

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

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

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
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	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

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

赵辉^{1,2}, 郑有飞^{1,2,3*}, 曹嘉晨³, 徐静馨^{1,2}, 黄积庆^{1,2}, 袁月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. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 近地层臭氧作为一种二次污染物, 其不断增加的浓度及其对作物的影响已经成为各国政府和公众关注的焦点. 本文以冬小麦为研究对象, 基于大田 OTC 试验, 对 OTC 内气象因子和气孔导度进行连续观测. 引进气孔导度模型, 并进行本地参数化研究, 结合通量模型, 研究冬小麦气孔臭氧吸收通量的变化特征, 并对江苏省各市冬小麦气孔导度和 O_3 吸收通量的时空分布进行模拟. 结果表明, O_3 浓度增加会限制其叶片气孔导度, 浓度越高, 限制作用越明显; 利用修订后的气孔导度模型对冬小麦叶片气孔导度进行模拟, 表明模型解释了实测气孔导度 90%、77% 和 83% 的变异性. 结合通量模型对冬小麦气孔 O_3 通量进行模拟, 则 CK (约为 $53.67 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ O_3 浓度处理下冬小麦在整个 O_3 熏期的累积吸收通量分别为 6.42 、 12.27 和 $13.90 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$; 江苏地区冬小麦在其生长季期间 O_3 浓度呈逐渐增加的趋势, 冬小麦平均气孔导度的大小表现为: 中期 > 后期 > 前期的时间变化特点, 在整个中期时段气孔 O_3 累积吸收通量最多.

关键词: 气候; 江苏省; 冬小麦; 气孔; O_3 通量

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0412-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201607074

Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution

ZHAO Hui^{1,2}, ZHENG You-fei^{1,2,3*}, CAO Jia-chen³, XU Jing-xin^{1,2}, HUANG Ji-qing^{1,2}, YUAN Yue³

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As one of the main atmospheric pollutants over surface layer, researches on the increasing surface ozone concentration and its impact on main crops have become the focus of every government and the public. In this paper, based on the observations in Nanjing using the main local cultivars in China's major winter wheat producing areas, it was expected to obtain the data including ozone concentration, meteorological data and stomatal conductance by continuous observation. Stomatal conductance model was used and parameterized, combined with flux model, we analyzed the characteristics of stomatal flux in winter wheat under ozone pollution. At the same time, the stomatal conductance and stomatal ozone absorption flux of winter wheat were simulated in Jiangsu Province. The main results were as follows: Elevated ozone concentration could reduce stomatal conductance of winter wheat leaf and stomatal conductance decreased with the increase of ozone concentration. According to the observational data through the experiment, based on the boundary line technology, stomatal conductance model was parameterized to simulate stomatal conductance of wheat leaves from environmental factors. Approximately 90%, 77% and 83% variation of measured stomatal conductance could be explained by the stomatal conductance model. In the experiment, the total ozone absorption flux in ozone concentration of CK ($53.67 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$), $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ was $6.42 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$, $12.27 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$, $13.90 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ respectively. The ozone concentration gradually increased from early period to late period during the period of winter wheat growth in Jiangsu area. The average stomatal conductance followed the order of the middle stage > the later stage > the early stage. Winter wheat ozone cumulative absorption flux was the highest during the middle stage.

Key words: climate; Jiangsu Province; winter wheat; stomatal; ozone flux

近地层臭氧一方面来源于平流层的垂直输送, 另一方面主要由氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)等前体物经光化学反应所形成^[1]. 近年来, 随着我国工业化和城市化进程的加快, 各种化石燃料的燃烧、机动车尾气排放量的

急剧增加以及工业废气排放等使得我国 NO_x 和

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475108)

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

* 通信作者, E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

VOCs 等臭氧前体物显著升高, 每年排放的 NO_x 量已经占到世界总排放量的 16.4%^[2,3], 进而导致对流层臭氧浓度显著增加^[4,5], 并形成了长三角、珠三角、黄河流域和四川盆地等几大臭氧高值区^[6,7], 由于大气的长距离输送, 臭氧浓度的最大值分布区通常在农村和农业种植区, 而不是出现在城市区域^[8].

有研究表明, 全球每年由于臭氧浓度增加对作物影响带来的经济损失达 110 ~ 180 亿美元^[9,10], 若不采取有效措施, 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^[11], 严重影响到全球的粮食安全. 气孔是植物与外界进行气体交换的通道, 是臭氧进入植物体最主要途径, 影响着植物的蒸腾、光合、呼吸等重要生理过程, 所以气孔在控制植物对臭氧吸收方面起着重要的作用^[12~14]. 一方面, 气孔导度的大小影响着植物叶片对臭氧的吸入量, 当气孔导度越大时, 臭氧的吸入量就越大. 另一方面, 植物气孔的开度也会受到臭氧的影响, 大多数研究发现, 臭氧会导致气孔导度降低, 气孔阻力增加^[15~17]. 因而, 气孔导度与臭氧吸收通量的关系是当前领域研究的热点, 有研究表明, 对臭氧敏感性不同的植物其气孔导度对臭氧的反应程度不同, 即使对敏感性相同的植物而言, 当它所处的环境不同时, 其影响程度也不同^[18], 这主要是在于植物体臭氧吸收通量由环境臭氧浓度和叶片气孔导度共同制约^[19]. 由于外界环境因子对气孔运动和表面氧化反应速率的影响, 当外界臭氧浓度较高时, 植物气孔导度不一定较高, 高浓度臭氧并不一定导致较高的臭氧吸收通量. 有关臭氧对作物生长和产量的影响国内外的学者已经进行了大量报道, 但针对作物气孔 O_3 通量的研究较少^[20,21], 同时针对作物气孔 O_3 吸收通量的区域分布模拟国内尚未报道. 因此, 本文以冬小麦为研究对象, 基于大田 OTC 臭氧熏气试验, 连续观测冬小麦气孔导度和 OTC 内气象因子, 探究其气孔 O_3 通量, 这不仅可以为种植区大气污染物的环境影响评价提供参考, 也可制定防御臭氧对农作物伤害的对策提供科学依据, 以服务于我国的农业生产, 具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

本试验于 2014 年 11 月 ~ 2015 年 5 月在南京信

息工程大学农业气象试验站进行, 该试验地海拔约 22 m, 年平均温度为 15.3℃, 年均降水总量为 1 106.5 mm. 供试土壤类型为黄棕壤, 土质细腻均匀, 肥力中等, pH 为 7.37, 其中 0 ~ 30 cm 土层有机质含量为 10.35 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TN 为 0.55 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 为 0.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, TK 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 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

供试作物为冬小麦(扬麦 13), 为当地主栽品种.

1.2 试验设计

试验大田长约 40 m, 宽约 20 m. 冬小麦于 2014 年 11 月 4 日采用条播的方式播种, 行距约为 20 cm, 播种量为 55 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 播种前施足底肥, 每亩施 48.34 kg 有机-无机复混肥料, 其中 N、P、K 的含量约为 20%, 有机质为 20%, 腐殖酸为 4%, 并在冬小麦拔节期前追肥一次, 每个处理组用量约为 1 092.56 g 的磷酸二铵. 2015 年 3 月 22 日开始臭氧熏气处理, 5 月 22 日停止熏气. 日熏气时间均为 09:00 ~ 17:00, 每天共熏蒸 8 h, 雨天中止熏气, 2015 年 5 月底收获冬小麦.

