 李硕⁴, 徐静馨^{1,2}, 曹嘉晨³, 魏莉³, 关清³

(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. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 3. 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; 4. 北京市通州区气象局, 北京 101100)

摘要: 近地层臭氧污染及其对作物产量和粮食安全的负面效应已成为国内外广泛关注的焦点之一。利用 2014 ~ 2016 年冬小麦主要生长季期间臭氧浓度和气象因子观测资料, 分析了麦田臭氧浓度、AOT40 的变化特征。根据 Pleijel 等 2007 年修正的气孔导度模型, 模拟了冬小麦气孔导度的变化, 并与实测值进行对比验证, 同时结合通量模型, 计算了冬小麦气孔臭氧通量。此外, 利用前期课题组建立的模型, 估算了臭氧对冬小麦干物质累积和产量的影响。结果表明: 臭氧浓度在冬小麦生长季期间从前期到后期逐渐增加, 并呈现明显的单峰型日变化特征。从 2014 ~ 2016 年的每年 3 月 1 日 ~ 5 月 31 日, 平均臭氧浓度分别为 36.2、37.7 和 33.6 nL·L⁻¹, AOT40 值分别为 17.08、17.90 和 11.84 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。Jarvis 气孔导度模型可以用来模拟本地区冬小麦的气孔导度, 模型解释了实测气孔导度 81% 的变异性。2014 ~ 2016 年冬小麦气孔臭氧吸收通量分别为 9.36、9.32 和 8.65 mmol·m⁻²。在近 3 年臭氧浓度平均水平下, 近地层臭氧会使冬小麦产量减少 18.03%, 干物质累积减少 19.31%。

关键词: 臭氧浓度; 冬小麦; 干物质; 产量; 气孔通量

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5315-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704117

Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield

ZHAO Hui^{1,2}, ZHENG You-fei^{1,2,3*}, LI Shuo⁴, XU Jing-xin^{1,2}, CAO Jia-chen³, WEI Li³, GUAN Qing³

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEEET), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Tongzhou District Meteorological Bureau of Beijing, Beijing 101100, China)

Abstract: Surface ozone pollution and its negative effects on crops and food safety have attracted the attention of many people. In this study, ozone concentration and meteorological parameters in a winter wheat field were measured from 2014 to 2016. We analyzed the variations in ozone concentration and AOT40 during the growing season for winter wheat. According to the revised stomatal model, the leaf stomatal conductance of winter wheat was simulated and verified by comparing with measured results. Based on the flux model, the leaf stomatal fluxes of winter wheat were calculated. In addition, we estimated the effects of ozone concentration on winter wheat dry matter and yield by using exposure-response relationships and flux-response relationships. The results suggested that the concentration of ozone gradually increased during the growing season for winter wheat and showed a distinct unimodal pattern of diurnal variation. The mean concentrations of ozone were 36.2, 37.7, and 33.6 nL·L⁻¹, respectively, and the ozone AOT40 values were 17.08, 17.90, and 11.84 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, respectively, during the growing seasons for winter wheat from 2014 to 2016. The Jarvis-type factorial model of stomatal conductance could be used to simulate the stomatal conductance of winter wheat in the region, and approximately 81% of the variation of measured stomatal conductance could be accounted for by the model. The leaf stomatal ozone fluxes of winter wheat were 9.36, 9.32, and 8.65 mmol·m⁻², respectively, from 2014 to 2016. Winter wheat yield decreased about 18.03%, and its dry matter decreased about 19.31% under ozone stress during these three years.

Key words: ozone concentration; winter wheat; dry matter; yield; stomatal flux

近地层臭氧主要是由氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)等前体物经一系列光化学反应所形成的一种二次污染物。近年来, 由于人类活动的加剧, 导致臭氧浓度从工业化前期

收稿日期: 2017-04-12; 修订日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475108); 2017 年度江苏省研究生科研创新项目(KYCX17_0878)

作者简介: 赵辉(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: zhaohui_nuist@163.com

* 通信作者, E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

的 $10 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $20 \sim 45 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ [1]。在下一个世纪, 臭氧浓度可能将会继续增加。Meehl 等 [2] 的研究表明, 2015 ~ 2050 年间全球平均臭氧浓度将增加 20% ~ 25%, 到 2100 年将增加 40% ~ 60%。大量研究已经表明, 目前近地层较高的臭氧浓度足以对水稻、大豆、小麦、马铃薯和玉米等作物的产量带来威胁 [3,4]。预计到 2030 年, 小麦产量将下降 10.6% ~ 15.6%, 玉米产量下降 4.5% ~ 6.3%, 大豆产量下降 12.1% ~ 16.4%, 每年的经济损失将达到 120 ~ 350 亿美元 [5], 严重影响到全球的粮食安全。

近地层臭氧不仅会降低植物叶面积、加速叶片老化, 还会抑制其光合作用, 导致植物生物量和产量降低 [6~9]。地表臭氧对植物影响的实验研究仅仅是针对特定的区域, 采用的实验方法大多是控制或者半控制性实验, 人力和物力消耗较大, 而且获得的数据有限。而模型研究则可以克服以上缺陷, 可以用来模拟其影响过程, 较好地应用于地表臭氧污染的区域风险评估。因此, 通过模型预测臭氧浓度变化对植物干物质和产量损失的影响已经成为大气环境领域研究的热点之一。例如, Zhang 等 [10] 的研究表明, 在当前臭氧浓度水平下, 中国东北地区近地层臭氧可能会使大豆产量减少 23.4% ~ 30.2%。Zhu 等 [11] 估算了臭氧对鲁西北平原冬小麦产量的损失约为 12.9%。Jin 等 [12] 的研究发现, 水稻产量损失与 AOT40 存在着较好的线性关系, 当 AOT40 达到 $12.93 \mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 水稻将减产约 10%。郑启伟等认为 [13], 当 AOT40 分别为 $4.48 \mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $14.99 \mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 小麦和水稻的单株产量将减产 10%。Emberson 等 [14] 基于臭氧通量模型估算了亚洲主要植物的产量损失, 研究发现, 在植物生长季期间平均 AOT40 为 $35 \sim 75 \text{ nL} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 小麦、水稻、大豆分别减产 5% ~ 48%、3% ~ 47% 和 10% ~ 65%。

臭氧对植物影响的评估指标和方法, 由最初的臭氧浓度响应模型 (如 Wellbull 方程、线性方程、二次方程和指数方程) 和臭氧剂量响应模型 (如 SUM_{06} 、AOT40 和 W126) [15~17] 逐渐发展到臭氧吸收通量响应模型, 该模型既充分考虑了温度、水汽压差、光照等气候因子, 又考虑了植物对环境因子的响应, 有着很好的适用性 [9,18], 用其来评估臭氧对植物干物质和产量的影响更贴切。因此, 开展气孔臭氧吸收通量的研究, 是定量估算臭氧对植物影响的前提。本文将根据长三角地区冬小麦主要生长

