

近地层臭氧对农作物产量影响的风险评估模型研究进展

吴荣军^{1,2}, 吴彬彬^{1,2}, 郑有飞^{1,2*}

(1.江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 2.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要:近地层臭氧污染及其对农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,建立适宜且更为精确的模型开展臭氧影响下的农作物产量损失评估对于粮食安全保障及臭氧污染控制具有重要的意义。综述了浓度响应、剂量响应和通量响应等统计模型的发展及其在产量损失评估中的应用,评述了其优缺点和通量响应模型的不确定性,同时,通过臭氧干沉降模型的研究进展及其与通量响应模型的优势比较,提出了基于观测和臭氧干沉降模型开展臭氧影响下的自然农田作物产量损失评估技术新的研究方向。

关键词:臭氧;农作物;模型;通量;干沉降

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)09-1731-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.09.004

Risk Assessment Models for Surface Ozone Effects on Crop Yields: A Review

WU Rong-jun^{1,2}, WU Bin-bin^{1,2}, ZHENG You-fei^{1,2}

(1.Jiangsu Key laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The rapid growth of fossil fuel-based economies during the last several decades has increased emission of ozone precursors, and thus raises atmospheric ozone concentrations. It is well documented that high ozone concentrations have negative effects on agricultural crops and induce significant yield losses in species such as wheat, rice and soybean. The negative effects of elevated ozone on the crops and food safety have drawn extensive attentions. It is important to establish more accurate models for evaluating the yields loss of crops under elevated surface ozone, and ensuring food security and controlling ozone pollution. In this review, concentration response, dose response and flux response models and their applications to biomass and yield loss were evaluated. Dry deposition models of surface ozone and flux model were compared. Based on the observation and ozone dry deposition model, a new research field was proposed to study techniques for evaluating crop yields loss under ozone stress in the natural farmland ecosystems.

Keywords: ozone; crops; model; flux; dry deposition

对流层臭氧是由氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)等的光化学反应产生的二次污染物,同时也是主要的温室气体之一和一种强氧化剂。人类活动排放的大量 NO_x 和 VOCs 已致其不断增加。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%^[1]。近地

层较高的臭氧平均浓度已经足以伤害各种类型的地表植被、经济作物和粮食作物等,甚至在一些区域其高值浓度已严重影响了人类和其他动物的健康^[2]。

近地层臭氧主要以干沉降的形式进入农田生态系统,从而影响农田生态系统的健康,对其产生较为严重的负面影响^[3]。研究表明,地表臭氧除了影响作物的物候、品质和农田土壤酶活性等^[4],更主要的体现在对作物的生长、产量及其光合机制层面有强烈的负面效应,国内外学者已分别针对其对小麦^[5-9]、大豆^[10]和水稻^[11-12]等的影响进行了深入的综述。当前,由于臭氧的胁迫对小麦、大豆和水稻等作物带来的负面效应,将极大地危及全球粮食安全。全球每年由此导致的经

收稿日期:2013-03-07

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123228110003);国家自然科学基金(41075114)

作者简介:吴荣军(1975—),男,浙江江山人,博士,副教授,主要从事全球变化生态学和农业气象研究。

E-mail:wurj@nuist.edu.cn

* 通信作者:郑有飞 E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

经济损失达 110~180 亿美元^[13]。预计到 2030 年,小麦将下降 10.6%~15.6%,玉米下降 4.5%~6.3%,大豆下降 12.1%~16.4%,每年的经济损失将达到 120~350 亿美元^[14],严重影响全球粮食安全。