试验中所用的开顶式气室(OTC)根据王春乙所设计的 OTC-1 改进而成. 整个臭氧熏气系统主要由开顶式气室、通风系统、臭氧发生和浓度控制系统组成. 开顶式气室由圆形不锈钢框架组装而成, 高 1.9 m, 底外切圆直径为 2 m, 顶端为倾角 45°的收缩口, 收缩口高 0.26 m, 气室外部采用聚乙烯塑料薄膜包裹. 气室内布气系统用与垂直主供气管相连接的 8 根水平布气管, 每根管下侧面气孔平均分布, 气孔与水平面呈 45°夹角, 布气装置的高度可以根据冬小麦高度来调节, 以便曝气更加均匀. 臭氧发生器为南京盟博环保科技有限公司生产的 MB-H-Y10 型臭氧发生器, 通过电解水产生臭氧, 生成的臭氧借助轴流式风机通过硅胶管和布气盘均匀地吹送到作物冠层, 通过玻璃转子流量计对气室内臭氧浓度进行控制.

相关试验均在 6 个完全相同的开顶式气室内进行. 试验设置 3 个水平处理组: CK(自然大气, 臭氧浓度约在 50 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右)、T100[调节臭氧浓度在 (100 ± 8) $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右]、T150[调节臭氧浓度在 (150 ± 11) $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右], 每个水平设置 2 个重复.

1.3 数据来源

气象因子的测定: 试验期间, 利用 WatchDog2000 系列小型气象站对开顶式气室内温度、相对湿度、光照强度等气象因子进行 24 h 连续

观测,每 1 h 获取一个数据。

气孔导度的测定:利用美国 Decagon 公司生产的 SC-1 稳态气孔计对植物叶片气孔导度进行测定,该仪器的工作原理为将已知扩散率的通道夹子夹在叶片上,通过测量叶片表面的水蒸气压梯度得到水蒸气通量,进而利用水蒸气通量和已知的通道扩散率得出叶片气孔导度。试验时,选择晴朗无云的天气,每 3~5 d 进行一次冬小麦气孔导度测定,具体测量时间和周期根据实际天气情况进行调整,每次测量时间为 08:00~17:00。测量时每个水平处理组均选取 2 个重复,每个重复内选取 5~6 株标记过的冬小麦进行测定。每 1 h 完成一次所有处理的气孔导度测定,每 1 h 共记录 30~36 个气孔导度数据,并对每个水平处理组分别计算 1 h 平均值。拔节期和孕穗期选取冬小麦的倒二叶,扬花期和灌浆期选取其旗叶。

江苏省各市逐时气象要素资料来源于中国天气网。江苏省各市逐时 O_3 浓度监测资料来源于环境保护部中国环境监测总站“全国城市空气质量实时发布平台”(http://www.weather.com.cn/)(http://106.37.208.233;20035/).

1.4 模型介绍

1.4.1 气孔导度模型

根据 Jarvis 气孔导度模型对气孔导度进行拟合。该模型的具体形式如下:

$$G_{ST} = g_{max} \times \min(f_{phen}, f_{O_3}) \times f_{PAR} \times \max[f_{min}, (f_{temp} f_{VPD})] \quad (1)$$

式中, G_{ST} 是气孔导度值 [以 O_3/PLA 计, $mmol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$], g_{max} 为最大气孔导度。 f_{phen} 、 f_{O_3} 、 f_{PAR} 、 f_{temp} 和 f_{VPD} 分别为物候期、 O_3 、光强、温度和水汽压差对气孔导度的限制函数,其值介于 0~1 之间,反映了各环境因子对最大气孔导度的降低程度。 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^[22]。另外,有 O_3 胁迫的实测 G_{ST} 从 CO_2 和 H_2O 转化为 O_3 的计算主要根据 Graham 定律,分子扩散转化因子为 0.61^[23]。

(1) 物候函数 f_{phen}

物候函数 f_{phen} 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^[24]。

$$f_{phen} = \begin{cases} 1 - \frac{(1-f_a)(TT_{max} - TT)}{TT_{max}} & (\text{杨花期前}) \\ 1 + \frac{(1-f_b)(TT_{max} - TT)}{(TT_{end} - TT_{max})} & (\text{杨花期后}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, TT 为高于生物学零度的有效日积温 ($^{\circ}C \cdot d$), f_a 和 f_b 分别为 O_3 熏气开始和结束时的气孔导度限制参数。

(2) 温度胁迫函数 f_{temp}

$$f_{temp} = \begin{cases} \max\left\{f_{min}, \left[\frac{(t - t_{min})(t_{max} - t)}{(t_{opt} - t_{min})(t_{max} - t_{opt})}\right]^b\right\} \\ (t_{min} < t < t_{max}) \\ f_{min} (t \geq t_{max} \text{ 或 } t \leq t_{min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, t 为小时平均温度 ($^{\circ}C$), t_{min} 和 t_{max} 为限制气孔导度使得达到最低值 f_{min} 的最低和最高温度。 t_{opt} 为无任何气孔导度限制时的最适温度。

$$b = \frac{t_{max} - t_{opt}}{t_{opt} - t_{min}} \quad (4)$$

(3) 水汽压差胁迫函数 f_{VPD}

f_{temp} 的主效应是在低温下限制气孔导度,当出现高温环境时,必须运用 VPD 值,通过 f_{VPD} 函数得到更符合实际的气孔导度。水汽压差胁迫函数 f_{VPD} 为:

$$f_{VPD} = 1/[1 + (VPD/a)^b] \quad (5)$$

式中, a 、 b 是通过函数拟合后得到的参数。

(4) 光合有效辐射强迫函数 f_{PAR}

光合有效辐射强迫函数 f_{PAR} 用下式给出:

$$f_{PAR} = 1 - e^{-L \cdot PAR_{ave}} \quad (6)$$

式中, L 是指定双曲线函数形状的一个具体参数; PAR_{ave} 表示的是小时平均光合有效辐射,公式如下:

$$PAR_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{60} (PAR_i)}{2} \quad (7)$$

(5) O_3 胁迫系数 f_{O_3}

由于 O_3 胁迫,冬小麦扬花期后叶片衰老,从而导致气孔导度下降^[22,24],因此,通过大量的 O_3 诱导冬小麦叶片衰老的 OTC 试验 O_3 胁迫系数:

$$f_{O_3} = [1 + (AF_{sto} 0/11.5)^{10}]^{-1} \quad (8)$$

式中, $AF_{sto} 0$ 根据式 (10) 来求得, Y 值为 0 时的整个 O_3 熏期叶片累积 O_3 吸收通量。

1.4.2 O_3 吸收通量模型

叶片 O_3 吸收通量的计算根据阻力相似原则,计算公式:

$$F_{leaf} = \frac{[O_3]}{r_b + r_s} \quad (9)$$

式中, F_{leaf} 为叶片气孔 O_3 吸收通量, r_b 为叶片边界层阻力,是叶片边界层导度 (g_b) 的倒数,为 $1.138 \text{ mol} \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ ^[25], r_s 为气孔阻力,其值由公式 (1) 计算得到。

累积气孔 O_3 吸收通量计算公式如下:

$$AF_{sto} Y = \sum_{i=1}^n [F_{leafi} - Y] \quad (10)$$

式中, 当 $F_{leafi} \geq Y \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, F_{leafi} 是小时 O_3 吸收通量, n 是整个 O_3 熏期的小时数.