季期间观测的 3 a (2014 ~ 2016 年) 臭氧浓度数据, 分析臭氧浓度、AOT40 的长期变化特征, 引进气孔导度模型和通量模型, 计算冬小麦叶片气孔臭氧吸收通量, 并利用前期建立的相关模型评估了臭氧对冬小麦干物质和产量的潜在影响, 以期为我国种植区大气污染物的环境影响评价提供参考, 也为制定防御臭氧对植物伤害的对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 观测地点

臭氧浓度等项目的观测是在南京信息工程大学农业气象试验站 ($32^{\circ}14'N$, $118^{\circ}42'E$) 的冬小麦麦田试验地 (海拔约 22 m), 该地土壤类型为黄棕壤, 土质细腻而又均匀, 肥力中等, pH 值为 7.35, 土壤有机质含量为 $10.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量为 $0.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾含量为 $0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $4.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $59.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。观测地周围地势平坦, 下垫面植被均为冬小麦扬麦 13, 且植被覆盖均匀。冬小麦主要生长季为 3 ~ 5 月。

1.2 仪器和观测

臭氧浓度的观测所采用的仪器为 EC9810- O_3 监测仪 (澳大利亚 Ecotech 公司), 该仪器的精度 (体积分数) 为 1×10^{-9} , 每 5 min 获取一次数据。仪器的检测原理为紫外吸收法, 测量时使用单个玻璃测量池体, 分析仪的微处理器根据朗伯比尔定律精确地计算出臭氧的浓度。

常规气象数据是通过安装在观测点的 WatchDog2000 系列自动气象站所获取, 包括温度、湿度、太阳辐射、风速、风向等, 每小时获取一个数据。

同时, 选择晴朗无云的天气, 每个生育期利用美国 Decagon 公司生产的 SC-1 稳态气孔计对冬小麦叶片气孔导度进行测定。每次所观测的时间为 08:00 ~ 17:00, 根据实际天气状况对测量时间和周期进行调整。测量时每隔 2 h 选择 5 ~ 6 株标记过的冬小麦进行测定, 并分别计算每 2 h 的平均值。拔节期和孕穗期选择冬小麦的倒二叶, 扬花期和灌浆期选择冬小麦的旗叶进行测定。所观测的时间为 2014 ~ 2016 年每年的 3 ~ 5 月。

1.3 评估指标和模型介绍

1.3.1 AOT40 的计算

AOT40 可表示高浓度臭氧在一定的时间内对植物造成损害的累积效应, 它是一种剂量指标, 与

浓度指标相比,更能反映出臭氧对植物长时间胁迫效应,其与植物的相对产量之间有更好的相关性^[19]. 计算公式如下:

$$AOT40 = \sum (C_{O_3} - 40)$$

式中, AOT40 为大气中臭氧浓度大于 40 nL·L⁻¹ 时的小时累积效应指数.

1.3.2 气孔导度模型

气孔导度模型采用 Pleijel 等 2007 年修正的 Jarvis 型气孔导度阶乘式模型^[9], 其具体形式如下:

$$G_{ST} = g_{max} \times \min(f_{phen}, f_{O_3}) \times f_{PAR} \times \max[f_{min}, (f_{temp} \times f_{VPD})]$$

式中, G_{ST} 为气孔导度值 [以 O₃/PLA 计, mmol·(m²·s)⁻¹], g_{max} 为冬小麦最大气孔导度, 取值为 260.1 mmol·(m²·s)⁻¹. f_{phen} 、 f_{O_3} 、 f_{PAR} 、 f_{temp} 和 f_{VPD} 分别为物候期、O₃、光强、温度和水汽压差对气孔导度的限制函数, 该值介于 0~1 之间. 其中, f_{phen} 和 f_{O_3} 是最主要的限制因子, 分别用来表示植物正常发育而衰老和由于受到臭氧胁迫效应而导致植物提前衰老的影响. 如果 $f_{phen} < f_{O_3}$, 则 $\min(f_{phen}, f_{O_3}) = f_{phen}$, 表示生育期是最主要的限制因子, 反之, f_{O_3} 成为最主要的限制因子, 通常情况下, 这主要发生在冬小麦生育后期. f_{min} 是在土壤湿度不是限制条件下白天的最小气孔导度, 取值为 0.01^[20, 21]. 而 f_{phen} 函数主要基于热时间的积累而得到, 表示温度对植物发育速率的影响. 另外, 有 O₃ 胁迫的实测 G_{ST} 从 CO₂ 和 H₂O 转化为 O₃ 的计算主要根据 Graham 定律, 分子扩散转化因子为 0.61^[22].

(1) 光合有效辐射限制函数 f_{PAR}

$$f_{PAR} = 1 - e^{-L \cdot PAR}$$

式中, L 为 G_{ST} 光响应函数的饱和率, 是针对冬小麦的一个常数, PAR 为光合有效辐射.

(2) 温度限制函数 f_{temp}

$$f_{temp} = \begin{cases} \max \left\{ f_{min}, \left[\frac{(t - t_{min})(t_{max} - t)}{(t_{opt} - t_{min})(t_{max} - t_{opt})} \right]^b \right\} & (t_{min} < t < t_{max}) \\ f_{min} & (t \geq t_{max} \text{ 或 } t \leq t_{min}) \end{cases}$$

式中, t 表示小时平均温度 (°C), t_{max} 和 t_{min} 分别为限制气孔导度使得达到最低值 f_{min} 的最高和最低温度. t_{opt} 为无任何气孔导度限制时的最适温度.

$$b = \frac{t_{max} - t_{opt}}{t_{opt} - t_{min}}$$

(3) 水汽压差限制函数 f_{VPD}

$$f_{VPD} = 1/[1 + (VPD/a)^b]$$

式中, VPD 为小时水汽压差 (kPa), a 、 b 是根据函数拟合后所得到的参数.

(4) 物候限制函数 f_{phen}

$$f_{phen} = \begin{cases} 1 - \frac{(1 - f_a)(TT_{max} - TT)}{TT_{max}} & (\text{扬花期前}) \\ 1 + \frac{(1 - f_b)(TT_{max} - TT)}{(TT_{end} - TT_{max})} & (\text{扬花期后}) \end{cases}$$

式中, TT 表示基于生物学零度的有效积温 (°C·d). 参数 f_a 和 f_b 分别为开始和结束观测时的气孔导度 G_{ST} 与最大气孔导度 g_{max} 的比值.

