基于涡度相关法的麦田O₃干沉降及不同沉降通道分配的特征

徐静馨¹ 郑有飞^{1,2*} 麦博儒³ 赵 辉¹ 储仲芳² 黄积庆² 袁 月²

¹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; ³中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080

摘 要 近地层高浓度臭氧(O₃)会给植物的生长发育带来严重的负效应, 而O₃本身难溶于水, 主要通过干沉降方式沉降到陆地生态系统。该研究采用涡度相关法对冬小麦(*Triticum aestivum*)田主要生育期的O₃干沉降过程进行了观测, 利用边界线技术和线性相关法分别分析了O₃干沉降速率最大值(V_{dmax})和太阳辐射(SR)、温度(T)、相对湿度(RH)及O₃干沉降速率(V_d)和摩擦速度(u^*)的关系, 并运用彭曼公式结合总初级生产力(GPP)估算不同O₃沉降通道的分配比例。研究结果表明: (1)观测期间30 min平均O₃浓度(C_{O_3})、O₃干沉降通量(F_{O_3})、 V_d 分别为32.9 nL·L⁻¹、-5.09 nmol·m⁻²·s⁻¹、0.39 cm·s⁻¹, C_{O_3} 、 F_{O_3} 、 V_d 的变化范围分别为16–58 nL·L⁻¹、-2.9–-11.7 nmol·m⁻²·s⁻¹、0.17–0.63 cm·s⁻¹, 其中 F_{O_3} 和 C_{O_3} 、 V_d 的关系并不是同步的。(2)初步推断出较强光照($SR \geq 400$ W·m⁻²)、适宜的温度($T = 18$ °C)以及较为湿润($RH > 40\%$)的环境条件比较有利于O₃干沉降过程。其中 V_{dmax} 与 SR 呈增长关系($y = 1.06 - \exp(-0.0094 - x)$), $SR < 400$ W·m⁻²时 V_{dmax} 随 SR 的增大而增大, 并在 $SR = 400$ W·m⁻²左右达到最大值, 当 $SR \geq 400$ W·m⁻²时 V_{dmax} 持续维持在最大值; V_{dmax} 与 T 呈“钟形”曲线关系($y = 1.06 - (x - 18)^2/169$), 当 $T = 18$ °C时 V_{dmax} 达到最大; 当 $RH < 40\%$ 时 V_{dmax} 呈下降趋势($y = 0.030x - 0.106$); 当相对湿度较高时, 白天的 V_d 随 RH 下降有下降趋势, 而夜间的 V_d 随 RH 增加而上升, 因此 V_d 可能随 RH 增大而增大, 也可能随 RH 增大而减小。 u^* 与 V_d 存在一定的线性正相关关系, 但相关并不显著。(3)整个观测期平均气孔O₃沉降通道和非气孔O₃沉降通道占总O₃干沉降通量的分配比例分别是32%和68%; 白天通过气孔O₃沉降通道和非气孔O₃沉降通道所沉降的O₃通量平均占总O₃干沉降通量的比例分别是42%和58%, 其中叶面积指数和降雨均会影响气孔O₃沉降。

关键词 涡度相关法; O₃干沉降; O₃通量; 冬小麦田; 气孔O₃沉降通道; 非气孔O₃沉降通道

引用格式: 徐静馨, 郑有飞, 麦博儒, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (2017). 基于涡度相关法的麦田O₃干沉降及不同沉降通道分配的特征. 植物生态学报, 41, 670–682. doi: 10.17521/cjpe.2016.0287

Characteristics and partitioning of ozone dry deposition measured by eddy-covariance technology in a winter wheat field

XU Jing-Xin¹, ZHENG You-Fei^{1,2,*}, MAI Bo-Ru³, ZHAO Hui², CHU Zhong-Fang², HUANG Ji-Qing², and YUAN Yue²

¹Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ²Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; and ³Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China

Abstract

Aims Anthropogenic pollutants cause an increase in ground-level ozone concentration, which is a known threat to plant growth and yield and has been extensively observed worldwide. Since ozone is only slightly soluble in water, it is deposited mainly through dry deposition in terrestrial ecosystem. The object of this study was to analyze the characteristics of ozone dry deposition and to estimate the contribution of stomatal and non-stomatal ozone deposition pathways to total ozone deposition in a winter wheat field.

Methods The research site was a winter wheat (*Triticum aestivum*) field located in Yongfeng experimental station of Nanjing University of Information Science & Technology. The data used in this study were collected from March 16, 2016 to May 30, 2016. We observed ozone dry deposition with an eddy-covariance system. This system mainly included a 3D sonic anemometer, an open-path infrared absorption spectrometer, a fast-response ozone chemiluminescent analyzer and a slow-response ozone monitor. We simultaneously measured meteorological data

收稿日期Received: 2016-09-13 接受日期Accepted: 2017-02-28

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn)

including solar radiation (SR), air temperature (T), air relativity humidity (RH), wind speed, net radiation, and rainfall. All raw data were recorded with data-logger and averaged every 30 min.

Important findings Half hourly means of ozone concentrations (C_{O_3}), ozone flux (F_{O_3}) and ozone dry deposition velocity (V_d) in the winter wheat field were $32.9 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, $-5.09 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.39 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the ranges of them were $16\text{--}58 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$, $-2.9\text{--}-11.7 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.17\text{--}0.63 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. F_{O_3} and C_{O_3}/V_d were found to be mismatched with phase peaks occurring at different time intervals. The ecosystem was more effective on ozone dry deposition, under conditions of moderate to high SR ($SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), moderate T and humidity ($T = 18^\circ \text{C}$ and $RH > 40\%$). The relationship between $V_{d\max}$ and SR was this function ($y = 1.06 - \exp(-0.0094 - x)$). $V_{d\max}$ increased with SR . When $SR < 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, and $V_{d\max}$ reached its maximum when $SR = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. $V_{d\max}$ maintained its maximum when $SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. The relationship between $V_{d\max}$ and T was “bell” curve ($y = 1.06 - (x - 18)^2/169$). $V_{d\max}$ reached its maximum when $T = 18^\circ \text{C}$. $V_{d\max}$ decreased with RH when $RH < 40\%$ ($y = 0.030x - 0.106$). The variation of V_d might uncertainty when RH was high. There was a liner positive relationship between friction velocity (u^*) and V_d , but this relationship was not significant. The mean day-to-day and daytime contributions of stomatal and non-stomatal ozone deposition pathway to total ozone deposition were 32%, 68% and 42%, 58%, respectively, during the whole experimental period.

Key words eddy-covariance technology; ozone dry deposition; ozone flux; winter wheat field; stomatal ozone deposition pathway; non-stomatal ozone deposition pathway

Citation: Xu JX, Zheng YF, Mai BR, Zhao H, Chu ZF, Huang JQ, Yuan Y (2017). Characteristics and partitioning of ozone dry deposition measured by eddy-covariance technology in a winter wheat field. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 670–682. doi: 10.17521/cjpe.2016.0287

近地层臭氧(O₃)是一种常见的二次污染物和温室气体。自工业革命以来, 因人类活动造成的北半球中纬度地区背景O₃浓度由 $10 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长到 $20\text{--}45 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ (Vingarzan, 2004)。预计到2050年, 全球O₃的平均浓度将增长20%–25%, 至2100年将增长40%–60% (Meehl *et al.*, 2007)。氮氧化物(NO_x)是O₃的主要前体物。近年来, 我国NO_x的排放量也显著增加, 年排放量占世界总排放量的16.4% (周秀骥, 2004), 其中大部分集中于我国东部、东南沿海区域, 包括长江三角洲、珠江三角洲、京津冀等, 导致这些地区对流层O₃浓度显著增加(许宏等, 2007; Xu *et al.*, 2008; 邓雪娇等, 2011; 万五星等, 2013)。