2 结果与讨论

2.1 环境因子的变化特征

气室内温度(t)、光合有效辐射(PAR)、相对湿度(RH)、水汽压差(VPD)和 O_3 浓度是影响冬小麦气孔 O_3 通量的主要气象因子. 整个冬小麦生长季期间(3月22日~5月22日), OTC 内温度、光合有效辐射、相对湿度、水汽压差和 O_3 浓度的平均每小时变化特征如图1所示. 其中, 冬小麦在整个生长季期间的白天臭氧熏蒸时段即 09:00~17:00, 各气象因子的平均每小时的变化范围分别为 $5.6 \sim 41.3^\circ\text{C}$ 、 $5.05 \sim 1998.32 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 、 $6.7\% \sim 100\%$ 、 $0 \sim 7.26 \text{ kPa}$ 、 $2.33 \sim 114.27 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$. 从图1中可以看出, 4月2~7日、4月18~19日、5月14~15日为连续性的降水过程, 其余某些时段有少量降水, 当降水发生时, 空气温度

将会降低, 光合有效辐射和水汽压也会下降, 此时相对湿度随着降水过程的发生而迅速上升, O_3 浓度下降较为明显.

图2和图3分别是2015年3月22日~5月22日即冬小麦生长期CK对照组 O_3 浓度的日变化情况和 AOT40 的逐日累计值(AOT40_{day})和连续累积值(AOT40)的变化情况. 可以看出, O_3 呈现明显的单峰型变化规律, 峰值出现在 16:00, 谷值出现在早上 07:00. O_3 浓度的日变化与近地面大气光化学过程相关, 日出后由于太阳辐射强度的增强, 导致 NO_x 和 VOCs 等 O_3 前体物的光化学反应增强, 造成 O_3 浓度持续不断上升, 并于午后达到最大值, 而后逐渐降低, 然后在滴定作用和干沉降的影响下, 一直缓慢下降到次日的最低值. 而从图3中可以看出, AOT40_{day} 在其生长期波动较大, 最小值为 $0 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$, 最大值为 $676.23 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$, 整体上而言, 后期 AOT40_{day} 值大于前期, 这是因为冬小麦生长前期, 大气中 O_3 浓度低, 导致 AOT40_{day} 对 AOT40 的贡献要低, 这与朱治林等^[26]研究结果类似, 至冬小麦成熟时, AOT40 为 $15.08 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$.

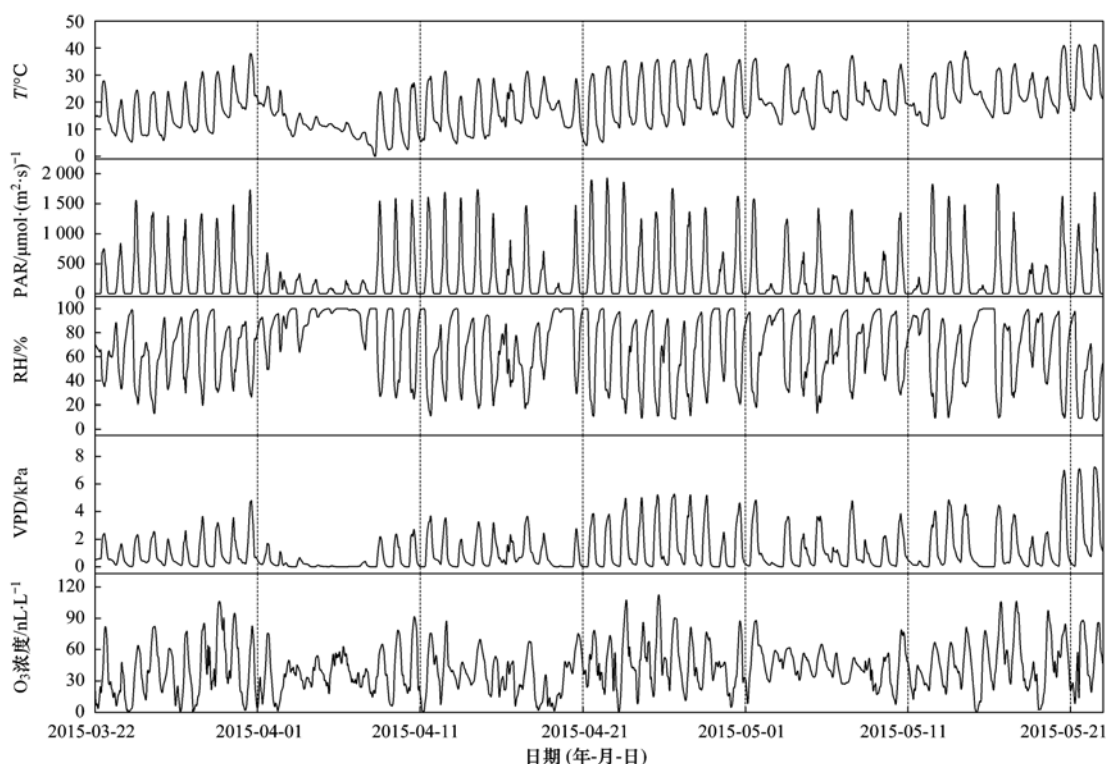


图1 OTC 内气象因子平均每小时变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of meteorological factors per hour in the OTC

2.2 气孔导度的观测

气孔是作物叶片与外界进行气体交换的通道,

也是 O_3 进入作物体内的主要途径. 气孔导度的大小影响着作物对 O_3 的吸收. 从图4可以看出, 不同

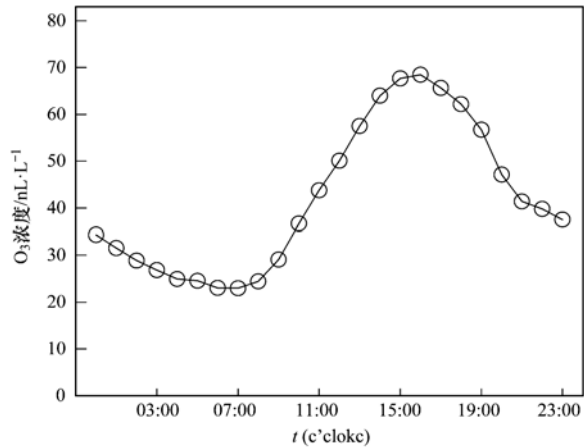


图 2 冬小麦生长季期间平均 O_3 浓度的日变化
Fig. 2 Diurnal Variation of mean ozone concentration during winter wheat growing season

O_3 浓度处理下冬小麦气孔导度具有相似的日变化模式,呈现 $CK > 100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1} > 150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的特征,并于 12:00 ~ 14:00 间达到峰值,表明环境因子(光照、温度和水汽压等)驱动下的气孔运动可能明显影响着作物气孔对 O_3 的吸收. 其中,从拔节期开始各处理组间的气孔导度就出现差异,孕穗期时差异逐渐变大,扬花期时,各处理组间的气孔导度在 12:00 时差异较大. 当冬小麦进入到成熟期时,各处理组间气孔导度差异比前几个生育期要小,但是 3 个处理组的变化趋势一致,从 08:00 开始上升,到中午 12:00 时达到最大值,而后逐渐下降.