(5) O₃ 胁迫系数 f_{O_3}

$$f_{O_3} = [1 + (AF_{sto} O_3 / 11.5)^{10}]^{-1}$$

式中, AF_{sto} 根据 1.3.3 节的相关公式来计算, 当 Y 值为 0 时观测期间的叶片累积 O₃ 吸收通量.

1.3.3 O₃ 吸收通量模型

冬小麦叶片气孔 O₃ 吸收通量的计算根据阻力相似原则, 计算公式如下:

$$F_{leaf} = \frac{[O_3]}{r_b + r_s}$$

式中, F_{leaf} 为冬小麦叶片气孔 O₃ 通量, r_b 为叶片边界层阻力, 为叶片边界层导度 (g_b) 的倒数 (以 O₃/PLA 计), 取值为 1.138 mol·(m²·s)⁻¹^[23], r_s 为气孔阻力, 是气孔导度 G_{ST} 的倒数.

累积气孔 O₃ 吸收通量计算公式如下:

$$AF_{sto} Y = \sum_{i=1}^n (F_{leafi} - Y)$$

式中, F_{leafi} 为小时 O₃ 吸收通量 (nmol·m⁻²), n 为观测期间的小时数 (h).

2 结果与分析

2.1 气象因子的变化特征

温度 (t)、相对湿度 (RH)、光合有效辐射 (PAR) 和水汽压差 (VPD) 等气象因子是影响冬小麦气孔臭氧吸收通量的主要影响因素, 图 1 为 2014~2016 年冬小麦生长季期间各气象因子的小时变化特征. 从中可以看出, 2014~2016 年温度的小时变化范围分别为 1.4~36.0、0.6~32.2 和 2.4~31.3°C. 相对湿度的变化范围分别为 10.9%~90.0%、13.9%~94.9% 和 17.7%~95.4%. 光合有效辐射的变化范围分别为 0.0~1 668.3、0.0~1 975.6 和 0.0~1 753.4 μmol·(m²·s)⁻¹. 水汽压差的变化范围分别为 0.11~4.65、0.07~3.42 和 0.07~3.32 kPa. 其中 2014 年的 3 月 1 日、3 月 19

日、3月24~25日、3月28日、4月11日、4月18~19日、4月21日、4月25~26日、5月9~10日、5月13日、5月16日、5月24日, 2015年的3月5日、3月14日、3月17~19日、3月30日、4月1~7日、4月12~13日、4月18~19日、4月28日、5月1~2日、5月8日、5月10~11日、5月14日、5月17日、5月26~27日、5月29日, 2016

年的3月3~4日、3月7~8日、3月12~13日、3月17日、3月30日、4月2~3日、4月5~6日、4月16日、4月19~20日、4月23~27日、5月1~2日、5月5日、5月9日、5月14~15日、5月20~21日、5月25~28日、5月31日为雨天, 此时温度、光合有效辐射和水汽压差下降, 而相对湿度随着降雨的发生而迅速上升。

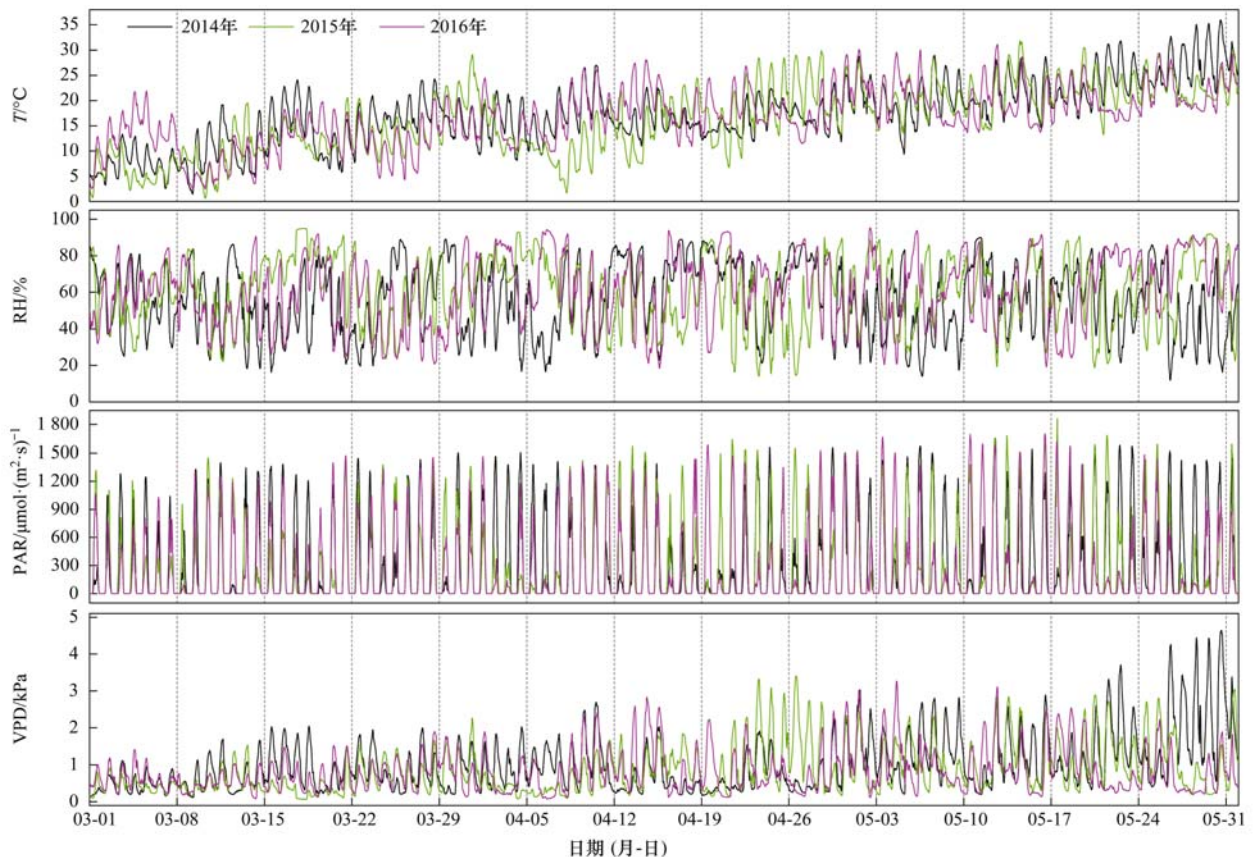


图1 冬小麦生长季期间气象因子的小时变化

Fig. 1 Hourly variation of meteorological factors during the growing season for winter wheat

2.2 臭氧浓度的变化特征

图2为2014~2016年冬小麦主要生长季期间(即每年的3月1日~5月31日)臭氧浓度的小时变化特征。从中可以看出, 臭氧浓度在整个观测期间从前期到后期总体上呈现逐渐增加的趋势, 5月最大, 3月最小。其中, 2015年平均臭氧浓度最大, 为 $37.7 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2014年与2015年相比变化不大, 为 $36.2 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2016年最小, 为 $33.6 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