O₃很难溶于水, 主要通过干沉降的方式清除, 其中陆地生态系统是最重要的汇(Fowler *et al.*, 2009)。研究表明, 近地层高浓度O₃已经对陆面植被的生长发育、光合作用及其产量产生了严重的负效应(金明红和冯宗炜, 2000; 郑启伟等, 2006; 王春乙和白月明, 2007; 张薇薇等, 2009; 郑有飞等, 2010a, 2010b; Mills *et al.*, 2011; Payne *et al.*, 2011; Vandermeiren *et al.*, 2012; 朱治林等, 2012; Feng *et al.*, 2014)。

为了定量评估陆地生态系统O₃干沉降通量并预测O₃胁迫对植物的潜在影响, 国内外发展了不同

的研究方法。我国使用开顶式气室(OTC)及开放式(FACE)的方法开展了高浓度O₃胁迫对植物影响的试验研究(Feng *et al.*, 2008; 姚芳芳等, 2008; 陈娟等, 2011; 王云霞等, 2011; 郑有飞等, 2011; Wang *et al.*, 2012), 并建立了相应的O₃评估响应模型(刘建栋等, 2004; 姚芳芳等, 2007; 吴荣军等, 2010; 佟磊等, 2012)。上述两种方法仅限于农田生态系统的观测研究, 应用于陆地生态系统O₃干沉降观测时存在很大的局限性。梯度法首先观测两层高度以上的O₃浓度、风速和温度梯度, 再用通量-廓线关系计算不同生态系统的O₃沉降量(朱治林等, 2014b), 因而具有更广阔的使用范围。近年来, 随着涡度相关技术的发展, 梯度法也逐步运用到O₃干沉降观测研究, 并被认为是目前最好的研究方法(Muller *et al.*, 2010)。自20世纪70年代开始, 欧美国家利用这些方法在森林、草地和农田等陆地生态系统展开了广泛的研究(Lamaud *et al.*, 1994; Pio *et al.*, 2000; Bassin *et al.*, 2004; Fares *et al.*, 2010; Stella *et al.*, 2011, 2013)。相对而言, 我国利用梯度法和涡度相关法观测O₃干沉降的研究还处于起步阶段。少量的报道仅限于草地(潘小乐等, 2010)、玉米(*Zea mays*)田(朱治林等, 2014a)以及冬小麦(*Triticum aestivum*)田(李硕等, 2016)等生态系统的O₃干沉降的观测。

doi: 10.17521/cjpe.2016.0287

本研究基于涡度相关技术观测长三角地区冬小麦生态系统的 O_3 沉降通量,分析 O_3 浓度、 O_3 干沉降过程(O_3 通量和 O_3 干沉降速率)的日变化特征;计算主要气象因子、湍流交换强度与 O_3 干沉降速率的关系;利用彭曼公式结合总初级生产力的方法估算不同 O_3 沉降通道的分配比例。研究结果可为我国开展农田生态系统 O_3 干沉降观测和定量评估 O_3 胁迫对作物的影响提供理论依据和方法,对保证我国粮食生产安全具有重要的现实意义。

1 材料和方法

1.1 试验场地

试验于南京信息工程大学盘城镇永丰试验站冬小麦田(118.71° E, 32.19° N, 海拔22 m)。试验站周围开阔平坦,属于北亚热带湿润气候,四季分明,日照资源比较丰富。耕作土壤类型为黄棕壤,土质细腻均匀。供试作物为冬小麦品种‘扬麦13号’,由扬州里下河农业科学研究所提供,为当地主栽品种。于2015年11月上旬大田播种,至2016年6月6日成熟收割,其中冬小麦主要生育期为3–5月份(拔节期在3月16日,蜡熟时间为5月30日)。

1.2 仪器和观测

利用涡度相关系统观测 H_2O 、 CO_2 通量和 O_3 通量等干沉降数据。观测探头高度为7 m,主要由 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 浓度红外分析仪(LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Logan, USA)、快速化学发光 O_3 分析仪(FOSV12, Sextant, Wellington, New Zealand)、慢速紫外 O_3 分析仪(EC9810- O_3 , Casella Measurement, Chelmsford, UK)和CR3000数据采集系统(Campbell Scientific, Logan, USA)组成(具体装置结构图见图1)。2个 O_3 分析仪的采样进气高度均与3D超声风速仪的高度一致,快速化学发光 O_3 分析仪的工作原理为香豆素被 O_3 氧化消耗发出蓝光,被光电倍增管探测到后转化为电压输出。它获得的数据需要利用慢速紫外 O_3 分析仪得到的30 min平均 O_3 浓度进行实时校准。由于香豆素会不断地被消耗,因此试验期间每5天左右更换一次香豆素涂层片。原始涡度系统数据的采样频率是10 Hz, CR3000数据采集器在线对原始数据进行了延时纠正和时间平均等前处理,得到30 min的平均数据。其他气象要素也同时观测,包含太阳辐射(TBQ-5A, JWF, 上海)、四分量净辐射(CNR4,

图1 O_3 干沉降通量观测装置结构图。1, 三维超声风速仪; 2、3, O_3 气体采样头; 4、5, 特氟龙进气管; 6、7、8, 三通阀; 9, 气压传感器; 10, 快速化学发光 O_3 分析仪; 11, 流量控制器; 12, 缓冲瓶; 13, 辅助采样泵; 14, 慢速紫外 O_3 分析仪; 15, 4L采样泵; 16, 数据采集系统。

Fig. 1 Scheme of ozone dry deposition system. 1, 3D sonic anemometer; 2, 3, gas sampling head; 4, 5, Teflon pipe; 6, 7, 8, 3-way valve; 9, pressure sensor; 10, fast-response ozone chemiluminescent analyzer; 11, flow controller; 12, buffer bottle; 13, auxiliary sampling pump; 14, slow-response (ultraviolet absorption) ozone monitor; 15, 4 L sampling pump; 16, data collection system.

Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)、空气温湿度(HOBO U23-001 data-logger, Onset Computer, Bourne, USA), 风速、风向和降水量(Watchdog, 2900ET, Spectrum Technologies, Aurora, USA)等。 O_3 干沉降观测从2016年3月16日开始,至5月30日结束。该时间段位于冬小麦主要生育期(从拔节期至蜡熟期)。同时,从3月16日起每隔7天对冬小麦的叶面积进行测量,测量方法参照《农业气象观测规范上卷》(国家气象局,1993)。

1.3 数据质量控制和能量闭合检验

O_3 干沉降数据是在基于CR3000数据采集器的前期处理后,再通过两次坐标旋转(Wilczak *et al.*, 2001),超声虚温订正和密度响应校正(Lee & Massman, 2011)后得到的。此外,为了确保干沉降数据的有效性,对上述处理后的观测数据进行了必要的筛选和数据质量控制。去除大于3倍方差的异常数据(2.1%),去除非近似静力中性条件下的数据(4.6%),去除 O_3 浓度过低($<1 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$)的数据(2.2%),去除湍流发展不充分情况下(摩擦速度(u^*) $< 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的数据(13.2%)。

能量闭合检验用于评价和控制通量数据的质量, 利用30 min尺度上的感热通量(H)和潜热通量(LE)之和与可利用辐射能量(即净辐射通量(R_n)和5 cm土壤热通量(G)之差)做线性回归分析, 闭合度通常利用零截距回归的斜率表示。由图2可见线性回归斜率为0.72, 相关系数为0.84。国际通量站点的能量闭合情况为: 斜率范围为0.55–0.99, 相关系数为0.64–0.96 (陈云飞等, 2013)。通过对比该结果可以认为本研究中的通量数据是有效的。

1.4 O₃干沉降速率和通量的计算

O₃干沉降速率(V_d)等于O₃通量(F_{O_3})除以O₃浓度(C_{O_3})。 F_{O_3} 和 V_d 的公式如下(朱治林等, 2014a):

$$F_{O_3} = -\overline{\rho_{O_3}} V_d = \overline{\chi_{O_3}} \frac{P}{T} \frac{M_{O_3}}{R} V_d \quad (1)$$

$$V_d = -\frac{\overline{w'X'}}{\overline{X}} \quad (2)$$

式中, $\overline{\rho_{O_3}}$ 和 $\overline{\chi_{O_3}}$ 分别为慢速O₃分析仪观测的O₃浓度($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)和O₃混合比($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$), P 是大气压强(kPa), T 是空气绝对温度(K), M_{O_3} 是O₃的摩尔质量($48 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), R 是气体常数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); w 是垂直风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), X 是快速化学发光O₃分析仪的输出信号(mV), 上面的横线代表时间平均, 撇号代表变量的脉动。