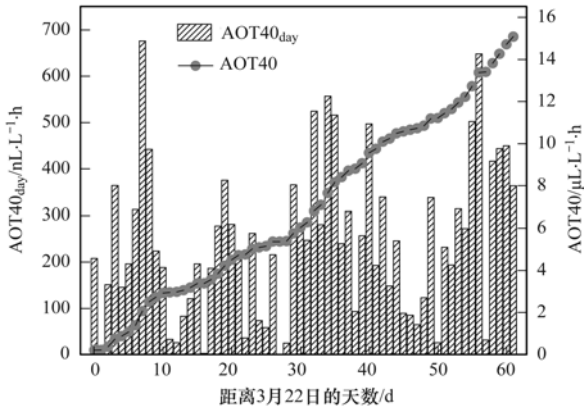


图 3 冬小麦生长季期间 $AOT40_{\text{day}}$ 和 $AOT40$ 的变化
Fig. 3 Changes of $AOT40_{\text{day}}$ and $AOT40$ during winter wheat growing season

图 5 是 3 个处理组的冬小麦在各个生育期气孔导度日均值变化的对照. 从中可以看出,随着作物生育进程的推移,冬小麦气孔导度呈现双峰型的变化模式,两个峰值分别出现在孕穗期和灌浆期,在灌浆期的时候达到最大,此时作物叶片已完全展开,叶片的光合能力最强,因此气孔导度最大,此后随着叶片的衰老,气孔导度呈现下降的趋势. $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组气孔导度在整个生育期分别比对照组 CK 降低了 18.16%、14.77%、10.72%、13.24% 和 10.84%, $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组分别比对照组 CK 降低了 30.39%、25.84%、31.42%、30.72% 和 21.61%,两个处理组在整个生长季的总平均降幅分别达 13.55% 和 28.00%. 上述研究表明,臭氧胁迫

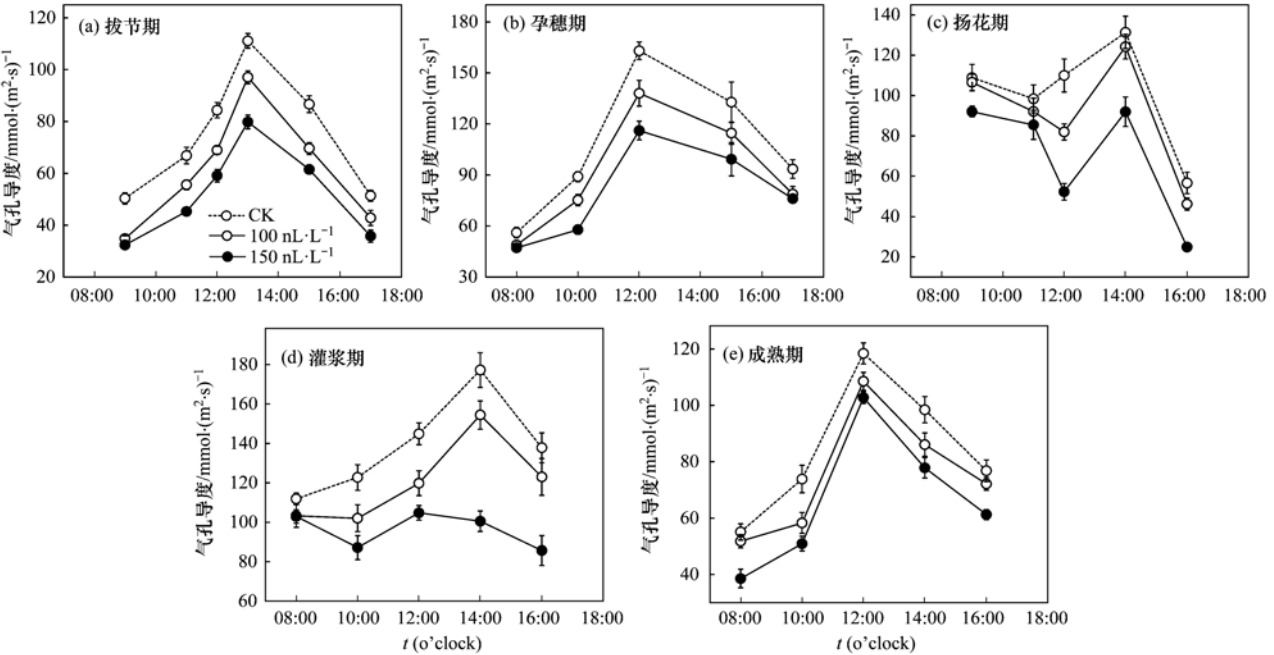


图 4 不同 O_3 浓度处理下冬小麦气孔导度日变化(平均值 $\pm$ 标准误差)
Fig. 4 Diurnal Variation of stomatal conductance of winter wheat under different ozone concentrations(mean $\pm$ SE)

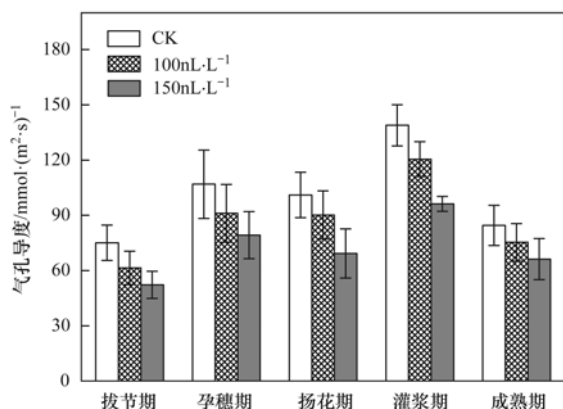


图5 不同 O_3 浓度处理下冬小麦气孔导度生育期变化
(平均值 $\pm$ 标准误差)

Fig. 5 Growth stage changes of stomatal conductance of winter wheat under different ozone concentrations (mean $\pm$ SE)

会抑制冬小麦的气孔导度, 浓度越高, 抑制作用越明显。

2.3 气孔导度模型的参数本地化

模型中参数 f_{phen} 、 f_{O_3} 、 f_{PAR} 、 f_{temp} 和 f_{VPD} 分别用来表示物候期、 O_3 、光强、温度和在水汽压差对气孔导度的限制函数, 其值介于 0 ~ 1 之间, 反映了各环境因子对最大气孔导度的降低程度。 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, 各限制函数中的参数基于边界线分析技术来确定(表1)。

最大气孔导度表示各环境因子同时处于最佳条件时作物叶片气孔的开放程度, 需要经过大量试验数据来获取, 本研究利用 SC-1 稳态气孔导度仪对冬小麦的叶片气孔导度进行了 958 次测定, 其中冬小麦最大气孔导度为 $426.4 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ (以 H_2O/PLA 计), 即 $260.1 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ (以 O_3/PLA 计), 出现在灌浆期, 该值低于国内外的试验结果^[27,28]。