为了深入地分析臭氧浓度的时间变化规律, 图3给出了2014~2016年的每年3~5月臭氧浓度的平均日变化情况, 黑色的实线为平均值, 灰色的阴影部分为标准偏差。从中可知, 一天之中臭氧浓度呈单峰型变化特征, 最低值出现在07:00左右, 之后随着太阳辐射的增强以及温度的上升, NO_x 和

VOCs等臭氧前体物光解速度增加, 导致臭氧浓度开始持续上升, 并在15:00~16:00达到一天中的最大值, 而后随着太阳辐射强度的减弱, 臭氧浓度呈现快速下降的过程。

2.3 AOT40的变化特征

图4是2014~2016年的每年3~5月AOT40的逐日累积值($\text{AOT40}_{\text{day}}$)和连续累积值(AOT40)的变化情况。可以看出, $\text{AOT40}_{\text{day}}$ 在冬小麦整个生长季期间波动比较大, 在冬小麦生长前期, 臭氧浓度较低, $\text{AOT40}_{\text{day}}$ 对AOT40的贡献较少, 而在生长季后期, 臭氧浓度较高, 导致 $\text{AOT40}_{\text{day}}$ 对AOT40的贡献较大, 甚至超过 $500 \text{ nL} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 以上。从2014~2016年, 日小时臭氧浓度大于 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的天数, 即 $\text{AOT40}_{\text{day}} > 0$ 的天数分别为82、83和79 d, 占总

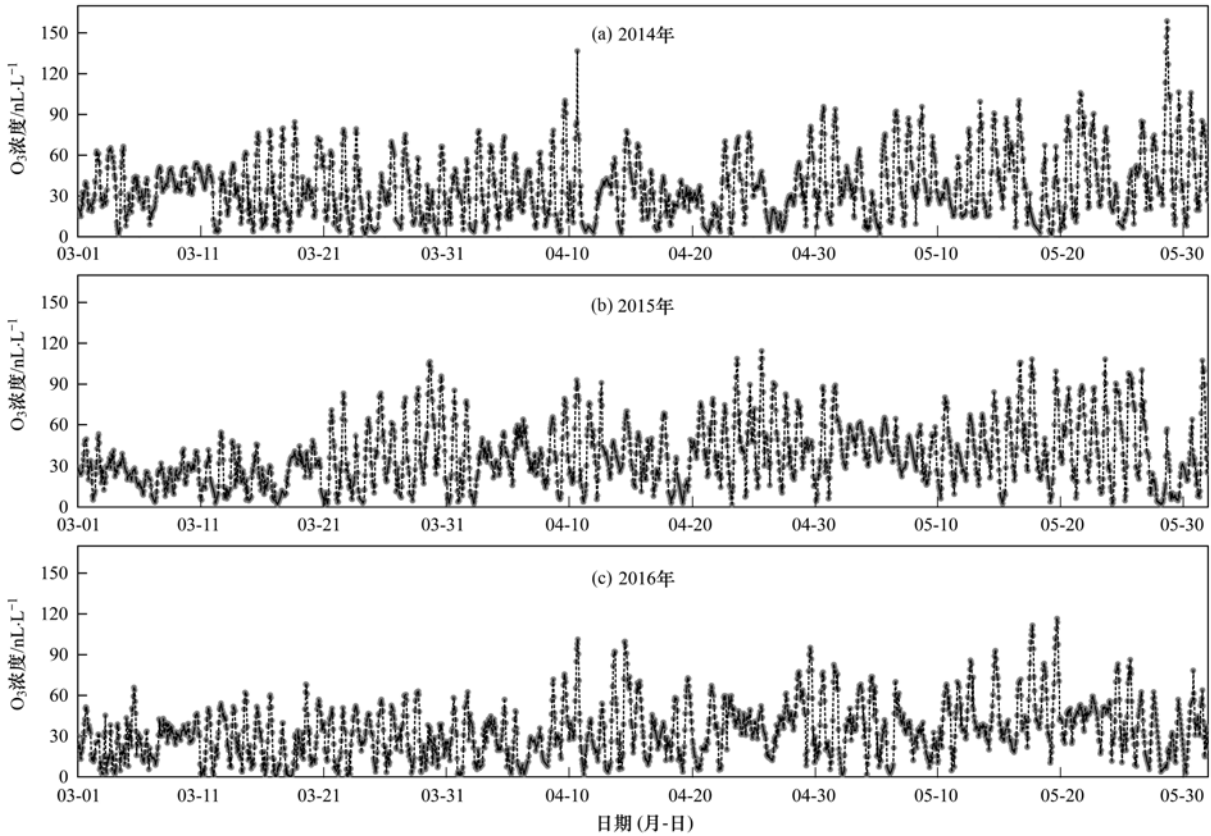


图 2 冬小麦生长季期间臭氧浓度的小时变化

Fig. 2 Hourly variation of ozone concentration during the growing season for winter wheat

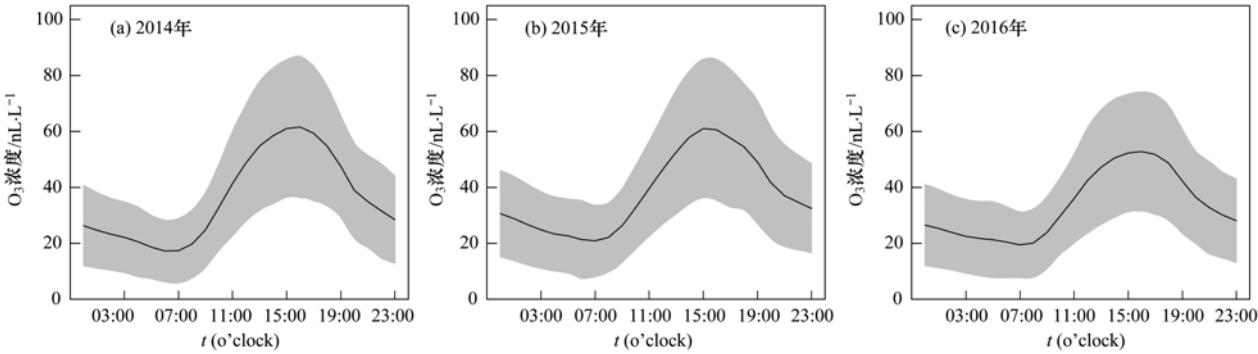


图 3 冬小麦生长期期间臭氧浓度的平均日变化特征

Fig. 3 Diurnal variation characteristics of mean ozone concentration during the growing season for winter wheat