近几十年来,近地层臭氧对农作物生长、生理和产量等胁迫效应的大田试验研究广泛开展,特别是大田开顶式气室(OTC)的不断改进^[15-18],以及开放式臭氧浓度升高平台(O₃-FACE)的发展^[19-20]也为该领域研究提供了最佳的试验平台,有力地推动了相关的研究。但对于如何准确评价和预测臭氧浓度持续升高对农作物的影响仍然是应用气象和污染生态领域研究的热点之一,开展臭氧对作物产量损失的影响及其风险评估研究已成为该领域的热点之一,其评估手段从最初的浓度响应和剂量响应模型,发展到了基于大田试验资料开展的通量响应模型,以及基于自然农田生态系统的观测和干沉降模型研究,从而明确臭氧的气孔吸收通量。本文在综述浓度响应、剂量响应和通量响应模型发展进程的基础上,分析讨论了通量响应模型的不确定性,并针对自然农田生态系统,提出基于臭氧干沉降模型与通量响应模型开展臭氧风险评估的思路和方向,为该领域的后续研究提供参考。

1 模型的发展

臭氧对农作物产量影响的评估指标和评估方法,逐渐的由臭氧浓度响应关系模型和臭氧剂量响应模型,发展到臭氧吸收通量响应模型,其评估结果更加贴近于近地层臭氧对农作物的实际伤害。

1.1 臭氧浓度响应与剂量响应模型

1980 年美国农业部和环境保护局建立了最初的线性臭氧浓度响应关系模型^[21-22]。后来又发展了 Wellbull 方程、二次方程和指数方程模型,对产量损失进行评估,并据此提出了臭氧剂量的概念。在此基础上,国内王春乙和关福来适当调整部分参数,推算和评价了臭氧浓度变化对我国冬小麦等主要作物产量的可能影响^[23]。该模型只是基于试验的经验性模型。随后大量研究资料表明,臭氧对农作物造成的负面影响是由累积效应所引起的,仅仅用浓度指标不能完全真实地反映其伤害作用^[24]。因此,美国环境保护局提出了累积暴露指标 SUM06(Sums all moderately high ozone values during summer months),其临界浓度为 60 nL·L⁻¹^[25]。联合国欧洲经济委员会(UNECE)和世界卫生组织(WHO)建立了 AOT40 指标(Accumulated exposure over a threshold ozone concentration of 40 nL·

L⁻¹),临界浓度为 40 nL·L⁻¹^[26]。上述两个指标都考虑了臭氧浓度和累积暴露时间的影响,认识到臭氧剂量与光合效率和作物产量呈明显负相关^[27],臭氧剂量响应关系模型就此得到一定的应用^[25]。

此后,大量的臭氧剂量指标得以提出,而臭氧对作物伤害的剂量指标 AOT40 被认为是经验值、是实际观测和应用需求间博弈的结果,并得到广泛认可及应用,但其中的 40 nL·L⁻¹ 并不具备明确的生物学意义^[24]。该模型忽略了作物通过气孔对臭氧的吸收,另一方面,不同作物、同一作物的不同生育期以及不同环境条件下,作物对臭氧的敏感程度也存在一定的差异。此外,剂量模型缺乏考虑作物本身的抗氧化能力、解毒能力以及作物夜间的修复能力,当臭氧浓度较高时,如果在一定的环境气候条件下,叶片气孔阻力很大,吸收量就不会太大,对作物造成的伤害将会大大下降^[28]。例如,根据 EMEP 模型在欧洲区域制作的 AOT40 的空间分布图表明,南部欧洲较其他区域有更高的臭氧危害的风险,因为臭氧浓度处在高值区^[29-30]。但为了达到较准确的臭氧环境影响评估,仅仅基于臭氧浓度分布的相关信息是不够的。更为需要的是气孔臭氧吸收通量^[31]。