光照诱导植物气孔的开闭, 是决定叶片气孔导度的重要因子。从图6中可以看出, 当光合有效辐射小于 $500 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, 气孔导度随着光强的增加而增加, 且增加速率较大, 但达到峰值 $500 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 气孔导度会维持在较高水平, 这与其他学者的研究成果相似^[21,22]。叶片气孔的运动与酶的调节能力有关, 而温度则可以影响酶的活性, 从而间接地影响作物叶片气孔导度, 因此, 温度过高或过低都会对气孔产生抑制作用^[29], 从图6中可见, 冬小麦叶片气孔导度随温度的变化呈现典型的单峰型变化状态, 其叶片气孔开放的最低和最高温度分别为 11.46°C 和 40.43°C , 气孔导度在 25.92°C 时达到最大, 温度对气孔导度影响不仅与作物的种类有关, 而

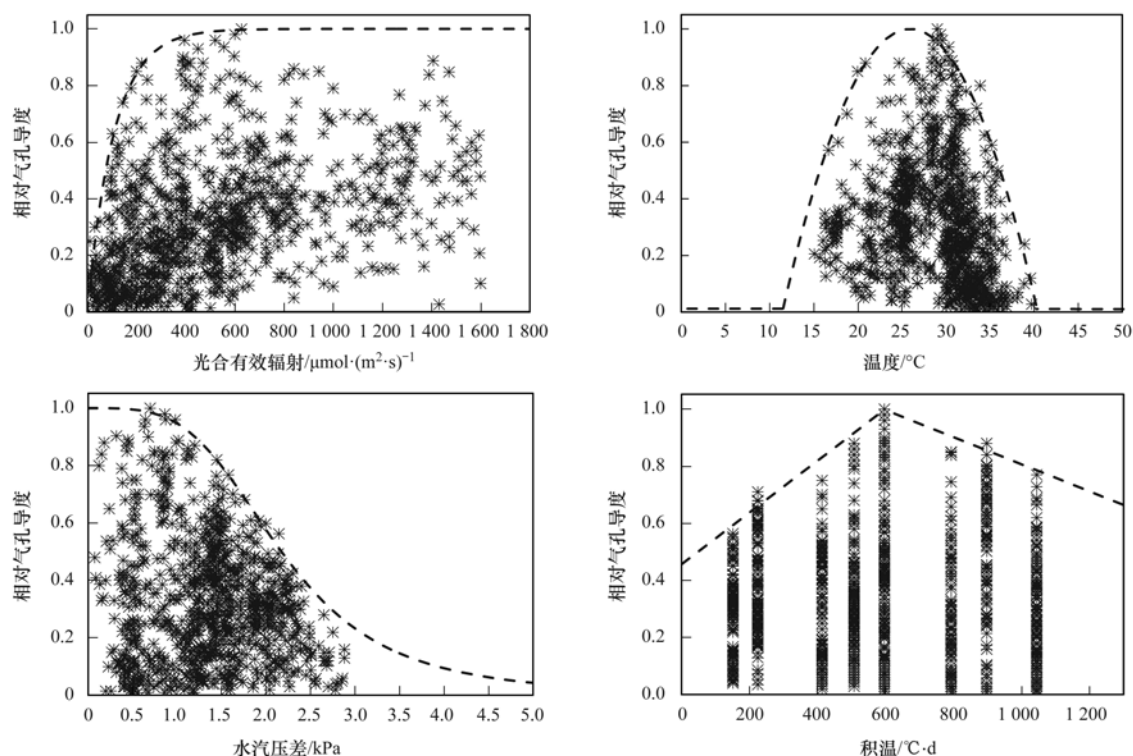


图6 气象因子对冬小麦气孔导度的限制作用

Fig. 6 Limiting effects of meteorological factor on stomatal conductance of winter wheat

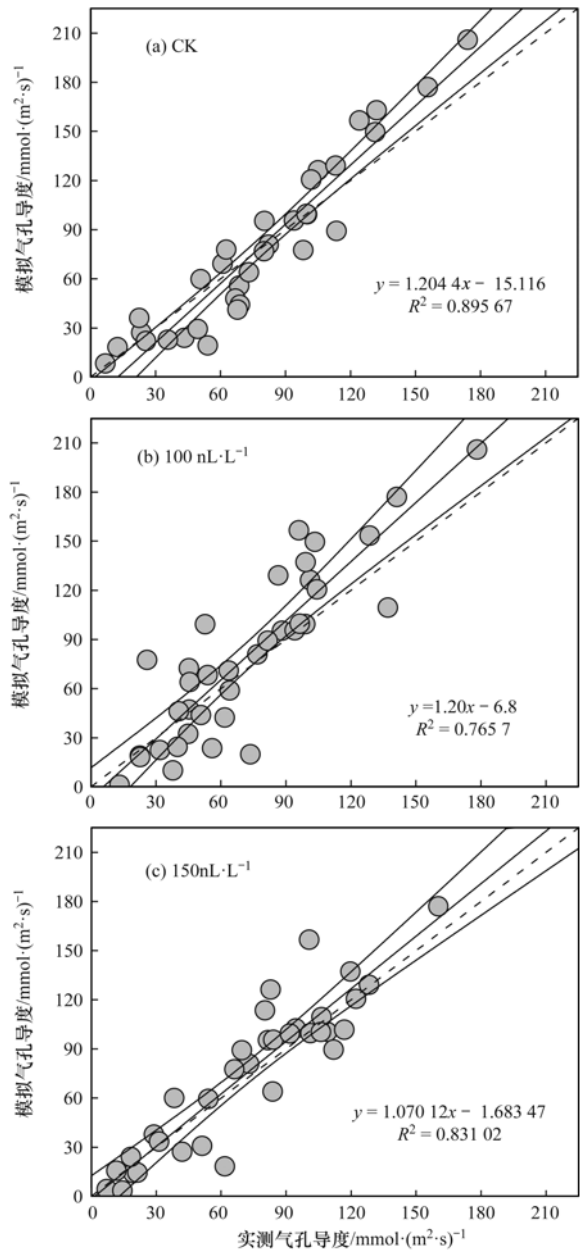


图 7 气孔导度模型的验证

Fig. 7 Validation of stomatal conductance model

且温度的改变往往使相对湿度和水汽压发生改变.

根据 Pleijel 等^[30]的研究结论,当 VPD 小于某一临界值时,作物气孔可以维持最大开度,但超过该阈值时,气孔导度将迅速下降,本研究与之类似. 当水汽压差较低时,气孔基本处于完全开放的状态,但当水汽压差超过约 1.2 kPa 时,气孔导度迅速下降,气孔开放受到明显抑制. 当水汽压差高于约 3.0 kPa 时,气孔趋于关闭. 这是因为较小的 VPD 使得植物损失的水分能够得到及时的补充,当 VPD 较大时,植物为了保护自己,防止水分散失过多,使得脱落酸增加,导致气孔导度减小^[31]. 而气孔导度的积

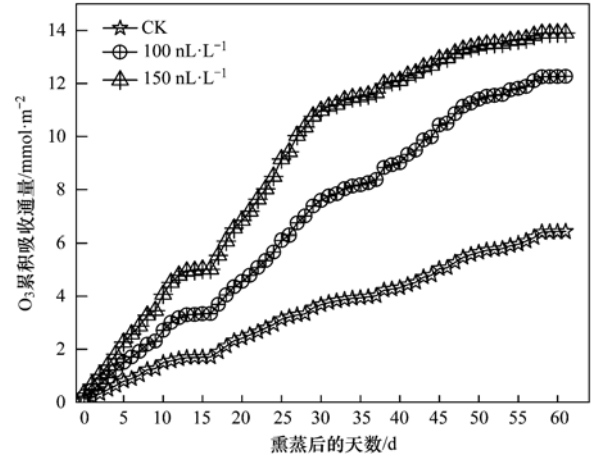


图 8 整个生育期内 O₃ 累积吸收通量的变化

Fig. 8 Change of cumulative absorption flux of ozone in the whole growth period

温响应过程呈现先增加后减小的趋势,冬小麦的有效积温增加到 596.7℃ 的过程中,气孔导度也随之增大,当有效积温超过这一温度时,其气孔导度逐渐减小并趋于关闭.