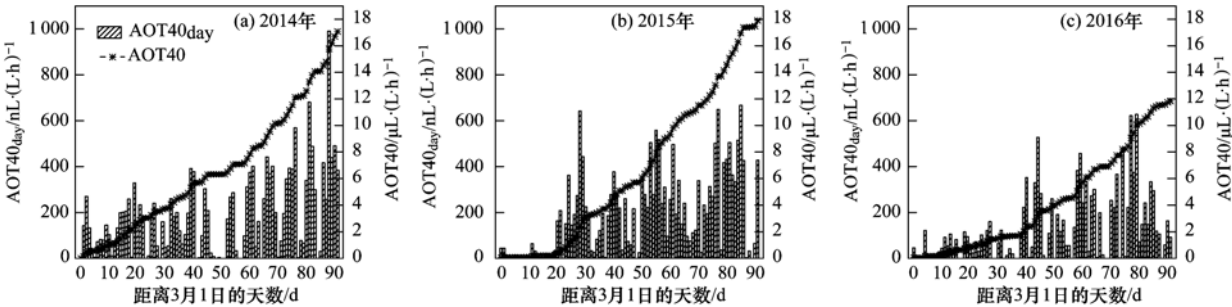


图 4 冬小麦生长季期间 AOT40_{day} 和 AOT40 的变化

Fig. 4 Changes in AOT40_{day} and AOT40 during the growing season for winter wheat

共 92 d 中的 89.13%、90.22% 和 85.87%。在整个观测期间, 计算得到 2014 ~ 2016 年 3 ~ 5 月 AOT40 的数值分别为 17.08、17.90 和 11.84 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

2.4 气孔臭氧通量的模拟

根据 Pleijel 等^[9]2007 年修正的 Jarvis 型气孔导度阶乘式模型, 在此基础上, 课题组前期对该模型已进行修正和调整, 得到了适用于本地区模型中各参数的数值, 见表 1。并将其代入到 1.3.2 节的各限制函数中, 计算出了 2014 ~ 2016 年整个观测期间限制函数 f_{PAR} 、 f_{temp} 和 f_{VPD} 的变化特征, 如图 5 所示, 其中黑线表示的是环境因子在冬小麦生长期间日均值的变化, 红线表示的是 5 日滑动平均值。结合 2.1 节中气象因子的变化特征可以看出, f_{PAR} 的值在雨天条件下较低, 而在晴天条件下, f_{PAR} 波动不太明显。而温度限制函数 f_{temp} 在整个观测期间总体上呈现逐渐增加的状态, 水汽压差限制函数 f_{VPD} 则呈现逐渐减小的状态。说明在冬小麦生育前期,

温度成为限制冬小麦气孔导度的重要因素, 而在冬小麦生育中后期, 水汽压差成为限制冬小麦气孔导度的主要因素。

表 1 气孔导度阶乘式模型中各限制函数的参数数值

Table 1 Limiting functions of the multiplicative stomatal conductance

model and values of the function parameters				
限制函数	参数	参数值	单位	文献
g_{max}	—	260.1	$\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	[7]
f_{min}	—	0.01	—	[9]
f_{PAR}	L	-0.009 24	—	[7]
f_{temp}	t_{max}	40	$^{\circ}\text{C}$	[9]
	t_{opt}	26	$^{\circ}\text{C}$	
	t_{min}	12	$^{\circ}\text{C}$	
f_{VPD}	a	2.18	—	[7]
	b	3.71	—	
f_{phen}	f_a	0.46	—	[7]
	f_b	0.77	—	
	TT_{max}	596.7	$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$	
	TT_{end}	1 300.9	$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$	

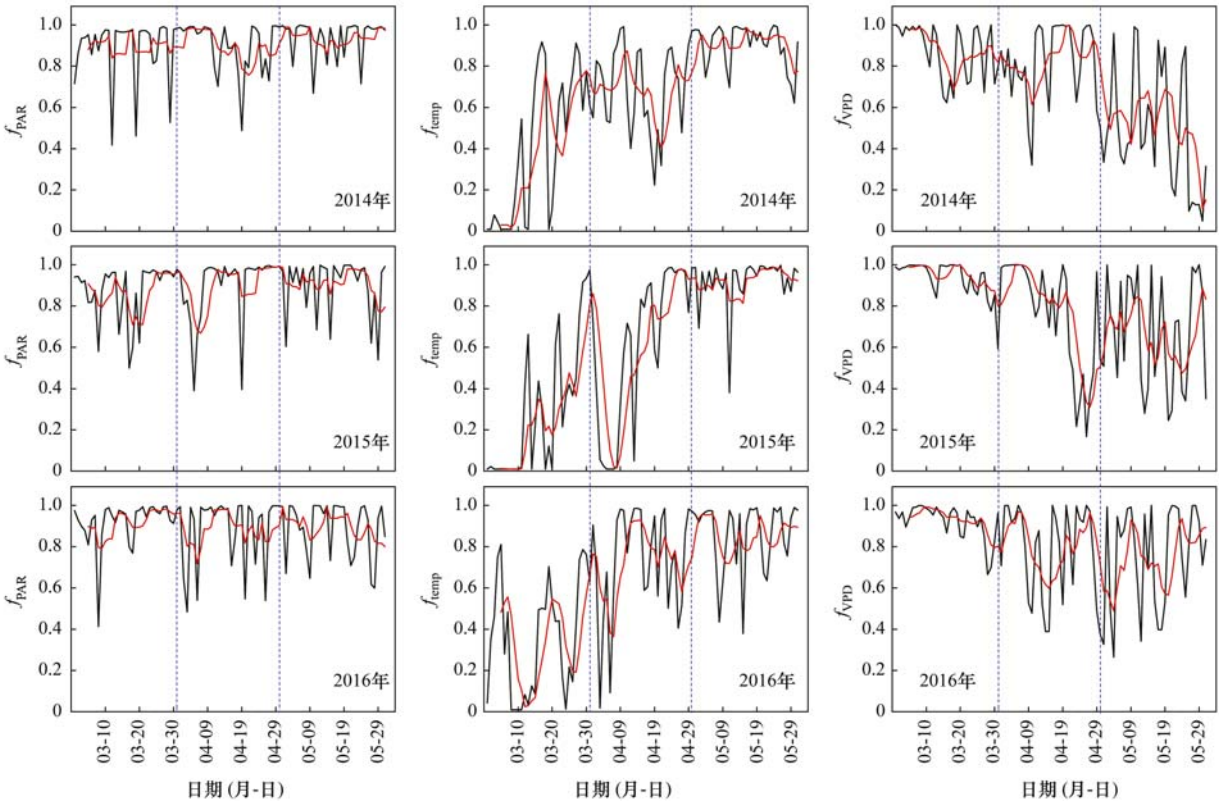


图5 环境变量影响因子的变化

Fig. 5 Variations in the impact factors of the environmental variables

根据 1.3.3 节中的公式, 分别计算了 2014 ~ 2016 年冬小麦在每年的 3 ~ 5 月每天的小时累积臭氧吸收通量 (F_{st}) 和整个观测期间臭氧累积吸收通量 (AF_{sto}), 见图 6。从中可以看出, F_{st} 整体上呈现中间高两边低的变化状态, 中间出现的高值区间对

应冬小麦扬花期与灌浆期, 此阶段为冬小麦生理活动的最强时期, 气候因子更加有利于植物叶片气孔的张开, 之后随着作物的衰老, 其生理活动减弱, 气孔导度降低, 导致气孔吸收通量变小。因此, 在 2014 ~ 2016 年 3 ~ 5 月的整个观测期间, 冬小麦气

孔臭氧累积吸收通量 (AF_{sto}) 分别为 9.36、9.32 和 8.65 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$.