1.2 臭氧通量响应模型

气孔通量主要由臭氧浓度和气孔导度两方面决定,但其中气孔导度的准确模拟在此起到关键作用,对气孔导度的模拟经常采用的两种模型为 Jarvis 模型和 Ball-Berry 模型^[25,32-33]。而基于 Ball-Berry 模型(式 1)计算的气孔导度,则基于叶片光合速率(A, μmol·m⁻²·s⁻¹),相对湿度(RH,%)和叶片表面 CO₂ 浓度([CO₂], μL·L⁻¹)进行估算^[34]。研究表明,基于 Jarvis 模型模拟的气孔导度准确性高于 Ball-Berry 模型^[35]。

$$g_{sto} = \frac{m \times A}{[CO_2]} \times RH + g_0 \quad (1)$$

Jarvis 模型为阶层式模型,其臭氧气孔导度为最大气孔导度和与各种环境变量的调节系数的乘积:

$$g_{sto} = g_{max} \cdot [\min(f_{phen}, f_{O_3})] \cdot f_{light} \cdot \max[f_{min}, (f_{temp} \cdot f_{VPD} \cdot f_{PAW})] \quad (2)$$

式中: g_{sto} 是气孔导度, mmolO₃·m⁻²PLA s⁻¹; g_{max} 是冬小麦的最大气孔导度, mmolO₃·m⁻² PLA s⁻¹。参数 f_{phen} 、 f_{O_3} 、 f_{light} 、 f_{temp} 、 f_{VPD} 和 f_{PAW} 分别用来表示物候期和臭氧,以及环境变量(辐射、温度、水汽压差和土壤湿度)对气孔导度最大值的调节系数,其值介于 0~1 之间。

基于 Jarvis 模型的臭氧吸收通量响应模型在欧洲地区小麦和土豆的臭氧影响试验中的产量损失评

估得到了大量的运用,其充分考虑了温度、水汽压差(VPD)、光照等气候因子对臭氧叶片气孔通量的影响,研究进入气孔并到达伤害部位的臭氧通量。结果表明,通量响应模型比浓度和剂量响应模型有着更好的适用性^[33,36-40]。通量模型通过与气孔导度模型的结合,既考虑了环境因素与植物自身的物候因素,又考虑了作物对周围环境改变的生理响应,该优点是其他模型所不具备的^[41]。欧洲地区通过计算的臭氧累积气孔吸收通量得到的空间分布图与AOT40的差异较大,欧洲北部与南部相比臭氧累积吸收通量更大,与AOT40分布图相反^[30]。这一典型例子表明,臭氧通量响应模型与剂量响应模型相比,更为准确地度量了臭氧对农作物的潜在影响和风险。

研究表明,植物组织对于臭氧的胁迫有一定的适应和脱毒能力,细胞壁上的抗坏血酸盐等抗氧化剂将分解清除掉一小部分通过叶片气孔进入的臭氧^[42],表明作物对通过气孔吸收的臭氧存在一定的适应和脱毒能力。国外建立的冬小麦臭氧通量响应关系是根据臭氧吸收通量的伤害阈值来确定的,现有的研究表明,该阈值 Y 取值为 $6\text{ nmol O}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时计算的累积臭氧吸收通量(PODY)的变化与产量损失相对值的相关性最为显著^[9,33,43]。从而,基于给定的PODY与产量损失的关系,开展作物全生育期的产量损失评估。而后,Grünhage等在Pleijel等建立的PODY与小麦产量损失关系模型的基础上,通过修正气孔导度模型,建立了更为完善的小麦产量损失的通量响应关系模型^[44]。

1.3 通量响应模型的不确定性

尽管通量响应模型还在不断地修正,而且作为臭氧对农作物产量影响的风险评估方法也已经得到了广泛的应用^[25],但在模型的参数化及臭氧伤害阈值的确定等方面仍存在一定的不确定性。

1.3.1 大田试验的限制

气孔导度和臭氧吸收通量的计算与其他指标相似,已有研究大部分是建立在基于开顶式气室的大田试验等控制实验的基础上,尽管开顶式气室在不断地得到改进,但仍然避免不了气室内的气候条件与自然条件下的差异,气室内外气候因子对气孔导度的调节作用尚不能进行有效的比较,主要原因在于气室内外的湍流混合和土壤湿度状况对于大气和植被间气体交换的控制存在一定差异^[45],臭氧气孔导度的模拟也就存在一定的不确定性^[46];同时,土壤湿度对气孔导度有较强的限制作用,在站点尺度和区域尺度上的土

