

# 臭氧对农作物影响的模型\*

姚芳芳 王效科\*\* 冯宗炜 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要** 对流层臭氧( $O_3$ )浓度增加对作物的不利影响已受到广泛关注, 臭氧模型研究自然已成为该领域的热点之一。建立有效的模型对臭氧造成的作物产量损失进行评估和预测, 能为中国臭氧污染的控制和农业安全提供科学依据。根据模型与作物生长关系的紧密程度, 可将其分为统计模型和机理模型 2 大类。本文依据模型的研究进程, 依次阐述了浓度响应、剂量响应、通量响应 3 个统计模型; 重点分析国内外影响较大的 CLASS、Martin 和 AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> 3 个机理模型; 指出各模型的局限性, 并对相关研究发展方向的可行性措施进行讨论。

**关键词** 臭氧; 模型; 农作物; 通量; 光合作用

**中图分类号** X503 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)04-0571-06

**Research advances in simulation models of ozone impact on crops.** YAO Fang-fang, WANG Xiao-ke, FENG Zong-wei, OUYANG Zhi-yun (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4):571–576.

**Abstract:** The impact of increasing ozone ( $O_3$ ) concentration in troposphere on crops has been drawn more and more concern, and its simulation study has become a hotspot. To build effectual simulation models to evaluate and predict the crop loss by  $O_3$  would help to the ozone pollution control and agriculture safety. According to the relationships between crop growth and  $O_3$ , the models could be classified as statistical models and mechanism models. In this paper, concentration-, dose/exposure- and flux-based statistical models were introduced, based on their development process, and three influential mechanism models (CLASS, Martin, and AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub>) were discussed in pivot. The limitations of each model were pointed out, and the development trends of related studies in China were put forward.

**Key words:** ozone; model; crop; flux; photosynthesis.

## 1 引言

臭氧是由 3 个氧原子组成的高活性强氧化性气体, 是光化学烟雾污染的主要成分, 已成为危害最严重的二次污染物之一。在过去的几十年里, 科学界致力于流层臭氧浓度升高对农作物影响的研究 (John & Christian, 2003; Jürg & Fitzgerald, 2003; Ashmore, 2005; Edwin et al., 2005)。研究表明, 近地层高浓度臭氧环境能够引起作物减产, 且这种负面影响有累积效应。累积效应一方面与暴露浓度和频度

有关; 另一方面与作物自身敏感程度有关, 不同物种对臭氧敏感性大不相同, 甚至同一物种不同品种间的差异也很大。

通常的试验研究仅局限于特定条件和样方尺度, 这样获得的数据有限, 而用模型则可以克服以上缺陷, 并可以对很多实验无法获得的条件进行模拟。此外, 模型还可用于臭氧污染区域风险评价及农作物经济损失评估。因此, 利用臭氧模型反映大气环境中臭氧浓度变化对作物生长和产量影响的研究已成为该领域的热点之一。中国人口众多, 粮食问题尤为重要, 很多地区由于出现高浓度臭氧污染严重影响农业产量。国内在臭氧对作物影响的研究方法、危害机理、产量损失估算等方面做了较多工作

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2002CB410803)和国家自然科学基金资助项目(30670387)。

\*\* 通讯作者 E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

收稿日期: 2006-05-11 接受日期: 2006-12-21

(王春乙等,1996;周秀骥,2004;郑昌岭和王春乙,2004),但在臭氧模型研究方面缺乏系统的研究。本文综合分析了国内外臭氧模型,为臭氧污染的控制和农业安全提供科学依据。

## 2 臭氧对作物影响的统计模型

### 2.1 浓度响应关系模型

1980年美国农业部和环境保护局创建了全国农作物损失评价网(The National Crop Loss Assessment Network, NCLAN),在全美范围内利用农田开顶式气室(OTC),使用标准的试验方案研究臭氧对农作物(大麦、棉花、马铃薯、小麦、玉米、莴苣、花生、菜豆、大豆、芜菁、高粱、烟草等)生长和产量的影响。研究最初认为臭氧浓度增加与作物产量下降存在较好的线性关系,用7 h(9:00—16:00)生长季节内平均臭氧体积分数和作物产量建立浓度响应关系模型(Heck & Adams, 1983),进而根据单株产量推算出O<sub>3</sub>浓度与作物产量损失百分率,关系式为:

$$y = a + bx \quad (1)$$

式中,y为作物单株产量,x为生长季内每天7 h臭氧浓度平均值,a、b为回归系数。

以Admas等(1989)为代表的学者认为臭氧浓度增加与作物产量下降是非线性的,服从Weibull函数分布:

$$y = \alpha \exp[-(C(O_3)/\omega^\lambda)] \quad (2)$$

式中,y为作物产量,α为臭氧浓度为0时的理论产量,ω为臭氧剂量的尺度参数,λ为损失率变化的形态参数。α包含了试验地、品种等外在因素造成的影响。

随后,欧洲和其它国家也按照NCLAN的基本方法和试验设计研究臭氧对农作物的损失影响(Mathy, 1988)。这种模拟方式主要是运用数学统计分析的方法处理试验数据,该模型虽然方法简单,但只是将臭氧浓度作为唯一影响因素,忽略了暴露时间及作物生长的其它环境因素的影响机制,机理性较差。