V_d 最大值($V_{d\max}$)的计算参照Stella等(2011)的方法, 即为 $(R_a + R_b)$ 的倒数。 R_a 和 R_b 分别是空气动力学和边界层阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), 它们的计算主要参照Baldocchi和Meyers (1991)的方法。其中最大 $V_{d\max}$

($mV_{d\max}$)为 $1.06 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.5 冠层O₃气孔导度的估算

冠层O₃气孔导度的估算可以利用H₂O气孔通量进行推导, 后者主要利用彭曼公式转换得到(Lamaud *et al.*, 2009):

$$G_{\text{sto1}} = \frac{D_{O_3}}{D_{H_2O}} \frac{E / \delta}{1 + (E / \delta)(R_a + R_b)(\beta s / \gamma) - 1} \quad (3)$$

式中: G_{sto1} 为利用彭曼公式估算的冠层O₃气孔导度; D_{O_3} 和 D_{H_2O} 分别是O₃和H₂O的分子扩散率($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), 其中 $D_{O_3}/D_{H_2O} \approx 0.66$; E 是水汽通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); δ 是水汽饱和差($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); β 是波文比; s 是饱和曲线斜率($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); γ 是干湿常数($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$)。

在使用公式(3)的时候必须要求蒸发量完全来自于植被冠层的蒸腾作用, 而不能包括土壤或在冠层表面其他液体水(雨滴或露滴)的蒸发。因此, 在干燥条件下(即相对湿度(RH) $< 60\%$)利用公式(3)估算的冠层O₃气孔导度是有效的(Lamaud *et al.*, 2009), 而在湿润的条件下(即 $RH \geq 60\%$), 冠层O₃气孔导度的估算需要在基于公式(3)的基础上, 结合CO₂同化量(即总初级生产力(GPP))的结果来修正, 其中 GPP 的计算方法是根据Kowalski等(2003)的方法估算的。综上, 在所有相对湿度条件下的冠层O₃气孔导度公式(G_{sto})为:

$$G_{\text{sto}} = \alpha \times GPP \quad (4)$$

式中: α 为在 $RH < 60\%$ 的条件下 G_{sto1} 与 GPP 的斜率。

2 结果和分析

2.1 气象要素和O₃干沉降的平均日变化

图3是观测期间30 min太阳辐射(SR)、温度(T)、相对湿度(RH)和 C_{O_3} 、 F_{O_3} 、 V_d 和 u^* 的平均日变化。大约从7:00开始, SR 和 T 开始持续上升, RH 则开始持续下降, 其中 SR 在12:00达到峰值($600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)后逐渐下降, T 和 RH 则分别在14:00–15:00间达到最大值(22°C)和最小值(47%), 然后分别快速下降和上升。观测期间30 min平均 SR 、 T 和 RH 分别为 $165.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 17.8 和 61.7% 。 C_{O_3} 和 F_{O_3} 也均从7:00左右开始快速上升, C_{O_3} 在16:00左右达到一天的峰值后快速下降, 20:00后保持缓慢下降的趋势; F_{O_3} 在14:00左右达到一天峰值后快速上升, 前半夜缓慢下降, 后半夜缓慢上升。 V_d 和 u^* 均在0:00开始上升, V_d 在9:00左右达到最大值($0.63 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)后迅速减小, 18:00后又

图2 永丰试验站感热(H)和潜热通量(LE)之和与可利用能量($R_n - G$)的回归关系。

Fig. 2 Relationship between (sensible heat flux (H) + latent heat flux (LE)) and (net radiation flux (R_n)-soil heat flux (G)) of the Yongfeng site.

图3 观测期间30 min太阳辐射(SR)、温度(T)、相对湿度(RH)、 O_3 浓度(C_{O_3})、 O_3 通量(F_{O_3})、 O_3 干沉降速率(V_d)和摩擦速率(u^*)平均日变化。

Fig. 3 Half hourly arithmetic means of solar radiation (SR), air temperature (T), air relative humidity (RH), ozone concentration (C_{O_3}), ozone flux (F_{O_3}), ozone dry deposition velocity (V_d) and friction velocity (u^*) during the whole experimental period.

缓慢上升; u^* 在15:00达到最大值($0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)后下降, 20:00后又缓慢上升。观测期间30 min平均 C_{O_3} 、 F_{O_3} 、 V_d 和 u^* 分别为 $32.9 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $-5.09 \text{ nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中 C_{O_3} 、 F_{O_3} 、 V_d 和 u^* 的变化范围分别为 $16\text{--}58 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $-2.9\text{--}-11.7 \text{ nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.17\text{--}0.63 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.18\text{--}0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

通过对比气象要素和 O_3 干沉降数据, 发现 SR 的峰值出现在12:00, T 则在14:00–15:00间达到最大值, T 的变化相对于 SR 的变化有2–3 h的滞后性, 而 C_{O_3} 的极值出现在16:00, 相对于 T 的变化有1–2 h的滞后性。 F_{O_3} 没有表现出这种滞后性, 其值在13:00左右达到了峰值, 由此可以看出 C_{O_3} 和 F_{O_3} 的变化并不是同步的。 V_d 与 u^* 的日变化规律有一定的相似性, 但 u^* 的峰值明显滞后于 V_d 。

2.2 O_3 干沉降速率与主要控制因子的关系

为了消除 C_{O_3} 对 F_{O_3} 的影响, 一般采用参数 V_d 来研究不同陆地生态系统的 O_3 干沉降过程(Rummel *et al.*, 2007)。图4反映了观测期间30 min (包含白天(8:00–18:00)和夜间) V_d 与 SR 、 T 、 RH 和 u^* 的相互作用。 V_d 与 SR 、 T 和 RH 并非简单的线性关系, 本研究

主要采用边界线技术对上述参数的关系进行分析。该方法反映了 SR 、 T 和 RH 在一定条件下与 V_d 最大值(V_{dmax})的作用, 其中边界线可以囊括全部数据, 尽管不能反映出所有数据之间的相关关系, 但是能看出大致的变化趋势, 可为后期建立 O_3 干沉降模型奠定基础。图4A中, V_d 随 SR 有增大的趋势, 但不很明显, 白天的 V_d 与 SR 的关系基本与 V_{dmax} 的相同, 而夜间的 V_d 和 SR 值均较小, 随 SR 有增大的趋势; 通过边界线分析发现 V_{dmax} 沿 $y = 1.06 - \exp(-0.0094 - x)$ 增长, 并在 SR 为 $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时达到 mV_{dmax} 后持续维持在最大值。图4B中, V_d 与 T 的关系并没有明显的趋势关系, 白天的 V_d 与 T 的趋势基本与 V_{dmax} 的相同, 而夜间 V_d 无论是在 T 较低时增大的幅度或 T 较高时减小的幅度均没有白天时的多, 其中 $T < 15^\circ\text{C}$ 时, 夜间 V_d 变化很小; 通过边界线分析看出 V_{dmax} 与 T 的关系为“钟形”曲线($y = 1.06 - (x - 18)^2/169$), V_{dmax} 并不是单调的随 T 增加或减少, V_{dmax} 在 $T = 18^\circ\text{C}$ 的时候达到 mV_{dmax} , 在 $T < 18^\circ\text{C}$ 时 V_{dmax} 随 T 快速增加, 在 $T > 18^\circ\text{C}$ 时 V_{dmax} 随 T 快速减小。图4C中, V_d 与 RH 并没有明显的趋势关系, 白天 V_d 与 RH 的关系也与 V_{dmax} 的相似, 夜间的 V_d 则随 RH 有微弱指数增长的趋势。通过边界线分析发现 $RH < 40\%$ 的时候, V_{dmax} 沿直线 $y = 0.030x - 0.0106$ 下降。图4D中, V_d 与 u^* 呈一定的正相关关系, 但是两者之间的相关性并不显著($R^2 = 0.15$), 白天的 V_d 与 u^* 的正相关关系比 V_{dmax} 的更明显, 而夜间则不是很明显, 这同样也体现了图1中 V_d 和 u^* 的变化并不是同步的。