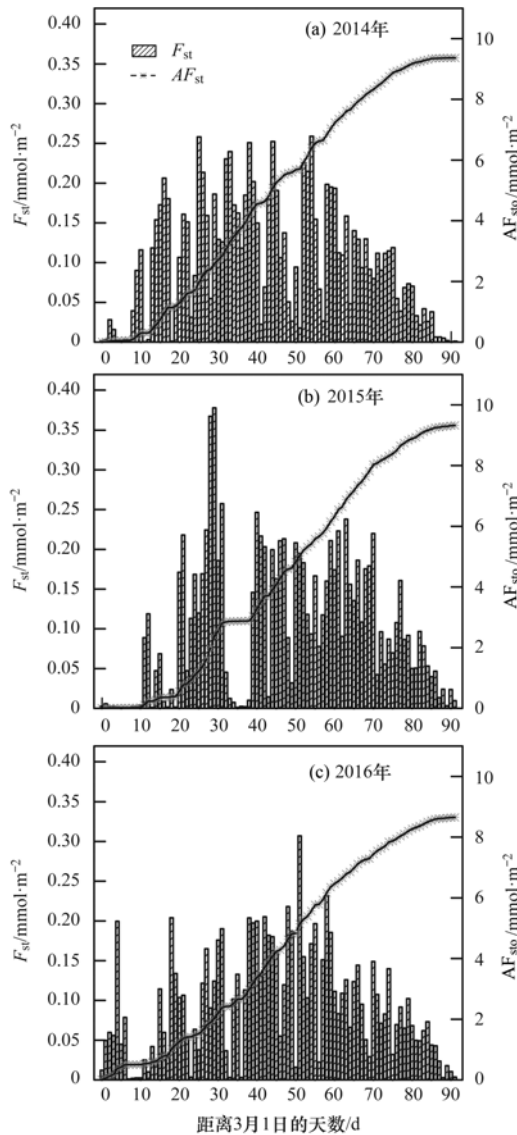


图 6 冬小麦生长季期间 F_{st} 和 AF_{st} 的变化

Fig. 6 Changes of F_{st} and AF_{st} during the growing season for winter wheat

通过连续观测 2014 ~ 2016 年冬小麦叶片在每年的 3 ~ 5 月气孔导度的小时值, 并根据 Pleijel 等修订后的气孔导度模型, 结合表 1 中模型的参数, 模拟了冬小麦 3a 的气孔导度值, 并与实测的气孔导度值进行线性回归分析, 以此来对比和验证模型的准确性, 如图 7 所示. 经过双样本 t 检验分析, 冬小麦叶片气孔导度的实测值与模拟值之间不存在极显著差异 ($P < 0.01$), 决定系数 R^2 为 0.81, 表明利用该模型模拟的气孔导度解释了实测值和模拟值中 82% 的差异性, 线性回归方程为 $y = 1.05x + 1.94$.

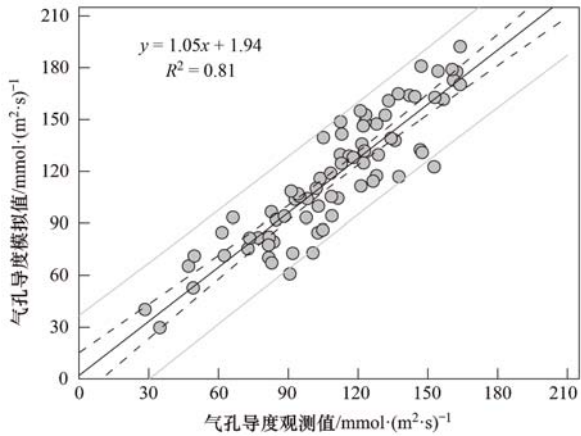


图 7 气孔导度模型的验证

Fig. 7 Validation of stomatal conductance model

2.5 臭氧对冬小麦干物质和产量损失的估算

利用本课题组前期大田实验中所获取的数据, 建立了冬小麦产量和臭氧剂量 (AOT40) 之间的函数方程, 发现冬小麦相对产量与 AOT40 之间有着很好的线性关系^[24]:

$$y = -0.0111x + 0.9929$$

式中, y 为冬小麦相对产量, x 为冬小麦生长季期间 AOT40 的值. 将 2014 ~ 2016 年的每年 3 ~ 5 月的 AOT40 [17.08、17.90 和 11.84 $\mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$] 代入到上述方程, 得到在 3 a 的臭氧浓度水平下, 冬小麦的相对产量的平均值为 81.97%, 即臭氧使冬小麦产量减少了 18.03%.

此外, 基于前期大田实验观测数据, Wu 等^[25]建立了冬小麦干物质累积损失和臭氧累积吸收通量 (AF_{st}) 的关系:

$$y = -0.0214x + 1.0018$$

式中, y 为冬小麦干物质累积相对值, x 为冬小麦生长季期间臭氧累积吸收通量的值. 将 2014 ~ 2016 年每年的 3 ~ 5 月的 AF_{st} (9.36、9.32 和 8.65 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$) 代入到上述公式, 得到在 3 a 的臭氧浓度水平下, 冬小麦的干物质累积相对平均值为 80.69%, 即臭氧使冬小麦干物质累积减少了 19.31%.

3 讨论

近年来, 我国长三角地区臭氧污染日趋严重, 已对植物的生长和产量构成威胁. 本文的研究结果表明, 2014 ~ 2015 年冬小麦生长季期间平均臭氧浓度为 35.8 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$, 该值明显高于朱治林等在我国山东省观测的结果^[26]. 研究臭氧对植物影响的最终目的是为了评估臭氧浓度增加对作物产量带来的

损失. 从 20 世纪 80 年代以来, 欧美国家率先在大田实验研究的基础上建立了相关模型来研究臭氧浓度变化对植物生长和产量的影响, 主要经历了浓度响应模型 (如 Wellbull 方程、二次方程和指数方程)^[27,28]、剂量响应模型 (如 AOT40、SUM06 等) 和通量响应模型^[29,30]. 而我国学者在臭氧对植物生物量或产量损失的估算等方面做了一些工作^[30~32], 但在相关评估方面尚未找到一个简单的综合指标体系. 因此, 本文利用前期课题组通过多年大田实验得到的臭氧剂量-冬小麦产量模型和臭氧通量-冬小麦干物质模型, 估算了近 3 年臭氧对冬小麦的潜在影响.