2.4 模型的检验

连续观测冬小麦不同处理组下日气孔导度,并基于参数化后的气孔导度模型模拟其整个生育期的气孔导度. 通过 t 检验分析,3 个处理组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 分别为 0.90、0.77 和 0.83,高于其他作物气孔导度的拟合结果^[21,22,32],表明修订后的模型计算得到的气孔导度解释了观测值和模拟值中 90%、77% 和 83% 的气孔导度差异,由图 7 可知,各线性回归方程分别为: $y = 1.2044x - 15.116$ 、 $y = 1.20x - 6.8$ 和 $y = 1.07012x - 1.68347$.

表 1 气孔导度模型中限制函数参数值的设定

Table 1 Limiting functions of stomatal conductance model and values of function parameter

限制函数	参数	单位	修订前	修订后
f_{PAR}	L	—	-0.0105	-0.00924
	t_{max}	℃	40	40.43
	t_{min}	℃	12	11.46
f_{VPD}	a	—	2.6	2.18
	b	—	3.4	3.71
f_{phen}	f_a	—	0.8	0.46
	f_b	—	0.2	0.77
	TT_{max}	℃·d	—	596.7
	TT_{end}	℃·d	—	1300.9

2.5 气孔 O₃ 通量的模拟

图 8 给出了冬小麦在生长季期间的 O₃ 熏气时

间段不同处理组下 O_3 累积吸收通量的变化趋势。由图可知,在 O_3 熏气前期,冬小麦的 O_3 吸收通量增长迅速,之后逐渐趋于平缓。本试验中,CK、100 $nL \cdot L^{-1}$ 和 150 $nL \cdot L^{-1} O_3$ 处理组下的累积 O_3 通量分

别为 6.42、12.27 和 13.90 $mmol \cdot m^{-2}$ 。

早期的研究认为,臭氧浓度增加与作物产量下降存在较好的线性关系,在此基础上,建立了浓度响应关系模型^[33],此方法简单,但是仅仅将臭氧浓度作为唯一影响因素来反映植物对臭氧的响应,不能完全真实地反映其伤害作用。但随后的研究表明,臭氧对作物的影响是由累积效应引起的,并据此提出了 SUM06、W126 和 AOT40 等臭氧剂量概念^[34],该方法已经考虑了臭氧浓度和暴露时间的影响,其中 AOT40 得到广泛的认可,但该模型也存在一定的限制性和不确定性,因为臭氧对作物的影响主要取决于进入叶片气孔和其他伤害部位的 O_3 通量,而基于 AOT40 等臭氧剂量指标只考虑了 O_3 浓度和熏气时间。随着研究的不断深入,一些科学家意识到臭氧对作物的影响是由叶片吸收的臭氧量决定,并提出了臭氧通量的概念,该模型既考虑了环境与物候因素,又考虑了作物对环境改变的生理响应,这个优点是其它模型不具备的^[35,36],与浓度和剂量响应模型相比,有着很好的适用性^[15,30],因此,臭氧通量已成为当前研究的热点。

有研究表明,植物体对于通过气孔进入的臭氧存在一定的适应和解毒能力,细胞壁上的抗氧化剂将会分解掉一部分臭氧^[37],然而由于不同作物、不同生育期以及不同环境因子间的差异,使得作物对臭氧的清除能力存在一定的不确定性。国内外通常把该界限值定为 $Y \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,即超过该阈值的 O_3 吸收通量将会对造成影响。鉴于当前研究的局限性,还无法确定 Y 值的动态变化过程,因此本研究中没有将 Y 值考虑在内,这从一定程度上可能会高估了作物气孔 O_3 吸收通量。

2.6 基于气孔导度模型下江苏省冬小麦气孔 O_3 通量的时空格局

为了分析江苏省冬小麦气孔 O_3 通量的时空分布特点,将作物按其主要生育期划分为前期、中期和后期这 3 个时段。其中,拔节期和孕穗期为前期,扬花期和灌浆期为中期,成熟期为后期。

从图 9 中可以看出,冬小麦在其生长季期间 3 个阶段平均 O_3 浓度大小表现为:后期 > 中期 > 前期。前期,扬州和盐城地区平均 O_3 浓度比其他城市高, O_3 浓度在 45 $nL \cdot L^{-1}$ 以上。中期与前期类似,扬州和盐城地区平均 O_3 浓度依然为全省最高,浓度分别为 58.45 $nL \cdot L^{-1}$ 和 62.39 $nL \cdot L^{-1}$,但此时宿迁、徐州和南京地区 O_3 浓度维持在一个较低的水平,尤其是宿迁,浓度仅 33.88 $nL \cdot L^{-1}$ 。生长季后期,各城