### 2.2 剂量响应关系模型

随着研究的深入,发现农作物长期暴露在高浓度臭氧环境中会造成负面的累积效应,仅仅用浓度指标不能完全真实地反映问题。美国环境保护局(USEPA)提出用累积暴露指标(cumulative exposure index)——SUM06(临界浓度为60 nmol·mol<sup>-1</sup>)作为植物保护标准(USEPA, 1997)。在欧洲,研究

者认为40 nmol·mol<sup>-1</sup>的临界浓度更适合欧洲地区,并相应建立AOT40指标(Fuhrer et al., 1997; Fuhrer & Achermann, 1999),联合国欧洲经济委员会(UNECE)和世界健康组织(WHO),就以此制定了大气质量标准。SUM06、AOT40计算公式如下:

$$SUM06 = \sum(C_{O_3}) \quad (C_{O_3} \geq 60 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad (3)$$

$$AOT40 = \sum(C_{O_3} - 40) \quad (C_{O_3} \geq 40 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}) \quad (4)$$

剂量响应关系模型已关注到臭氧浓度和暴露时间这2个臭氧伤害作物的最主要因子,也已认识到臭氧暴露量与光合效率、作物生长产量呈明显负相关。试验证明,臭氧累积量指标与季节平均浓度指标相比,前者预测效果更好(USEPA, 1997; Massman et al., 2000; Grünhage & Jäger, 2003; Massman, 2004)。然而,剂量响应关系模型简单地将周围大气中的臭氧量与植物吸收量统一起来,而忽略了植物的吸收。事实上,大气臭氧浓度很高时,如果植物气孔阻力很大,吸收量就不会太大(Krupa et al., 1998; Grünhage et al., 1999)。另外,不同植物、同一植物的不同生育期以及不同环境条件下,植物对臭氧的敏感程度不一样,而剂量模型没有考虑植物本身的防御力、解毒能力以及作物夜间的修复能力,因而模型在一定程度上高估了臭氧的负面效应(Grunhage et al., 1999)。

### 2.3 通量响应关系模型

为了更准确地评估臭氧胁迫下作物产量损失,研究者开始从通量(flux)角度进行研究。理论上,通过气孔进入植物叶片的臭氧量直接对作物产生效应,因此比实际大气臭氧浓度和臭氧剂量2种指标更能直接反映其对作物的伤害,可以更准确地进行产量损失评估。植物生理学上将气孔通量定义为气孔导度和气体内外浓度差的乘积:

$$F = g_{O_3} [C_{O_3}^b - C_{O_3}^i] \quad (5)$$

式中,F为通量,g<sub>O<sub>3</sub></sub>为作物对臭氧的气孔导度,C<sub>O<sub>3</sub></sub><sup>i</sup>和C<sub>O<sub>3</sub></sub><sup>b</sup>分别为气孔内、外臭氧浓度,计算时一般忽略植物叶片内的臭氧浓度。

气孔通量(stomatal flux)主要由臭氧浓度和气孔导度2方面决定,其中气孔导度的准确模拟在此起到关键作用。Emberson等(2000)、Danielsson等(2003)、Grünhage等(2000)基于Jarvis模型,认为臭氧气孔导度除受到叶温(T)、水气压差(VPD)、有效光合辐射(PAR)和土壤水势(SWP)等的影响外,还与叶龄、植物体内臭氧累积量相关(Nussbaum et

al., 2003; Bassin et al., 2004)。还有一些研究者基于 Ball-Berry 模型, 即气孔导度-光合作用模型, 预测气孔通量( Zeller & Nikolov, 2000; Zeller, 2002 ), 进而分析与产量的关系。研究表明, 臭氧通量对作物生长与产量有较大影响, 是进行产量预测和损失评估的一个较好指标( Pleijel et al., 2002, 2004 )。

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, 这个优点是其它模型所不具备的。但由于作物解毒力是不断变化的, 很难量化和模拟, 因此通量模型不包含对作物解毒能力的模拟。此外, 由于人们对气孔导度与臭氧吸收响应机制尚未了解透彻, 所以仍需要不断完善气孔导度模型。总之, 用臭氧通量响应关系代替臭氧剂量响应关系, 接近实际水平( Uddling et al., 2004; Musselman et al., 2006 ), 更能真实地反映臭氧对作物的伤害, 已成为国内外臭氧模型研究的一个重点。

### 3 臭氧对作物影响的机理模型

#### 3.1 CLASS 模型

CLASS ( Crop Loss Assessment System ) 模型( Kobayashi, 1992 )将臭氧浓度与作物生长过程相联系( 图 1 )。模型中, 干物质生产是太阳辐射有效利用率为辐射吸收量的乘积。臭氧暴露影响到冠层辐射利用率, 进而降低作物生长率, 减少作物产量。