目前, 基于 AOT40 的剂量指标和基于气孔导度模型的通量指标通常被用来评估臭氧对植物的潜在影响. 实际上, 基于 AOT40 的剂量响应指标是一种浓度阈值方法, 它仅仅是利用冠层顶部的臭氧浓度与阈值 ($40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$) 之差的累积值而获得, 但是由于该指标未考虑到植物本身的解毒能力、防御能力和夜间的修复能力, 这在一定程度上会高估臭氧的胁迫效应, 使得该阈值并不具备明确的生物学意义^[18,33].

气孔是植物叶片与外界环境进行气体交换最主要的途径, 气孔导度表示的是气孔张开的程度, 影响着植物的蒸腾、光合和呼吸作用等. 当臭氧通过叶片气孔后, 首先影响的是靠近气孔的细胞, 使得气孔减小或闭合, 而气孔的关闭或减小将会减少叶片对二氧化碳的吸收和水汽通量, 从而影响其光合速率. 此外, 臭氧进入植物体后将会导致叶绿体结构发生改变, 从而使得植物的光合能力下降^[34]. 气孔通量指的是叶片气孔吸收的臭氧量, 它由气孔导度和臭氧浓度共同决定. 有研究表明, 基于气孔导度模型的通量响应指标, 考虑了温度、光合有效辐射、生育期、水汽压差和臭氧浓度等气候因子对植物叶片气孔通量的影响, 通过研究生物量和产量的减产率与气孔通量的关系比 AOT40 更加紧密, 具有很好的适用性, 能够更准确评估臭氧的环境影响^[9,15,21]. 例如, Pleijel 等^[35]通过比较小麦和土豆产量与 AOT40 指标和通量指标之间的关系, 发现两种植物的相对产量与通量指标的相关性比 AOT40 指标更加显著. Karlsson 等^[36]认为臭氧吸收通量比 AOT40 能更好地反映森林树木叶片伤害和生物量减少的程度. Mills 等^[37]整合分析了欧洲国家近 20 年有关臭氧对植物影响的成果, 通过研究发现利用基于臭氧通量的评估指标比基于臭氧浓度

的评估指标要好. 在我国, Feng 等^[32]的研究表明, 气孔累积吸收通量与水稻产量的相关性高于 AOT40 等剂量指标. 佟磊等^[38]的研究发现, 水稻产量与累积气孔臭氧通量具有显著的线性递减关系, 其相关系数高于臭氧浓度指标. 而他在冬小麦实验研究中发现^[39], 基于 AOT40 的剂量指标比基于臭氧通量的指标在冬小麦产量损失评估中更占优势, 这可能是由于数据样本不足降低了模型参数的拟合精度, 与此对应的是 Gonzalez-Fernandez 等^[40]的研究与之类似.

本研究得到的冬小麦产量和干物质减少的结果在一定程度上可能会高估植物产量和干物质累积的损失. 研究表明, 植物对臭氧的胁迫具有一定的适应和解毒能力, 细胞壁上的抗坏血酸盐等抗氧化剂将分解小部分臭氧^[41], 现有的研究通常设定一个阈值为 $y \text{ [nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$, 即超过该阈值的臭氧吸收通量将会对植物产量等造成损失, 也即没有臭氧吸收或其值较低时将不抑制光合作用. Pleijel 等^[9]的研究表明, 该阈值 y 取值为 $6 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时计算的累积臭氧吸收通量 (即称为臭氧吸收有效剂量) 的变化与植物产量损失相对值的相关性最高. Zhang 等认为^[10], 当 y 取值为 $9.6 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, 其计算的 $\text{POD}_{9.6}$ 的变化与大豆产量损失相对值的相关性最为显著. 佟磊等^[38]通过研究水稻臭氧通量-产量关系时发现, 当 y 为 $2 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, 气孔臭氧累积吸收通量与水稻产量的相关性最高. Wu 等指出^[25], 当阈值为 $4 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, POD_{04} 与冬小麦产量损失相对值的关系最为紧密, 这与佟磊等^[39]的研究结果一致, 但却低于国外学者对欧洲小麦的研究结果 [y 为 $5 \sim 14 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]^[9,21]. 事实上, 由于不同作物、不同生育期以及不同气候因子的差异, 使得植物对臭氧的清除能力存在较大的波动, 张巍巍等^[42]的研究则表明, 即使是同一作物, 由于品种间的不同, 对臭氧胁迫响应也存在差异^[43]. Massman^[44]认为臭氧伤害阈值是光合速率的函数, 随生育进程的光合能力变化而变化. 目前, 由于研究的局限性, 还无法确定 y 的动态变化过程, 只能通过建立 POD_y 与产量损失的关系, 从而找到其合适的阈值常数. 本文在利用气孔导度模型结合通量模型模拟冬小麦臭氧通量时并未将 y 值考虑在内, 这在一定程度上高估了冬小麦产量的损失. 因此, 结合臭氧吸收通量模型, 开展植物解毒效应的观测与模拟是当前和未来研究的热点问题.

目前, 臭氧通量的观测方法主要有箱式法、模型拟合法和微气象学法. 其中基于涡度相关法的微气象学法是近几年发展起来的一项新的先进技术, 并在国外得到一定的运用^[45, 46], 但是在中国该项技术还处于刚起步阶段, 我国科学家朱治林研究团队运用涡度相关通量法率先在鲁西北地区冬小麦麦田开展臭氧通量的观测, 弥补了我国在这一领域内的空缺, 同时也是当前我国研究臭氧对植物影响评估的一个升华^[47]. 本研究的下一步工作将引进国外先进的涡度相关技术, 在我国长三角地区冬小麦下垫面开展臭氧通量的长期观测, 为更加科学合理地评估臭氧对植物的影响提供强有力的方法和数据支撑.

4 结论

(1) 2014 ~ 2016 年冬小麦主要生长季期间(每年的 3 月 1 日 ~ 5 月 31 日), 平均臭氧浓度分别为 36.2、37.7 和 33.6 $nL \cdot L^{-1}$. 臭氧浓度从前期到后期呈现逐渐增加的状态, 并呈现明显的单峰型日变化特征. 整个观测期间, 2014 ~ 2016 年的每年 3 ~ 5 月麦田 AOT40 值分别为 17.08、17.90 和 11.84 $\mu L \cdot (L \cdot h)^{-1}$.