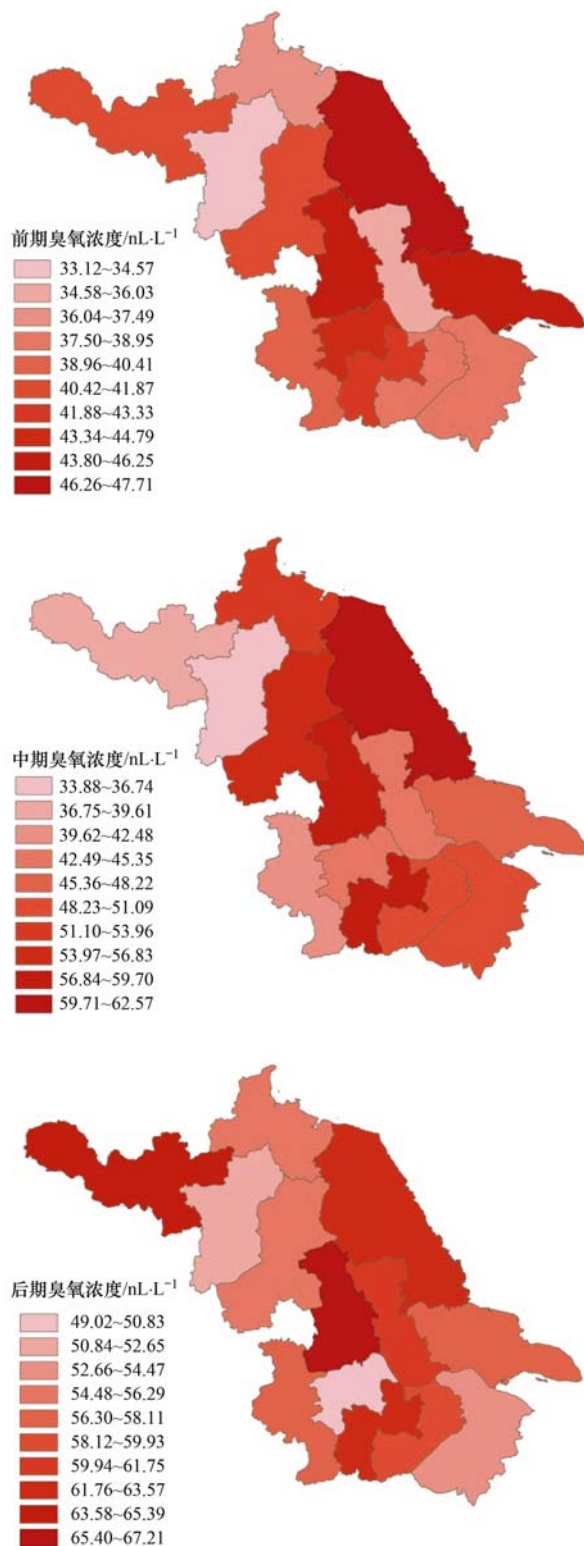


图9 江苏省各时段平均 O_3 浓度的时空分布

Fig. 9 Temporal and spatial distribution of average ozone concentration in different periods in Jiangsu

市 O₃ 平均浓度持续上升,其中扬州、徐州、常州和泰州已达到 60 nL·L⁻¹以上.

从图 10 可以看出,冬小麦生长季期间的 3 个阶段平均气孔导度的大小表现为:中期 > 后期 > 前期

的特点. 前期,各城市间的平均气孔导度分别在 41.98 ~ 67.19 mmol·(m²·s)⁻¹ 区间内. 中期时,各城市间的平均气孔导度分别在 140.14 ~ 158.29 mmol·(m²·s)⁻¹ 内. 而在生长季后期,模拟出的冬

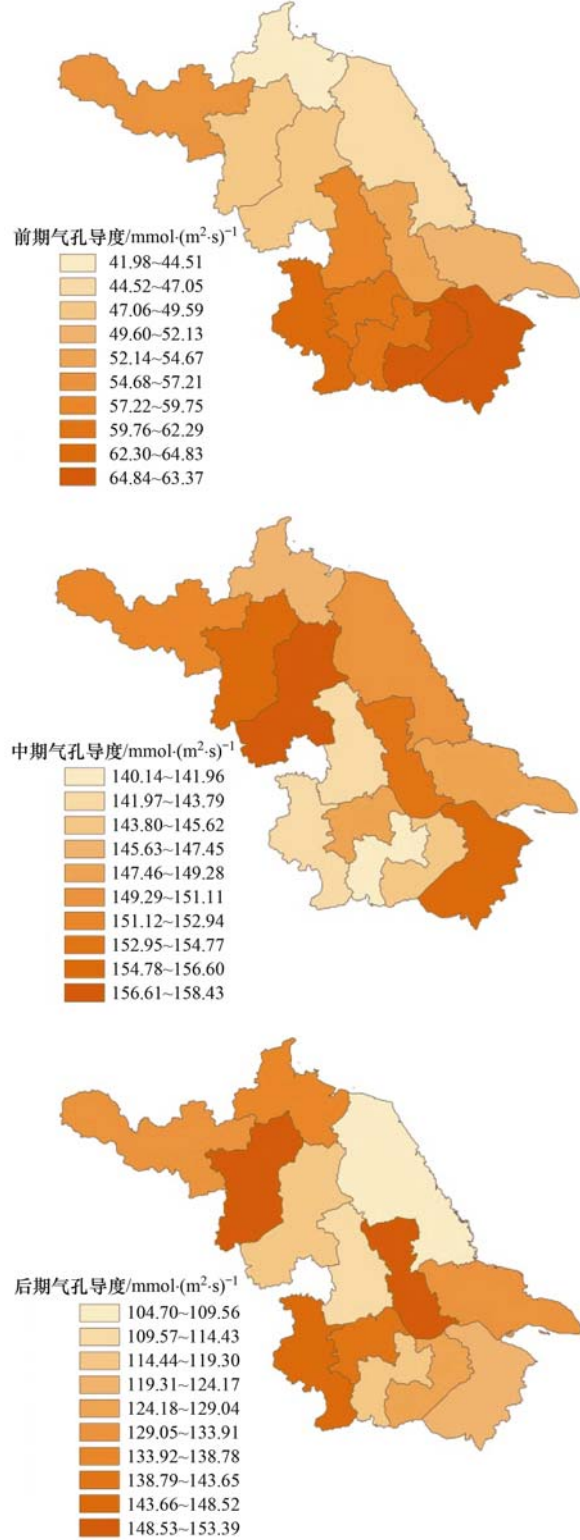


图 10 江苏省各时段平均气孔导度的时空分布
Fig. 10 Temporal and spatial distribution of average stomatal conductance in different periods in Jiangsu

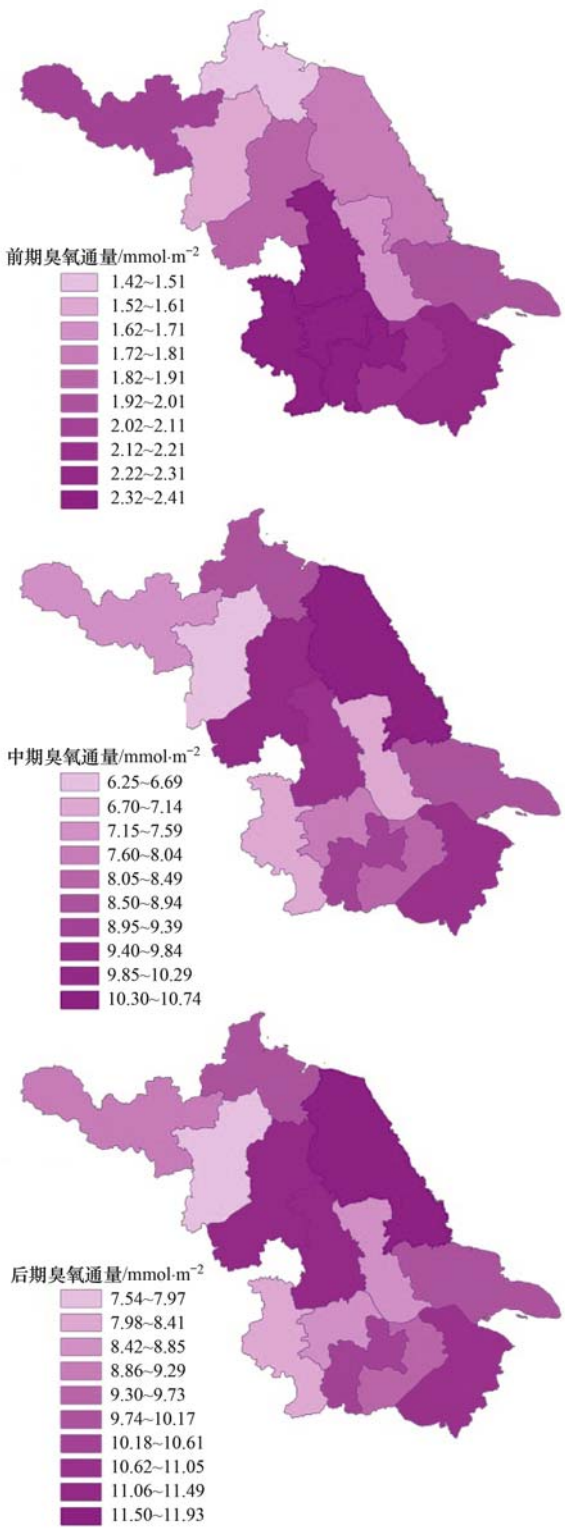


图 11 江苏省各时段气孔 O₃ 通量的时空分布
Fig. 11 Temporal and spatial distribution of stomatal stomatal ozone flux in different periods in Jiangsu