壤湿度的巨大差异,将导致胁迫函数的建立和参数化存在很大的不确定性。当前的小麦臭氧累积吸收通量与产量损失的响应关系,以及气孔导度最大值 $g_{\max}$ 主要根据大田试验的测定值进行推导的。因此,其通量响应模型难以有效地推广到大田自然条件下,开展区域尺度臭氧影响的风险评估^[44]。

1.3.2 模型的参数化

当前基于OTC大田试验的大部分臭氧吸收通量模型中,冠层边界层阻力采用了一个定值^[33,43,47],如对于冬小麦取值为 $36\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[47],同时该模型仅仅考虑边界层阻力(边界层导度的倒数)和气孔阻力(气孔导度的倒数),没有考虑空气动力学阻力和表面阻力。但在自然条件下,上述阻力随气候条件和冠层结构等发生变化,对臭氧在冠层顶部和内部的交换及臭氧的干沉降通量影响巨大,并直接决定臭氧吸收通量。对于任何一种利用通量响应模型建立的方法,表面阻力的参数化都是必须开展的^[45]。

1.3.3 臭氧伤害阈值

研究表明,当臭氧吸收通量达到 $(0.30\pm0.05)\mu\text{g O}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (约 $6\text{ nmol O}_3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)时,才导致作物产量损失,也即没有臭氧吸收或其值较低时将不抑制光合作用^[32]。事实上,作物对臭氧的解毒能力在不同的生育期存在较大的波动,其伤害阈值不应该是一个定值,Massman认为臭氧伤害阈值是光合速率的函数,随不同生育进程的光合能力变化而变化^[31]。然而,当前大量的基于气孔吸收累积通量开展的作物产量损失评估所取的阈值均是一个常数^[29,32-33],只有建立其与总光合能力的函数关系,得到全生育期臭氧累积吸收通量,才能更为准确地评估作物产量损失。

2 自然农田生态系统臭氧的风险评估

已有的臭氧气孔导度模型和吸收通量模型大多是基于大田试验资料开展的,其建立的臭氧通量响应模型更多的是基于叶片的气孔吸收过程,存在一定的局限性。由于臭氧本身的干沉降特性,明确自然农田生态系统尺度臭氧的干沉降及其在气孔吸收通量的分配特征,从而探明作物全生育期臭氧吸收通量的变化规律,开展臭氧的风险评估。

2.1 农田生态系统臭氧干沉降通量及分配

近年来,在近地层臭氧在农田生态系统的干沉降特征方面开展了一定的研究^[46,48-51]。一些研究成果表明,农田臭氧的干沉降主要通过气孔通道和非气孔通道进行,而非气孔通道包括表面沉降、土壤表面沉降

和冠层内的化学分解等不同的沉降通道。其中,气孔吸收是主要的沉降通道^[51],对作物光合作用和产量直接带来伤害,而非气孔沉降在许多生态系统中占了臭氧总通量的30%~70%^[52]。而 Lamaud 等研究表明,土壤沉降占了玉米作物非气孔沉降的20%~50%^[46],因此土壤沉降也是臭氧干沉降的一个不容忽视的通道。通常意义上,基于简单的土壤沉降参数化方案,表面沉降通量是根据总臭氧通量减去土壤沉降和气孔吸收后得到的,因而土壤臭氧沉降的估计误差可能影响表面沉降通量的反演。土壤沉降通量必须开展研究,因为它是重要的臭氧沉降通道,特别对于农田裸土期或作物的早期生长阶段^[51]。此外,研究表明,在一定条件下,NO、生物性挥发性有机物(BVOC)等几种化合物与臭氧的化学反应,是臭氧沉降的另一条重要通道^[35,53],通过土壤表面排放的NO与臭氧的化学反应,提高了土壤的臭氧沉降通量^[50]。