(2) 利用 Jarvis 气孔导度模型, 计算了冬小麦叶片气孔导度的变化, 经过与实测值的对比验证, 表明该模型可以用来模拟本地区冬小麦的气孔导度. 同时结合臭氧通量模型, 模拟了 2014 ~ 2016 年冬小麦气孔臭氧吸收通量分别为 9.36、9.32 和 8.65 $mmol \cdot m^{-2}$.

(3) 利用前期课题组建立的模型, 估算了在近 3 年臭氧浓度平均水平下, 近地层臭氧会使冬小麦产量减少 18.03%, 干物质累积减少 19.31%.

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] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, *et al.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Ashmore M, Toet S, Emberson L. Ozone-a significant threat to future world food production? [J]. *New Phytologist*, 2006, **170**(2): 201-204.
- [4] 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.
- [5] 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 O_3 pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2297-2309.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 等. 地表臭氧浓度增加对冬小麦光合作用的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(4): 847-856.
Zheng Y F, Hu C D, Wu R J, *et al.* Experiment with effects of increased surface ozone concentration upon winter wheat photosynthesis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(4): 847-856.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhu Z L, Sun X M, Zhao F H, *et al.* Ozone concentrations, flux and potential effect on yield during wheat growth in the Northwest-Shandong Plain of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **34**: 1-9.
- [12] Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z. Impacts of ozone on the biomass and yield of rice in open-top chambers [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, **13**(2): 233-236.
- [13] 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 O_3 stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(4): 1131-1137.
- [14] Emberson L D, B  ker P, Ashmore M R, *et al.* A comparison of North American and Asian exposure-response data for ozone effects on crop yields [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(12): 1945-1953.
- [15] Keller F, Bassin S, Ammann C, *et al.* High-resolution modelling of AOT40 and stomatal ozone uptake in wheat and grassland: a comparison between 2000 and the hot summer of 2003 in Switzerland [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **146**(3): 671-677.
- [16] Mills G, Buse A, Gimeno B, *et al.* A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(12): 2630-2643.

- [17] Ferretti M, Cristofolini F, Cristofori A, *et al.* A simple linear model for estimating ozone AOT40 at forest sites from raw passive sampling data[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(8): 2238-2244.
- [18] Emberson L D, Ashmore M R, Cambridge H M, *et al.* Modelling stomatal ozone flux across Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2000, **109**(3): 403-413.
- [19] Pleijel H, Ojanpera K, Danielsson H, *et al.* Effects of ozone on leaf senescence in spring wheat-possible consequences for grain yield[J]. *Phyton Annales Rei Botanicae*, 1997, **37**(3): 227-232.
- [20] Pleijel H, Danielsson H, Vandermeiren K, *et al.* Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield-results from the European CHIP programme [J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, **17**(4): 303-317.
- [21] 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.
- [22] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (2nd ed.) [M]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. 286.
- [23] Makowski D, Doré T, Monod H. A new method to analyse relationships between yield components with boundary lines[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2007, **27**(2): 119-128.
- [24] 郑有飞, 吴荣军. 地表臭氧变化特征及其作物响应[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [25] 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.
- [26] 朱治林, 孙晓敏, 赵风华, 等. 鲁西北平原冬小麦田臭氧浓度变化特征及对产量的潜在影响和机理分析[J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(4): 313-323.
- [26] Zhu Z L, Sun X M, Zhao F H, *et al.* Variation of ozone concentration of winter wheat field and mechanistic analysis of its possible effect on wheat yield in Northwest-Shandong Plain of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(4): 313-323.
- [27] Heck W W, Adams R M, Cure W W, *et al.* A reassessment of crop loss from ozone [J]. *Environmental Science and Technology*, 1983, **17**(12): 572A-581A.
- [28] 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 [J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1984, **34**(10): 1023-1034.
- [29] Pleijel H, Ojanperä K, Mortensen L. Effects of tropospheric ozone on the yield and grain protein content of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Nordic countries [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 1997, **47**(1): 20-25.
- [30] UNECE. Revised manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded[R]. Berlin: Federal Environment Agency, 1996.
- [31] 吴荣军, 郑有飞, 赵泽, 等. 基于气孔导度和臭氧吸收模型的冬小麦干物质累积损失评估[J]. *生态学报*, 2010, **30**(11): 2799-2808.
- [31] Wu R J, Zheng Y F, Zhao Z, *et al.* Assessment of loss of accumulated dry matter in winter wheat based on stomatal conductance and ozone uptake model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(11): 2799-2808.
- [32] 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.
- [33] Gieslik S. Ozone fluxes over various plant ecosystems in Italy: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1487-1496.
- [34] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 等. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(5): 645-649.
- [34] Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, *et al.* Effects of elevated ozone concentration on Ginkgo biloba photosynthesis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(5): 645-649.
- [35] Pleijel H, Danielsson H, Ojanperä K, *et al.* Relationships between ozone exposure and yield loss in European wheat and potato-a comparison of concentration-and flux-based exposure indices[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(15): 2259-2269.
- [36] Karlsson P E, Uddling J, Skärby L, *et al.* Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) saplings [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(3): 485-495.
- [37] 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.
- [38] 佟磊, 王效科, 苏德·毕力格, 等. 水稻气孔臭氧通量拟合及通量与产量关系的比较分析[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(10): 1930-1938.
- [38] Tong L, Wang X K, Sudebilige, *et al.* Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(10): 1930-1938.
- [39] 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.
- [39] 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.
- [40] Gonzalez-Fernandez I, Kaminska A, Dodmani M, *et al.* Establishing ozone flux-response relationships for winter wheat: analysis of uncertainties based on data for UK and Polish genotypes[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(5): 621-630.
- [41] Barnes J, Zheng Y B, Lyons T. Plant resistance to ozone: the role of ascorbate[A]. In: Osama K, Saji H, Youssefian S, *et al.* (Eds.). *Air Pollution and Plant Biotechnology* [M]. Tokyo: Springer, 2002. 235-252.
- [42] 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.
- [42] 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.
- [43] Zhang W W, Wang G H, Liu X B, *et al.* Effects of elevated O_3 exposure on seed yield, N concentration and photosynthesis of nine soybean cultivars (*Glycine max* (L.) Merr.) in Northeast China[J]. Plant Science, 2014, **226**: 172-181.
- [44] 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.
- [45] Fares S, Matteucci G, Mugnozza G S, *et al.* Testing of models of stomatal ozone fluxes with field measurements in a mixed Mediterranean forest[J]. Atmospheric Environment, 2013, **67**: 242-251.
- [46] 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.
- [47] 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 S, *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.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)