2.3 不同 O_3 沉降通道的分配规律

2.3.1 O_3 气孔导度的估算

为了验证彭曼公式估算的冬小麦冠层 O_3 气孔导度值(G_{stol})的有效性, 将 RH 划分为干燥条件($RH < 60\%$)和湿润条件($RH \geq 60\%$)两种情况(Lamaud *et al.*, 2009)。我们分析了不同 RH 条件下 G_{stol} 与 SR 之间的相关关系, 同时作为参考, 也分析了不同条件下总初级生产力(GPP)与 SR 之间的相关关系。图5分别为不同干湿条件下 G_{stol}/GPP 与 SR 的关系图。对比图5A与图5B可以看出, 当 $RH \geq 60\%$ 时很多散点出现在 G_{stol} – SR 的关系图中, 而这种现象并没有出现在 GPP – SR 的关系图中。这说明在冬小麦冠层表面确实有液态水的存在, 它的蒸发作用必然造成湿润条件下 G_{stol} 值的误差。由此可见, 在湿润条件下不能利用彭曼公式估算的冠层 O_3 气孔导度值。

图4 观测期间(包含白天和夜间)太阳辐射(SR)(A)、温度(T)(B)、相对湿度(RH)(C)和摩擦速度(u^*)(D)与O₃干沉降速率(V_d)的关系。
Fig. 4 Boundary-line (A, B, C) and linear (D) analysis of relationships between solar radiation (SR)(A), air temperature (T)(B), air relative humidity (RH)(C), friction velocity (u^*)(D) and ozone dry deposition velocity (V_d) during the whole experimental period (including daytime and nighttime).

图5 不同相对湿度(RH)条件下利用彭曼公式估算的冠层O₃气孔导度(G_{stol})(A)和总初级生产力(GPP)(B)与太阳辐射(SR)的关系
Fig. 5 Canopy stomatal conductance for ozone (G_{stol}) estimated by the Penman-Monteith equation (A), gross primary production (GPP) (B) vs solar radiation (SR) in two ranges of air relative humidity (RH).

图6是在干燥条件下($RH < 60\%$) G_{stol} 与 GPP 的关系图。通过双样本 t 检验分析, G_{stol} 和 GPP 之间不存在显著差异($p < 0.01$), 决定系数 R^2 为0.81, 斜率为14.35。结合公式(3)获得观测期间冬小麦冠层O₃气孔导度值(图7)。从图7可以看出, 在观测前期和观

测后期, O₃气孔导度值较低, 观测中期值较大。这样的结果比较符合冬小麦的生育期变化, 观测前期和后期主要处于冬小麦拔节期和成熟期, 中期为冬小麦生长旺盛期(抽穗-扬花-灌浆期), 且O₃气孔导度在4月20–24日(扬花期)达到最大($0.64 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。此外

图6 干燥条件下($RH < 60\%$)利用彭曼公式估算的冠层 O_3 气孔导度(G_{sto1})与总初级生产力(GPP)的关系。

Fig. 6 Canopy stomatal conductance for ozone estimated by the Penman-Monteith equation (G_{sto1}) vs gross primary production (GPP) when $RH < 60\%$.

图7 观测期间冬小麦冠层 O_3 气孔导度(G_{sto})和叶面积指数(LAI)的变化。

Fig. 7 Time series of canopy stomatal conductance for ozone (G_{sto}) and leaf area index (LAI) during the whole experimental period.

成熟期的 O_3 气孔导度比拔节期的要小。从图7中对冬小麦叶面积指数(LAI)变化可以看出, LAI 与 O_3 气孔导度的变化具有相同趋势。这说明随着冬小麦逐渐生长, LAI 逐渐达到最大($3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), O_3 气孔导度也会随之增大至峰值, 等到冬小麦达到成熟期后, 叶片开始老化, LAI 开始减小, O_3 气孔导度也随之变小。

2.3.2 不同 O_3 沉降通道的分配规律

通常假设 F_{O_3} 主要有气孔 O_3 和非气孔 O_3 这两个沉降通道。气孔 O_3 沉降通量等于冠层 O_3 气孔导度与 O_3 浓度的乘积。图8显示了观测期间冬小麦不同 O_3 沉降通道的逐日分配比例和降水量的分布。由图8可知, 整个观测期间非气孔 O_3 通道分配比例明显大于气孔 O_3 通道的分配比, 在观测中期气孔 O_3 沉降通道所占比例要大于观测前期和后期的值, 当有降雨出现的时候, 气孔 O_3 沉降通道的分配比例明显减小。在整个观测期, 平均通过气孔 O_3 沉降通道和非气孔 O_3 沉降通道所沉降的 O_3 通量占总 O_3 干沉降通

图8 观测期间冬小麦不同 O_3 沉降通道的分配比例和降水量的分布图。

Fig. 8 Day-to-day contribution of different ozone dry deposition pathways to total ozone deposition and the rainfall during the whole experimental period.

图9 冬小麦不同 O_3 沉降通道的日分配比例。

Fig. 9 Daily contribution of different ozone dry deposition pathways to total ozone deposition.

量的比例分别是32%和68%。图9显示了冬小麦不同 O_3 沉降通道的日分配比例, 可以看出夜间以非气孔沉降为主, 气孔 O_3 沉降量为0, 主要因为夜间冬小麦叶片的气孔是关闭的。白天通过气孔 O_3 沉降通道和非气孔 O_3 沉降通道所沉降的 O_3 通量平均占总 O_3 干沉降通量的比例分别是42%和58%。气孔 O_3 沉降通量在14:00–16:00出现两个峰值, 比例分别为57%和60%, 变化范围在21%–59%之间。

3 讨论

3.1 O_3 干沉降日变化过程

本研究中冬小麦田主要生育期的 O_3 干沉降通量(F_{O_3})和 O_3 沉降速率(V_d)的变化范围为 $-2.9 - -11.7 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.17-0.63 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均 F_{O_3} 与 V_d 分别为 $-5.09 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 与其他农田生态系统观测结果相似。例如, 玉米田平均 F_{O_3} 值为

-4 ~ -7 nmol·m⁻²·s⁻¹, V_d 为1~2 cm·s⁻¹ (Stella *et al.*, 2011, 2013; Loubet *et al.*, 2013); 麦田和橘园 F_{O_3} 范围分别为0 ~ -20 nmol·m⁻²·s⁻¹和-6 ~ -8 nmol·m⁻²·s⁻¹ (Tuzet *et al.*, 2011; Fares *et al.*, 2012); 葡萄和棉花 (*Gossypium hirsutum*) F_{O_3} 分别为-6 nmol·m⁻²·s⁻¹和-10 nmol·m⁻²·s⁻¹ (Grantz *et al.*, 1995, 1997); 蔬菜和马铃薯平均 F_{O_3} 和 V_d 分别为-5.08 nmol·m⁻²·s⁻¹、0.4 cm·s⁻¹和-9.5 nmol·m⁻²·s⁻¹、0.66 cm·s⁻¹ (Fowler *et al.*, 2001; Coyle *et al.*, 2009)。本团队前期(2013年)利用梯度法在同一地区的另一个试验地进行了麦田干沉降的观测并获得相应结果(李硕等, 2016)。作为一个参考, 对梯度法和涡度相关法的观测结果进行了简单对比。从表1可以看出, 梯度法观测的 F_{O_3} 和 V_d 平均值分别为-7.29 nmol·m⁻²·s⁻¹和0.55 cm·s⁻¹, 均高于涡度相关法观测结果的30%和29%, 也间接表明该地区的 C_{O_3} 年际差异并不大。对比气候因子 SR 和 RH , 发现涡度相关法观测时期的平均 SR 比梯度法低38%, 平均 RH 则高10%。较低的 SR 和较高的 RH 均会限制 V_d , 从而影响O₃的干沉降过程, 表明气象因子对O₃干沉降过程存在影响。对比两次观测的 F_{O_3} 和 V_d 的日变化结果, 发现 F_{O_3} 的变化趋势基本一致, 且峰值出现的时刻也接近; 而 V_d 峰值出现的时刻并不相同, 梯度法出现在正午, 涡度相关法则出现在上午。梯度法和涡度相关法均属于微气象法, 但两者观测的原理、所用仪器和计算方法均存在很大不同, 这本身就会对观测结果带来差距。有研究指出对于长期的观测, 梯度法的观测结果与涡度相关法的较为接近, 但对于短期或昼夜尺度的观测, 涡度相关法明显优于梯度法(Muller *et al.*, 2009)。