小麦气孔导度较高,其原因在于冬小麦 f_{phen} 在该时期起主导作用。

图 11 是江苏省各时段气孔 O_3 累积吸收通量的时空分布图(中期是前期和中期的累加,后期是前期、中期和后期的累加)。从中可以看出,生长季前期江苏省冬小麦气孔 O_3 累积吸收通量分别为 $1.41 \sim 2.30 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。中期,气孔 O_3 累积吸收通量为 $6.25 \sim 10.65 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。至作物生长季后期即全生育期时,冬小麦气孔 O_3 累积吸收通量分别为 $7.54 \sim 11.82 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3 结论

(1) O_3 浓度增加会限制冬小麦叶片气孔导度,浓度越高,限制作用越明显。叶片气孔导度日变化呈先增大后减小的趋势,并于正午后(12:00 ~ 14:00)达到最大值。

(2) 不同 O_3 浓度处理组下冬小麦气孔导度在灌浆期达到最大,与对照组 CK 相比, $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组气孔导度在整个生育期分别比对照组 CK 降低了 18.16%、14.77%、10.72%、13.24% 和 10.84%, $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 则降低了 30.39%、25.84%、31.42%、30.72% 和 21.61%。

(3) 利用修订后的模型对冬小麦气孔 O_3 通量进行模拟,则 CK、 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ O_3 浓度处理下冬小麦在整个 O_3 熏期的累积吸收通量分别为 6.42、12.27 和 13.90 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(4) 江苏地区冬小麦在其生长季期间从前期到后期温度、水汽压差逐渐升高,相对湿度从前期到后期整体上呈逐渐减小的趋势, O_3 浓度呈逐渐增加的趋势。冬小麦平均气孔导度的大小表现为:中期 > 后期 > 前期的时间变化特点,在整个中期时段气孔 O_3 累积吸收通量最多。

参考文献:

- [1] 李浩, 李莉, 黄成, 等. 2013 年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市 O_3 来源识别[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 1-10.
Li H, Li L, Huang C, et al. Ozone source apportionment at urban area during a typical photochemical pollution episode in the summer of 2013 in the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 1-10.
- [2] Elliot S, Blake D R, Duce R A, et al. Motorization of China implies changes in Pacific air chemistry and primary production[J]. Geophysical Research Letters, 1997, **24**(21): 2671-2674.
- [3] 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.
- [4] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 北京市夏季不同 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 807-815.
Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, et al. Different air pollution situations of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ during summer in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 807-815.
- [5] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2004 ~ 2015 年北京市清洁点臭氧浓度变化特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2847-2854.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, et al. Characteristics of ozone background concentration in Beijing from 2004 to 2015 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2847-2854.
- [6] Luo C, John J C S, Zhou X J, et al. A nonurban ozone air pollution episode over Eastern China: observations and model simulations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, **105**(D2): 1889-1908.
- [7] Felzer B S, Cronin T, Reilly J M, et al. Impacts of ozone on trees and crops[J]. Comptes Rendus Geosciences, 2007, **339**(11): 784-798.
- [8] Wang X K, Manning W, Feng Z W, et al. Ground-level ozone in China: distribution and effects on crop yields[J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 394-400.
- [9] Ashmore M, Toet S, Emberson L. Ozone-a significant threat to future world food production? [J]. New Phytologist, 2006, **170**(2): 201-204.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 寇太记, 常会庆, 张联合, 等. 近地层 O_3 污染对陆地生态系统的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(2): 704-710.
Kou T J, Chang H Q, Zhang L H, et al. Effect of near-surface O_3 pollution on terrestrial ecosystems [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(2): 704-710.
- [13] 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.
- [14] 郑有飞, 张金恩, 吴荣军, 等. UV-B 辐射增强与 O_3 胁迫对冬小麦光合特征的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 3023-3032.
Zheng Y F, Zhang J E, Wu R J, et al. Combination effects of enhanced UV-B radiation and O_3 stress on photosynthetic characteristics of winter wheat [J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 3023-3032.
- [15] Pleijel H, Danielsson H, Simpson D, et al. Have ozone effects on carbon sequestration been overestimated? A new biomass response function for wheat [J]. Biogeosciences, 2014, **11**(16): 4521-4528.
- [16] Hoshika Y, Watanabe M, Inada N, et al. Effects of ozone-induced stomatal closure on ozone uptake and its changes due to

- leaf age in sun and shade leaves of Siebold's beech[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2015, **71**(3): 218-226.
- [17] 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.
- [18] Elagöz V, Han S S, Manning W J. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity[J]. Environmental Pollution, 2006, **140**(3): 395-405.
- [19] Mauzerall D L, Wang X P. Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: reconciling science and standard setting in the United States, Europe, and Asia[J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2001, **26**(1): 237-268.
- [20] 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.
- 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (2nd ed.) [M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998. 286.
- [24] Pleijel H, Danielsson H, Karlsson G P, *et al.* An ozone flux-response relationship for wheat [J]. Environmental Pollution, 2000, **109**(3): 453-462.
- [25] Gelang J, Pleijel H, Sild E, *et al.* Rate and duration of grain filling in relation to flag leaf senescence and grain yield in spring wheat (*Triticum aestivum*) exposed to different concentrations of ozone[J]. Physiologia Plantarum, 2000, **110**(3): 366-375.
- [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.
- 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] Oue H, Feng Z Z, Pang J, *et al.* Modeling the stomatal conductance and photosynthesis of a flag leaf of wheat under elevated O₃ concentration [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2009, **65**(3): 239-248.
- [28] 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.
- [29] Livingston N J, Black T A. Stomatal characteristics and transpiration of three species of conifer seedlings planted on a high elevation south-facing clear-cut [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, **17**(10): 1273-1282.
- [30] 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.
- [31] Jones H G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [32] 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.
- [33] Heck W W, Adams R M, Cure W W, *et al.* A reassessment of crop loss from ozone[J]. Environmental Science & Technology, 1983, **17**(12): 572A-581A.
- [34] Pleijel H, Ojanpera 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.
- [35] Musselman R C, Lefohn A S, Massman W J, *et al.* A critical review and analysis of the use of exposure-and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(10): 1869-1888.
- [36] Cieslik S. Ozone fluxes over various plant ecosystems in Italy: a review [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(5): 1487-1496.
- [37] Barnes J D, 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.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172