2.2 臭氧干沉降模型的发展

为了模拟作物冠层臭氧通量的动态变化及其在气孔和非气孔通道间的分配,发展了一些臭氧沉降模型,早期发展的臭氧模型能较好地模拟大气臭氧的动力学,从而改进了沉降过程的模拟^[31],而近年来发展的臭氧沉降模型,针对不同的植被类型和不同气候与地理区域,并耦合了其他模型或遥感技术开展站点或区域尺度的臭氧干沉降通量的监测和评估。

ODEM1.1 臭氧沉降模型是基于 Campbell and Norman 提出的阻力计算方案发展的高分辨率的国家和区域尺度的臭氧通量模型^[54-55]。EMEP 臭氧沉降模块是 EMEP 区域化学传输模型的一部分,考虑了植物生育期和环境气候因子的影响,可模拟不同植被类型的臭氧总通量和气孔通量^[56]。FORFLUX 生物物理模型可用来模拟大气和陆地生态系统的瞬时臭氧、CO₂和水汽交换,主要包括叶片光合模块、冠层通量模块、土壤水、热和 CO₂ 传输模块,以及积雪模块^[57]。Surfatm-O₃ 是一种一维的土壤-植被-大气传输模型,主要包括考虑潜热通量和显热通量的能量平衡模型,以及模拟地表和大气间臭氧通量的污染物交换模型^[58]。多层冠层模型(MLM)基于辐射传输和作物的生态生理理论,耦合了冠层内部的辐射衰减和湍流传输与叶片的气体交换、光合作用、水汽和 CO₂ 气孔导度,结合臭氧气孔导度的观测,模拟了气孔和非气孔通道的臭氧沉降通量,其模拟效果优于大叶模型^[52]。此外,还有一些臭氧干沉降模型,得到了更广泛的应用^[53-54,59-61]。

2.3 臭氧干沉降模型的参数化

在臭氧干沉降模型中,臭氧通量均决定于臭氧浓度和沉降速率,而沉降速率的模拟通常基于阻力计算方案进行^[62-63],这些模型都依赖于不同的阻力参数化方案,特别是冠层表面阻力和土壤阻力等非气孔阻力的参数化,在不同的研究中仍然难以取得一致^[46,55,59]。

同时,研究表明,控制臭氧沉降的主要因子是摩擦风速,其影响空气动力学阻力和边界层阻力^[50],而降水、露水和较高的相对湿度对臭氧沉降的影响已经得到了普遍关注^[59,64-66]。气孔沉降受环境气候参数的控制^[29],其中表面湿度可能降低气孔吸收速率和吸收通量,因为气孔被水滴或水膜阻塞。表面沉降随相对湿度的增加而增加^[46,48,59,66]。而 Zhang 等的研究表明,通过减少表面阻力也增加了臭氧非气孔通量^[59],因此总的臭氧通量可能减少或增加,存在一定的不确定性。此外,较多的臭氧沉降模型中引入了土壤阻力,但大都确定为一个常数,部分研究提出了土壤阻力与土壤湿度的相关性^[31],并利用土壤含水量进行参数化^[55]。也有研究表明,土壤含水量不是土壤阻力的主要控制因子,而是土壤表面相对湿度,因为表面相对湿度与土壤阻力存在显著的正相关,而非气孔阻力与空气相对湿度有负相关^[50]。

此外,气孔沉降、表面沉降和土壤沉降及总臭氧沉降通量的分配又决定于作物的冠层结构^[59,64],但冠层高度和叶面积指数增加,从大气进入地表的臭氧传输将减少^[59,67],而气孔和表面沉降随叶面积指数的增加而增加^[31,59]。此外,沉降模型主要限制是模型输入数据的不确定性和变化,如不同生育期和不同种类参数的差异,这些参数对于模拟结果有着显著的不确定性^[68]。