就O₃浓度(C_{O_3})而言, 冬小麦农田生态系统 C_{O_3} 的日变化趋势与 T 相似, 且两者显著正相关, 其原因主要是因为温度会影响O₃前体物及其化学反应的光解速率(Kurpius *et al.*, 2002)。 C_{O_3} 的昼夜差别较大, 说明该生态系统的 C_{O_3} 主要来自于局地的光化

学反应。本研究中 T 的峰值比 SR 滞后了2~3 h, C_{O_3} 的峰值比 T 也滞后2 h, 而 F_{O_3} 峰值不存在滞后现象, 与朱治林等(2014a)在玉米田生态系统得出的O₃干沉降结果相似, 原因是新生成的O₃并非立即沉降到下垫面, 而是在植被冠层内储存。 V_d 的日变化趋势与 C_{O_3} 完全不同。 V_d 的最大值出现在09:00, 与Stella等(2011)在玉米田和Zhang等(2006)在森林生态系统的观测结果相似。这可能是因为上午光照温和, 温湿度适中, 冬小麦气孔快速张开并达到最大, 因而 V_d 最高。 C_{O_3} 和 V_d 在夜间的变化很小, 因此夜间的 F_{O_3} 也较小且较平稳。当 F_{O_3} 和 V_d 达到峰值时, C_{O_3} 正处于快速增长阶段, 这种日变化的不同步现象在其他研究中也报道(Mikkelsen *et al.*, 2004; Fares *et al.*, 2013)。其原因主要是当 C_{O_3} 达到最大值的时候, 作物气孔张开度减小或开始关闭, O₃的气孔沉降开始降低, 因此 V_d 会较小。

3.2 O₃沉降速率与主要控制因子的关系

气象条件、湍流交换强度和植物生长状况均是影响O₃干沉降速率变化的重要因子(Gerosa *et al.*, 2007; Rummel *et al.*, 2007)。本研究主要针对 V_d 和主要气象因子(SR 、 T 、 RH)及 u^* 的关系进行分析, 结果表明 V_d 和 SR 、 T 、 RH 的关系并不是简单的线性相关关系。采用边界线技术对 V_{dmax} 和 SR 、 T 和 RH 的关系进行分析, 发现影响O₃干沉降过程的气象因子存在一定的阈值。具体如下: 1) 太阳辐射增强会加速大气的湍流交换, 从而有利于O₃干沉降过程, 较弱的太阳辐射反而会抑制 V_d 。本研究结果表明当 $SR < 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 V_{dmax} 随 SR 的增大而增大, 并在 $SR = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右达到最大值, 当 $SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 V_{dmax} 持续维持在最大值。2) $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 时候, V_{dmax} 达到最大值, 由此推断 $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 是冬小麦田O₃干沉降最适宜的温度, 过低或过高的 T 可能均会使 V_d 减小。可能在该温度下冬小麦的光合作用也较强, 气孔开度较大, 是有利于O₃沉降的。Fares等(2010)也指出O₃干

表1 梯度法和涡度相关法的观测结果对比

Table 1 Comparison of measurements by gradient and eddy-covariance technique

观测方法 Measurement method	下垫面 Underlying surface	观测时间 Observation time	气象因子 Meteorological factor		O ₃ 干沉降数据 Ozone dry deposition data	
			$SR \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$	$RH \text{ (%)}$	$F_{O_3} \text{ (nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_d \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1})$
梯度法 Gradient	冬小麦 Winter wheat	2013年4-5月 April-May, 2013	267	56	-7.29	0.55
涡度相关法 Eddy-covariance		2016年3-5月 March-May, 2016	165.9	61.70	-5.09	0.39

F_{O_3} , O₃干沉降通量; RH , 相对湿度; SR , 太阳辐射; V_d , O₃干沉降速率。

F_{O_3} , O₃ dry deposition flux; RH , relativity humidity; SR , solar radiation; V_d , O₃ dry deposition velocity.

沉降与温度相关性最强, 温度较低时不利于 O_3 干沉降过程(Altimir *et al.*, 2006)。3)过低的相对湿度可能是 V_d 的限制因子, 当 $RH < 40\%$ 的时候 V_{dmax} 减小, 这可能是因为在较干燥的条件下, 植物为了减少叶片的蒸腾速率和水汽通量, 叶片上的气孔会瞬间关闭(吴荣军等, 2010), 从而导致较小的 V_d ; 当相对湿度较高时, V_d 与 RH 的相互关系在白天和夜间有很大的差别: 白天的 V_d 随 RH 有下降趋势, 而夜间的 V_d 随 RH 增加而上升, 因此 V_d 可能随 RH 增大, 也可能减小。 u^* 与 V_d 呈现一定的线性正相关关系, 但是相关系数并不高($R^2 = 0.15$), 说明 O_3 干沉降过程在一定程度上受动力学控制, 但两者的变化并不是同步的。综上所述, 初步推断出在较强光照($SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)、适度的温度($T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$), 以及较为湿润($RH > 40\%$)的环境条件下比较有利于 O_3 干沉降过程, 这与其他陆地生态系统研究的结果相似(Kurpius *et al.*, 2002; Vitale *et al.*, 2005)。

此外还对比了白天和夜间的 V_d 与 SR 、 T 、 RH 和 u^* 的关系, 可以看出 V_d 与 SR 、 T 、 RH 和 u^* 的关系主要受白天的关系控制。其中 V_d 与 SR 、 T 和 RH 的关系和白天植物气孔导度与它们的关系非常相似(Pleijel *et al.*, 2007), 这同样也体现了白天气孔 O_3 沉降过程与 O_3 干沉降过程有着密切的关系, 且它的日变化过程可以控制 O_3 干沉降的变化模式(Wieser *et al.*, 2000)。

3.3 不同 O_3 沉降通道的分配规律

本研究结果表明, 当 $RH \geq 60\%$ 时由于植被冠层存在液态水蒸发的干扰, 利用彭曼公式无法准确估算冬小麦冠层 O_3 气孔导度, 而结合 GPP 进行修正后的气孔导度具有较高的准确度。然而, 当 $RH < 60\%$ 时, G_{sto1} - SR 拟合方程的截距为 $0.15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明在观测的某一个阶段也存在土壤水分蒸发的干扰, GPP - G_{sto1} 的复相关系数 $R^2 = 0.81$ 。气孔 O_3 沉降通道是指植物通过气孔吸收 O_3 的通道。 O_3 大多通过气孔沉降通道渗透至植物组织, 造成光合损伤, 因此准确计算气孔 O_3 沉降通量所占比例被认为是对植物进行 O_3 风险评估最有效的方法(Massman, 2004; Uddling *et al.*, 2004)。在整个观测期通过平均气孔 O_3 沉降通道和非气孔 O_3 沉降通道沉降的 O_3 通量占总 O_3 干沉降量的比例分别是32%和68%, 与其他生态系统的研究结果相似(Goldstein *et al.*, 2004; Vitale *et al.*, 2005; Altimir *et al.*, 2006; Hogg *et al.*, 2007; Fares *et al.*, 2012; Morani *et al.*, 2014)。这说明非气孔 O_3 沉

降通道是 O_3 干沉降的主要沉降通道, 甚至在植物气孔活动非常强烈的时期, 非气孔沉降通量仍能占总 O_3 沉降通量的50%左右(Zhang *et al.*, 2006)。此外, 气孔 O_3 通量与植物生理活性密切相关, 其会随植物冠层叶面积指数增加而增加(Massman, 2004); 降雨发生也会影响气孔 O_3 通量的吸收, 这是因为当植物冠层表面湿润的时候, 气孔会被表面的水珠或水膜阻塞而导致气孔关闭(Zhang *et al.*, 2002), 从而减小气孔 O_3 通量的吸收。通过对比不同 O_3 沉降通道的日分配比例可以发现, 白天(8:00–18:00)的气孔 O_3 沉降通量变化范围为21%–59%, 通过气孔 O_3 沉降通道和非气孔 O_3 沉降通道所沉降的 O_3 通量平均占总 O_3 干沉降通量的比例为42%和58%。这说明白天气孔 O_3 沉降对总 O_3 通量有较大贡献, 在10:00–17:00, 气孔 O_3 通量占总 O_3 通量的50%以上, 这主要和植物的光合作用、气孔吸收密切相关。其中在14:00–16:00之间气孔 O_3 沉降通量达到两次峰值(57%和60%)。有研究表明, 气孔 O_3 通量由环境 O_3 浓度和植物气孔导度共同决定(Mauzerall & Wang, 2001)。第一次峰值出现是在14:00左右, 这可能是因为此时植物的气孔开度较大, 且 C_{O_3} 也较高, 从而使气孔 O_3 通量较大。第二次峰值出现在16:00左右, 此时植物气孔导度和 F_{O_3} 均已开始减小, 但由于 C_{O_3} 峰值的出现, 从而可能使气孔 O_3 通量减小的幅度远比 F_{O_3} 的小, 从而导致气孔 O_3 沉降贡献率的峰值出现。

4 结论

基于涡度相关技术, 本研究于2016年3月16日至5月30日在南京地区冬小麦田生态系统进行了 O_3 干沉降的观测, 并通过彭曼公式结合总初级生产力方法估算得到不同 O_3 沉降通道的分配比例。具体结论如下:

(1)观测期间30 min平均 O_3 浓度(C_{O_3})、 O_3 干沉降通量(F_{O_3})、 O_3 干沉降速率(V_d)分别为 $32.9 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $-5.09 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, C_{O_3} 、 F_{O_3} 、 V_d 的变化范围分别为 $16\text{--}58 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $-2.9\text{--}-11.7 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.17\text{--}0.63 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 F_{O_3} 和 C_{O_3} 、 V_d 的日变化规律并不是同步的。

(2)利用边界线技术和线性相关分别分析了 V_d 最大值(V_{dmax})和太阳辐射(SR)、温度(T)、相对湿度(RH)及 V_d 和 u^* 的关系, 初步推断出在较强光照($SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)、适度的温度($T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$), 以及

较为湿润($RH > 40\%$)的环境条件下比较有利于O₃干沉降过程。其中 V_{dmax} 与 SR 呈增长关系($y = 1.06 - \exp(-0.0094 - x)$), $SR < 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 V_{dmax} 随 SR 的增大而增大并在 $SR = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 达到最大值, 当 $SR \geq 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 V_{dmax} 持续维持在最大值, 由此推断较弱的太阳辐射可能会抑制 V_d ; V_{dmax} 与 T 呈“钟形”曲线关系($y = 1.06 - (x - 18)^2/169$), 当 $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, V_{dmax} 达到最大, 由此推断 $T > 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 或 $T < 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 均不利于O₃干沉降过程; 当 $RH < 40\%$ 的时候 V_{dmax} 呈下降趋势($y = 0.030x - 0.106$), 由此推断过低的相对湿度可能是 V_d 的主要限制因子; 当相对湿度较高时, 白天的 V_d 随 RH 有下降趋势, 而夜间的 V_d 随 RH 增加而上升, 因此 V_d 可能随 RH 增大, 也可能减小。 u^* 与 V_d 存在一定的线性正相关关系, 但是相关关系并不显著。

(3)彭曼公式结合总初级生产力(GPP)的方法估算的冬小麦冠层O₃气孔导度是有效的。整个观测期平均气孔O₃沉降通量和非气孔O₃沉降通量占总O₃干沉降通量的分配比例分别是32%和68%; 白天通过气孔O₃沉降通道和非气孔O₃沉降通道所沉降的O₃通量平均占总O₃干沉降通量的比例分别是42%和58%, 其中 LAI 和降雨均会影响气孔O₃沉降。

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

参考文献

- Altimir N, Kolari P, Tuovinen JP, Vesala T, Bäck J, Suni T, Kulmala M, Hari H (2006). Foliage surface ozone deposition: A role for surface moisture? *Biogeosciences*, 2, 209–228.
- Baldocchi DD, Meyers TP (1991). Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest. 1. Evaporation and CO₂ efflux. *Journal of Geophysical Research*, 96, 7271–7285.
- Bassin S, Weidinger CT, Gerosa G, Fuhrer J (2004). Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: Model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment*, 38, 2349–2359.
- Chen J, Zeng Q, Zhu JG, Liu G, Cao JL, Xie ZB, Tang HY, Kazuhiko K (2011). Nitrogen supply mitigates the effects of elevated [O₃] on photosynthesis and yield in wheat. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 523–530. (in Chinese with English abstract) [陈娟, 曾青, 朱建国, 刘钢, 曹际玲, 谢祖彬, 唐昊治, 小林和彦 (2011). 施氮肥缓解臭氧对小麦光合作用和产量的影响. 植物生态学报, 35, 523–530.]
- Chen YF, Jiang H, Zhou GM, Sun C, Chen J (2013). Energy flux and energy balance closure of intensively managed Lei Bamboo forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 1063–1069. (in Chinese with English abstract) [陈云飞, 江洪, 周国模, 孙成, 陈健 (2013). 高效经营雷竹生态系统能量通量过程及闭合量. 应用生态学报, 24, 1063–1069.]
- China Meteorological Administration (1993). *Standard Specification for Agricultural Meteorological Observation*. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [国家气象局 (1993). 农业气象观测规范. 气象出版社, 北京.]
- Coyle M, Nemitz E, Storeton-West R, Fowler D, Cape JN (2009). Measurements of ozone deposition to a potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 655–666.
- Deng XJ, Zhou XJ, Wu D, Tie XX, Tan HB, Li F, Bi YY, Deng T, Jiang DH (2011). Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region. *Science China: Earth Sciences*, 41, 93–102. (in Chinese with English abstract) [邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 铁学熙, 谭浩波, 李菲, 毕雪岩, 邓涛, 蒋德海 (2011). 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响. 中国科学: 地球科学, 41, 93–102.]
- Fares S, Matteucci G, Scarascia Mugnozza G, Morani A, Calafapietra C, Salvatori E, Fusaro L, Manes F, Loreto F (2013). Testing of models of stomatal ozone fluxes with field measurements in a mixed Mediterranean forest. *Atmospheric Environment*, 67, 242–251.
- Fares S, McKay M, Holzinger R, Goldstein AH (2010). Ozone fluxes in a *Pinus ponderosa* ecosystem are dominated by non-stomatal processes: Evidence from long-term continuous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 420–431.
- Fares S, Robin W, Park JH, Goldstein AH (2012). Ozone deposition to an orange orchard: Partitioning between stomatal and non-stomatal sinks. *Environmental Pollution*, 169, 258–266.
- Feng ZZ, Kobayashi K, Ainsworth EA (2008). Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta analysis. *Global Change Biology*, 14, 2696–2708.
- Feng ZZ, Sun JS, Wan WX, Hu EZ, Calatayud V (2014). Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 193, 296–301.
- Fowler D, Flechard C, Cape JN, Storeton-West RL, Coyle M (2001). Measurements of ozone deposition to vegetation quantifying the flux, the stomatal and non-stomatal components. *Water Air and Soil Pollution*, 130, 63–74.
- Fowler D, Pilegaard K, Sutton MA, Ambus P, Raivonen M, Duyzer J, Simpson D (2009). Atmospheric composition