3 臭氧对作物产量影响的风险评估

正如上文所述,在气孔导度和气孔吸收模型建立的通量响应模型上开展臭氧对作物产量影响评估方法更多的是基于大田试验资料开展的,存在着一定的不确定性。而针对上述不确定性,对于自然农田生态系统,结合涡度相关等现场观测,利用臭氧干沉降模型,定量研究作物全生育期冠层上方的臭氧干沉降过程,计算其气孔通道的臭氧累积吸收通量,观测和模型模拟相结合,可以有效地开展作物产量损失的风险评估。该领域未来的研究有如下展望:

(1)深入研究不同作物、不同生育期及不同冠层结构和叶面积指数,开展臭氧沉降及其气孔和非气孔

沉降通量的分配特征研究。

(2)加强模型参数化研究。非气孔沉降的阻力参数化存在一定的不确定性,仍然需要进一步研究。基于自然条件下农田小气候及臭氧通量的涡度相关观测,进一步完善表面阻力、土壤阻力等的参数化方案,精细化定量研究自然农田臭氧干沉降通量。

(3)建立自然农田臭氧风险评估方法。鉴于当前臭氧吸收通量模型在评价作物产量损失方面存在的某些不确定性和不足,结合作物全生育期的臭氧干沉降通量,特别是气孔吸收的分配通量,建立自然农田生态系统的臭氧干沉降及其气孔吸收的分配通量与作物产量损失的关系模型,健全臭氧胁迫对冬小麦产量影响的精细化定量评估手段,才能使其科学性、机理性和实用性更强。

参考文献:

- [1] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Global climate projections [M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, UK/ NY, USA, Cambridge University Press, 2007.
- [2] Ashmore M R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation [J]. *Plant Cell & Environment*, 2005, 28(8):949-964.
- [3] Fowler D, Pilegaard K, Sutton M A, et al. Atmospheric composition change: Ecosystems-atmosphere interactions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(33):5193-5267.
- [4] McCrady J K, Andersen C P. The effect of ozone on below ground carbon allocation in wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(3):465-472.
- [5] Wang X K, William M, Feng Z W, et al. Ground-level ozone in China: Distribution and effects on crop yields[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2):394-400.
- [6] 王春乙,白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究[M]. 北京:气象出版社, 2007.
Wang C Y, Bai Y M. Research into the impacts of variation of ozone and aerosols on crops[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.
- [7] 冯兆忠,小林和彦,王效科,等. 小麦产量形成对大气臭氧浓度升高响应的整合分析[J]. 科学通报, 2008, 53(4):3080-3085.
Feng Z Z, Kobayashi kazuhiko, Wang X K, et al. A meta-analysis of responses of wheat yield formation to elevated ozone concentration [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(4):3080-3085.
- [8] Feng Z Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(8):1510-1519.
- [9] 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.
Zheng Y F, Wu R J. The change characteristic of surface ozone and the crop's response[M]. Beijing: Meteorological Press, 2012.
- [10] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth, and yield[J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26:1317-1328.
- [11] Ainsworth E A. Rice production in a changing climate: A meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14:1642-1650.
- [12] Shi G, Yang L, Wang Y, et al. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131:178-184.
- [13] Ashmore M, Toet S, Emberson L. Ozone—a significant threat to future world food production[J]. *New Phytologist*, 2006, 170(2):201-204.
- [14] Avnery S, Mauzerall D L, Liu J, et al. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13):2297-2309.
- [15] Heagle A S, Body D E, Heck W W. An open-top chamber to assess the impact of air pollution on plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2(3):365-368.
- [16] Musselman R C. Field chambers for assessing crop loss from air pollutants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1986, 15(2):152-157.
- [17] 郑启伟,王效科,冯兆忠,等. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1):170-175.
Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, et al. Effects of elevated ozone on biomass and yield of rice planted in open-top chamber with revolving ozone distribution[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1):170-175.
- [18] 郑有飞,胡程达,吴荣军,等. 地表臭氧浓度升高对冬小麦光合作用的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4):847-855.
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):847-855.
- [19] 唐昊治,刘 钢,韩 勇,等. 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台(O₃-FACE)研究[J]. 土壤, 2010, 42(5):833-841.
Tang H Y, Liu G, Hang Y, et al. Ozone concentration enrichment system under fully free-air condition in agricultural field(O₃-FACE)[J]. *Soils*, 2010, 42(5):833-841.
- [20] Tang Hao-ye, Liu Gang, Han Yong, et al. A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: Control performance and ozone exposure regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(35):6276-6286.
- [21] Heck W C, Adams R M. Reassessment of crop loss from ozone[J]. *Environmental Science and Technology*, 1983, 17(12):572-581.
- [22] Larsen R M, Heck W W. An Air quality data analysis system for inter-relating 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.
- [23] 王春乙,关福来. O₃ 浓度变化对我国主要作物产量的可能影响[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增刊):69-74.
Wang C Y, Guan F L. The possible effects of dynamical ozone concentration on yield of main crops in China[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 6(Suppl):69-74.
- [24] Fuhrer J, Skärby L, Ashmore M R. Critical levels for ozone effects on