- change: Ecosystems-atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43, 5193–5267.
- Gerosa G, Derghi F, Cieslik S (2007). Comparison of different algorithms for stomatal ozone flux determination from micrometeorological measurements. *Water, Air and Soil Pollution*, 179, 309–321.
- Goldstein AH, McKay M, Kurpius MR, Schade GW, Lee A, Holzinger R, Rasmussen RA (2004). Forest thinning experiment confirms ozone deposition to forest canopy is dominated by reaction with biogenic VOCs. *Geophysical Research Letters*, 31, 22106. doi:10.1029/2004GL021259.
- Grantz DA, Zhang XJ, Massman WJ, Delany A, Pederson JR (1997). Ozone deposition to a cotton (*Gossypium hirsutum* L.) field: Stomatal and surface wetness effects during the California Ozone Deposition Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 19–31.
- Grantz DA, Zhang XJ, Massman WJ, Den Hartog G, Neumann HH, Pederson JR (1995). Effects of stomatal conductance and surface wetness on ozone deposition in field-grown grape. *Atmospheric Environment*, 29, 3189–3198.
- Hogg A, Uddling J, Ellsworth D, Carroll MA, Pressley S, Lamb B, Vogel CS (2007). Stomatal and non-stomatal fluxes of ozone to a northern mixed hardwood forest. *Tellus Series B—Chemical and Physical Meteorology*, 59, 514–525.
- Jin MH, Feng ZW (2000). Effects of ozone on membrane protective system of winter wheat leaves. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 444–447. (in Chinese with English abstract) [金明红, 冯宗炜 (2000). 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响. 生态学报, 20, 444–447.]
- Kowalski S, Sartore M, Burlett R, Berbigier P, Loustau D (2003). The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Global Change Biology*, 9, 1051–1065.
- Kurpius MR, McKay M, Goldstein AH (2002). Annual ozone deposition to a Sierra Nevada ponderosa pine plantation. *Atmospheric Environment*, 36, 4503–4515.
- Lamaud E, Brunet Y, Labatut A, Lopez A, Fontan I, Druilhet A (1994). The Landes experiment: Biosphere-atmosphere exchanges of ozone and aerosol particles above a pine forest. *Journal of Geophysical Research*, 99, 16511–16521.
- Lamaud E, Loubet B, Irvine M, Stella P, Personne E, Cellier P (2009). Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1385–1396.
- Lee X, Massman W (2011). A perspective on thirty years of the Webb, Pearman and Leuning density corrections. *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 37–59.
- Li S, Zheng YF, Wu RJ, Yin JF, Xu JX, Zhao H, Sun J (2016). Observation of ozone dry deposition in the field of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 1811–1819. (in Chinese with English abstract) [李硕, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 徐静馨, 赵辉, 孙健 (2016). 冬小麦臭氧干沉积过程的观测. 应用生态学报, 27, 1811–1819.]
- Liu JD, Zhou XJ, Yu Q, Yan P, Guo JP, Ding GA (2004). A numerical simulation of the impacts of ozone in the ground layer atmosphere on crop photosynthesis. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 28, 59–68. (in Chinese with English abstract) [刘建栋, 周秀骥, 于强, 颜鹏, 郭建平, 丁国安 (2004). 近地层大气臭氧对作物光合作用影响的数值模拟研究. 大气科学, 28, 59–68.]
- Loubet B, Cellier P, Fléchar C, Zurfluh O, Irvine M, Lamaud E, Stella P, Roche R, Durand B, Flura D, Masson S, Laville P, Garrigou D, Personne E, Chelle M, Castell JF (2013). Investigating discrepancies in heat, CO₂ fluxes and O₃ deposition velocity over maize as measured by the eddy-covariance and the aerodynamic gradient methods. *Agriculture and Forest Meteorology*, 169, 35–50.
- Massman WJ (2004). Toward an ozone standard to protect vegetation based on effective dose: A review of deposition resistances and possible metric. *Atmospheric Environment*, 38, 2323–2337.
- Mauzerall DL, Wang XP (2011). Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: Reconciling science and standard setting in the United States, Europe, and Asia. *Annual Review of Energy & the Environment*, 26, 237–268.
- Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JM, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ, Zhao ZC (2007). Global climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL eds. *Climate Change 2007: The Physical Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mikkelsen TN, Ro-Poulsen H, Hovmand MF, Jensen NO, Pilegaard K, Egelov AH (2004). Five-year measurements of ozone fluxes to a Danish Norwayspruce canopy. *Atmospheric Environment*, 38, 2361–2371.
- Mills G, Hayes F, Simpson D, Emberson L, Norris D, Harmens H, Bker P (2011). 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. *Global Change Biology*, 17, 592–613.
- Morani A, Nowak D, Hirabayashi S, Guidolotti G, Medori M, Muzzini V, Fares S, Muqnozsa GS, Calfapietra C (2014). Comparing i-Tree modeled ozone deposition with field measurements in a periurban Mediterranean forest. *Environmental Pollution*, 195, 202–209.
- Muller JBA, Coyle M, Fowler D, Gallagher MW, Nemitz EG, Percival CJ (2009). Comparison of ozone flux over grassland by gradient and eddy covariance technique. *Atmospheric Science Letters*, 10, 164–169.
- Muller JBA, Percival CJ, Gallagher MW, Fowler D, Coyle M,