- vegetation in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 97(1-2):91-106.
- [25] LRTAP Convention. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation. 2010. <http://www.icpvegetation.ceh.ac.uk>.
- [26] 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 and Plant Science*, 1997, 47(1): 20-25.
- [27] Liu F, Wang X K, Zhu Y G. Assessing current and future ozone-induced yield reductions for rice and winter wheat in Chongqing and the Yangtze River Delta of China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 707-709.
- [28] Krupa S V, Nosal M, Legge A H. A numerical analysis of the combined open-top chamber data from the USA and Europe on ambient ozone and negative crop responses[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 101(1): 157-160.
- [29] 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.
- [30] Cieslik S. Ozone fluxes over various plant ecosystems in Italy: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1487-1496.
- [31] 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.
- [32] Danielsson H, Karlsson P G, Karlsson P E. Ozone uptake modeling and flux-response relationships—an assessment of ozone-induced yield loss in spring wheat[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(4): 475-485.
- [33] 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.
- [34] Vitale M, Scimone M, Feoli E, et al. Modelling leaf gas exchanges to predict functional trends in mediterranean *Quercus ilex* forest under climatic changes in temperature[J]. *Ecological Modeling*, 2003, 166: 123-134.
- [35] Fares S, Matteucci G, Scarascia Mugnozza G, et al. Testing of models of stomatal ozone fluxes with field measurements in a mixed Mediterranean forest[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 67: 242-251.
- [36] 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.
- [37] Gonzalez-Fernandez I, Kaminska A, Dodmani M, et al. Establishing ozone fluxes response relationships for winter wheat: Analysis of uncertainties based on data for UK and Polish genotypes[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(5): 621-630.
- [38] 吴荣军, 郑有飞, 赵 泽, 等. 地表 O₃ 胁迫下冬小麦光合生产和干物质累积变化的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2688-2695.
- Wu R J, Zheng Y F, Zhao Z, et al. A dynamics simulation of the photo-synthetic production and dry matter accumulation in winter wheat under surface ozone stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2688-2695.
- [39] 郑有飞, 刘瑞娜, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦干物质生产和产量构成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 409-417.
- Zheng Y F, Liu R N, Wu R J, et al. Effects of ozone stress on dry matter production and yield components in winter wheat [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 409-417.
- [40] 郑有飞, 徐静馨, 吴荣军. 遮荫条件下 O₃ 胁迫对冬小麦气孔导度影响的模拟[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1271-1280.
- Zheng Y F, Xu J X, Wu R J. Simulative research into ozone stress on stomatal conductance of winter wheat under different shading conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1271-1280.
- [41] 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.
- [42] Barnes J D, Zheng Y, Lyons T M. Plant resistance to ozone: The role of ascorbate/[M]. Osama K, Saji H, Youssefian S, et al. Eds. Air Pollution and Plant Biotechnology. Springer, Tokyo, 2002: 235-252.
- [43] 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 accumulated dry matter in winter wheat based on stomatal conductance and ozone uptake model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2799-2808.
- [44] Grünhage Ludger, Håkan Pleijel, Gina Mills, et al. Updated stomatal flux and flux-effect models for wheat for quantifying effects of ozone on grain yield, grain mass and protein yield[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 165: 147-157.
- [45] Tuovinen J P. Assessing vegetation exposure to ozone: Properties of the AOT40 index and modifications by deposition modeling[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 361-372.
- [46] Lamaud E, Loubet B, Irvine M, et al. Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1385-1396.
- [47] Pleijel H, Danielsson H, Pihl Karlsson G, et al. An ozone flux-response relationship for wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 453-462.
- [48] Coyle M, Nemitz E, Robert Storeton-West, et al. Measurements of ozone deposition to a potato canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(3-4): 655-666.
- [49] Gerosa G, Vitale M, Finco A, et al. Ozone uptake by an evergreen Mediterranean forest (*Quercus ilex*) in Italy[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(18): 3255-3266.
- [50] Stella P, Loubet B, Lamaud E, et al. Ozone deposition onto bare soil: A new parameterization[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011a, 151(6): 669-681.
- [51] Stella P, Personne E, Loubet B, et al. Predicting and partitioning ozone