- Nemitz E (2010). Sources of uncertainty in eddy covariance ozone flux measurements made by dry chemiluminescence fast response analysers. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 163–170.
- Pan XL, Wang ZF, Wang XQ, Dong HB, Xie FY, Guo YH (2010). An observation study of ozone dry deposition over grassland in the suburban area of Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 34, 120–130. (in Chinese with English abstract) [潘小乐, 王自发, 王喜全, 董华斌, 谢付莹, 郭宇宏 (2010). 秋季在北京城郊草地上的一次臭氧干沉降观测试验. *大气科学*, 34, 120–130.]
- Payne RJ, Stevens CJ, Dise NB, Gowing DJ, Pilkington MG, Phoenix GK, Emmett BA, Ashmore MR (2011). Impacts of atmospheric pollution on the plant communities of British acid grasslands. *Environmental Pollution*, 159, 2602–2608.
- Pio CA, Feliciano MS, Vermeulen AT, Sousa EC (2000). Seasonal variability of ozone dry deposition under southern European climate conditions, in Portugal. *Atmospheric Environment*, 34, 195–205.
- Pleijel H, Danielsson H, Emberson L, Ashmore MR, Mills G (2007). Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment*, 41, 3022–3040.
- Rummel U, Ammann C, Kirkman GA, Meixner F (2007). Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5415–5435.
- Stella P, Personne E, Lamaud E, Cellier LP (2013). Assessment of the total, stomatal, cuticular, and soil 2 year ozone budgets of an agricultural field with winter wheat and maize crops. *Biogeosciences*, 118, 1–13.
- Stella P, Personne E, Loubet B, Lamaud E (2011). Predicting and partitioning ozone fluxes to maize crops from sowing to harvest: The Surfatzm-O₃ model. *Biogeosciences*, 8, 2869–2886.
- Tong L, Feng ZW, Sudebilige, Wang Q, Geng CM, Lu F, Wang W, Ying BH, Wang XK (2012). Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2890–2899. (in Chinese with English abstract) [佟磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 王琼, 耿春梅, 逯非, 王玮, 殷宝辉, 王效科 (2012). 冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较分析. *生态学报*, 32, 2890–2899.]
- Tuzet A, Perrier A, Loubet B, Cellier P (2011). Modelling ozone deposition fluxes: The relative roles of deposition and detoxification processes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 480–492.
- Uddling J, Gundhardt-Goerg MS, Matyssek R, Oksanen E, Pleijel H, Sellden G, Karlsson PE (2004). Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake of ozone than to indices based on external exposure. *Atmospheric Environment*, 38, 4709–4719.
- Vandermeiren K, de Bock M, Horemans N, Guisez Y, Ceulemans R, Temmerman LD (2012). Ozone effects on yield quality of spring oilseed rape and broccoli. *Atmospheric Environment*, 47, 76–83.
- Vingarzan R (2004). A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 38, 3431–3442.
- Vitale M, Gerosa G, Ballarin-Denti A, Manes F (2005). 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. *Atmospheric Environment*, 39, 3267–3278.
- Wan WX, Xia YJ, Zhang HX, Wang J, Wang XK (2013). The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region. *Science China: Earth Sciences*, 33, 1098–1105. (in Chinese with English abstract) [万五星, 夏亚军, 张红星, 王娇, 王效科 (2013). 北京远郊地区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害. *中国科学: 地球科学*, 33, 1098–1105.]
- Wang CY, Bai YM (2007). *The Influence of Ozone and Aerosol Concentration on Crops*. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese). [王春乙, 白月明 (2007). O₃和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究. 气象出版社, 北京.]
- Wang XK, Zhang QQ, Zheng FX, Zheng QW, Yao FF, Chen Z, Zhang WW, Hou PQ, Feng ZZ, Song WZ, Feng ZW, Lu F (2012). Effects of elevated O₃ concentration on winter wheat and rice yields in the Yangtze River Delta, China. *Environment Pollution*, 171, 118–125.
- Wang YX, Wang XX, Yang LX, Li PL, Zhu JG, Kobayashi K, Wang YL (2011). Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: a FACE study. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 6098–6107. (in Chinese with English abstract) [王云霞, 王晓莹, 杨连新, 李潘林, 朱建国, Kobayashi K, 王余龙 (2011). 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE研究. *生态学报*, 31, 6098–6107.]
- Wieser G, Hasler R, Gotz B, Koch W, Havranek WM (2000). Role of climate, crown position, tree age and altitude in calculated ozone flux into needles of *Picea abies* and *Pinus cembra*: A synthesis. *Environmental Pollution*, 109, 415–422.
- Wilczak JM, Oncley SP, Stage SP (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127–150.
- Wu RJ, Zheng YF, Zhao Z, Hu CD, Wang LX (2010). Assessment of loss of accumulated dry matter in winter wheat based on stomatal conductance and ozone uptake model. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2799–2808. (in Chinese with English abstract) [吴荣军, 郑有飞, 赵泽, 胡程达, 王连喜 (2010). 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. 生态学报, 30, 2799–2808.]
- Xu H, Yang JC, Chen SB, Jiang GM, Li YG (2007). Review of plant responses to ozone pollution. *Journal of plant Ecology*, 31, 1205–1213. (in Chinese with English abstract) [许宏, 杨景成, 陈圣宾, 蒋高明, 李永庚 (2007). 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展. 植物生态学报, 31, 1205–1213.]
- Xu X, Lin W, Wang T, Yan P, Tang J, Meng Z, Wang Y (2008). Long-term trend of surface ozone at a regional background station in eastern China 1991–2006: Enhanced variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 2595–2607.
- Yao FF, Wang XK, Chen Z, Feng ZZ, Zheng QW, Duan XN, Ouyang ZY, Feng ZW (2008). Response of photosynthesis, growth and yield of field-grown winter wheat to ozone exposure. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 212–219. (in Chinese with English abstract) [姚芳芳, 王效科, 陈展, 冯兆忠, 郑启伟, 段晓男, 欧阳志云, 冯宗炜 (2008). 农田冬小麦生长和产量对臭氧动态暴露的响应. 植物生态学报, 32, 212–219.]
- Yao FF, Wang XK, Ouyang ZY, Feng ZW (2007). A simulation model of ozone stress on photosynthetic production and its allocation of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 2586–2593. (in Chinese with English abstract) [姚芳芳, 王效科, 欧阳志云, 冯宗炜 (2007). 臭氧胁迫下冬小麦物质生产与分配的数值模拟. 应用生态学报, 18, 2586–2593.]
- Zhang LM, Brook JR, Vet R (2002). On ozone dry deposition—With emphasis on non-stomatal uptake and wet canopies. *Atmospheric Environment*, 36, 4787–4799.
- Zhang LM, Vet R, Brook JR, Legge AH (2006). Factors affecting stomatal uptake of ozone by different canopies and a comparison between dose and exposure. *Science of the Total Environment*, 370, 117–132.
- Zhang WW, Zheng FX, Wang XK, Feng ZZ, Ouyang ZY (2009). Effects of ozone on root activity, soluble protein content and antioxidant system in *Oryza sativa* roots. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 425–432. (in Chinese with English abstract) [张巍巍, 郑飞翔, 王效科, 冯兆忠, 欧阳志云 (2009). 臭氧对水稻根系活力, 可溶性蛋白含量与抗氧化系统的影响. 植物生态学报, 33, 425–432.]
- Zheng QW, Wang XK, Xie JQ, Feng ZZ, Feng ZW, Ni XW, Ouyang ZY (2006). Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of *in situ* rice leaves under O₃ stress. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 1131–1137. (in Chinese with English abstract) [郑启伟, 王效科, 谢居清, 冯兆忠, 冯宗炜, 倪雄伟, 欧阳志云 (2006). 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响. 生态学报, 26, 1131–1137.]
- Zheng YF, Hu CD, Wu RJ, Zhao Z, Liu HJ, Shi CH (2010a). Experiment with effects of increased surface ozone concentration upon winter wheat photosynthesis. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 847–855. (in Chinese with English abstract) [郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 赵泽, 刘宏举 (2010a). 地表臭氧浓度增加对冬小麦光合作用的影响. 生态学报, 30, 847–855.]
- Zheng YF, Liu RN, Wu RJ, Hu CD, Zhao Z, Wang LX (2011). Impacts of surface ozone exposure on dry matter production and distribution of soybean. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 32, 73–80. (in Chinese with English abstract) [郑有飞, 刘瑞娜, 吴荣军, 胡程达, 赵泽, 王连喜 (2011). 地表臭氧胁迫对大豆干物质生产和分配的影响. 中国农业气象, 32, 73–80.]
- Zheng YF, Zhao Z, Wu RJ, Zhang JE, Hu CD (2010b). Ozone stress on light response capacity and on the utilization of PSII absorbed light energy of winter-wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6771–6780. (in Chinese with English abstract) [郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 张金恩, 胡程达 (2010b). 臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及PSII光能吸收与利用的影响. 生态学报, 30, 6771–6780.]
- Zhou XJ (2004). Study on the interaction between the lower atmosphere and ecosystem in the Yangtze River Delta. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese). [周秀骥 (2004). 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 气象出版社, 北京.]
- Zhu ZL, Sun XM, Dong YS, Zhao FH, Franz XM (2014a). Diurnal variation of ozone flux over corn field in North-western Shandong Plain of China. *Science China: Earth Sciences*, 44, 292–301. (in Chinese with English abstract) [朱治林, 孙晓敏, 董云社, 赵风华, Franz XM (2014). 鲁西北平原玉米地涡度相关臭氧通量日变化特征. 中国科学: 地球科学, 44, 292–301.]
- Zhu ZL, Sun XM, Yu GR, Wen XF (2014b). A review of research on ozone flux observation and stomatal uptake estimation over terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6029–6038. (in Chinese with English abstract) [朱治林, 孙晓敏, 于贵瑞, 温学发 (2014). 陆地生态系统臭氧通量观测和气孔吸收估算研究进展. 生态学报, 34, 6029–6038.]
- Zhu ZL, Sun XM, Zhao FH, Wen XF, Tang XZ, Yuan GF (2012). Variation of ozone concentration of winter wheat field and mechanistic analysis of its possible effect on wheat yield in Northwest-Shandong Plain of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 313–323. (in Chinese with English abstract) [朱治林, 孙晓敏, 赵风华, 温学发, 唐新斋, 袁国富 (2012). 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. 植物生态学报, 36, 313–323.]

责任编委: 冯兆忠 责任编辑: 李 敏

扫码向作者提问