- fluxes to maize crops from sowing to harvest: The surfatm-O₃ model[J]. *Biogeosciences*, 2011b, 8(4):2869–2886.
- [52] 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.
- [53] Emberson L D, Ashmore M R, Simpson D, et al. Modelling and mapping ozone deposition in Europe[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, 130(1–4):577–582.
- [54] Nussbaum S, Remund J, Rihm B, et al. High resolution spatial analysis of stomatal ozone uptake in arable crops and pastures[J]. *Environment International*, 2003, 29(2–3):385–392.
- [55] Bassin S, Calanca P, Weidinger T, et al. Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: Model improvement, testing, and application[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(15):2349–2359.
- [56] Simpson D, Tuovinen J P, Emberson L, et al. Characteristics of an ozone deposition module[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 1(5–6):253–262.
- [57] Nikolov N, Zeller K F. Modeling coupled interactions of carbon, water, and ozone exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. I: Model description[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(2):231–246.
- [58] Personne E, Loubet B, Herrmann B, et al. SURFATMNH3: A model combining the surface energy balance and bidirectional exchanges of ammonia applied at the field scale[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(8):1371–1388.
- [59] Zhang L, Brook J R, Vet R. On ozone dry deposition with emphasis on non-stomatal uptake and wet canopies[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(30):4787–4799.
- [60] Ashmore M R, Bükér P, Emberson L D, et al. Modelling stomatal ozone flux and deposition to grassland communities across Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3):659–670.
- [61] 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.
- [62] Wesely M L, Hicks B B. A review of the current status of knowledge in dry deposition[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(12–14):2261–2282.
- [63] Wesely M L. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models[J]. *Atmospheric Environment*, 1989, 23(6):1293–1304.
- [64] Zhang L, Brook J R, Vet R. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3(6):2067–2082.
- [65] Lamaud E, Carrara A, Brunet Y, et al. Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(1):77–88.
- [66] Altimir N, Kolari P, Tuovinen J P, et al. Foliage surface ozone deposition: A role for surface moisture?[J]. *Biogeosciences*, 2006, 3(2):209–228.
- [67] van Pul W A J, Jacobs A F G. The conductance of a maize crop and the underlying soil to ozone under various environmental conditions[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 69(1–2):83–99.
- [68] Mészáros R, Zsély I G, Szinyei D, et al. Sensitivity analysis of an ozone deposition model[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(3):663–672.