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_v - C_v [\text{O}_3]^2 & \text{营养生长期} \\ \varepsilon_r - C_r [\text{O}_3] & \text{生殖生长期} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $[\text{O}_3]$  为臭氧浓度;  $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_r$  分别为无臭氧影响下营养生长期和生殖生长期的太阳辐射利用率;  $C_v$ 、 $C_r$  为参数。相关参数通过薰气试验确定。

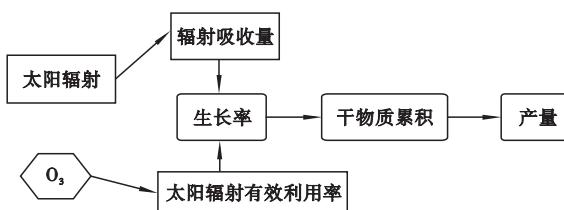


图 1 CLASS 模型示意图

Fig. 1 Sketch of CLASS model

CLASS 模型从臭氧影响植物光合作用角度, 研究臭氧浓度与作物生长过程的关系, 反映了臭氧在水稻生长过程中的动态影响。但是该模型只是将产量下降简单归因于辐射利用率的变化, 并没有将臭

氧与羧化过程联系起来, 进而不能充分阐述臭氧对作物生理机理过程的影响。

#### 3.2 Martin 模型

Martin 等( 2000, 2001 )基于叶片内氧化反应机理, 结合气孔导度模型, 研究短期臭氧暴露对小麦叶片光合作用的影响, 并分析进入植物体内的有效臭氧量与羧化率下降的关系( 图 2 )。

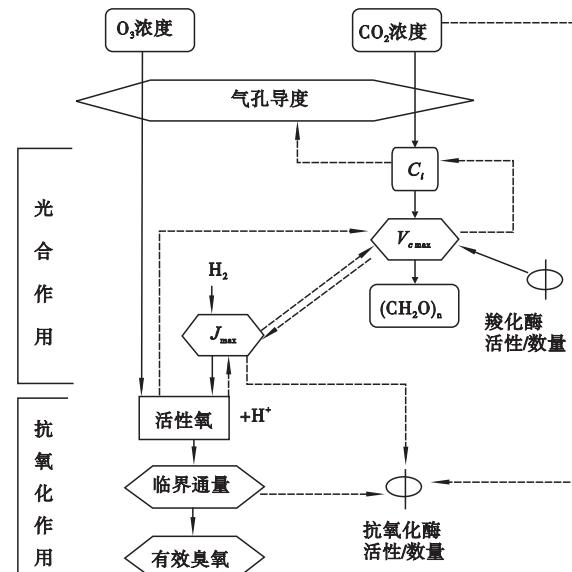


图 2 Martin 模型示意图( 叶片尺度 )

Fig. 2 Sketch of Martin model ( on leaf scale )

Martin 等认为, 当进入叶片的臭氧量超出植物体的抗氧化能力, 就会在一定程度上抑制作物光合作用, 对作物造成伤害。有效臭氧量( $F'_{\text{O}_3 \text{ eff}}$ )是最关键因子, 它诱导气孔关闭, 减少进入叶片的  $\text{CO}_2$  量, 导致胞间  $\text{CO}_2$  浓度下降, 并影响到最大羧化率。最大羧化率下降量( $\Delta V_{\text{c max}}$ )计算为:

$$\Delta V_{\text{c max}} = K_z \cdot F'_{\text{O}_3 \text{ eff}} \quad (7)$$

式中,  $K_z$  为作物对臭氧伤害的敏感程度。

有效臭氧量是臭氧通量值与对作物造成伤害的臭氧临界值( $F_{(\text{O}_3)0}$ )的差值, 临界值由作物自身的抗氧化能力决定。

$$F'_{\text{O}_3 \text{ eff}} = \int_0^t ([\text{O}_3]g_z - F_{(\text{O}_3)0}) dt \quad (8)$$

式中,  $g_z$  为对臭氧的气孔导度。模型中小麦  $F_{(\text{O}_3)0} = 37 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

该模型从氧化机理角度, 在叶片尺度上模拟短期臭氧暴露对光合作用羧化率的影响。与 CLASS 模型相比, 该模型考虑的作物生理响应过程更复杂, 并突出了作物本身的抗氧化能力, 确定了伤害临界

值。但仍存在不足的是:时间上该模型只适应于短期作用,不能体现出  $O_3$  影响的累积效应;空间上只适应于单个叶片,还未能在大尺度上进行验证。因此,将 Martin 模型从小时时间尺度上推到整个生育期,并从叶片尺度上推到整株作物乃至更大区域范围,还需深入研究。同时,模型确定的临界通量值是否适应于该物种的不同生育期及其它物种,还有待于验证。

### 3.3 AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> 模型

Ewert 和 Porter( 2000 )在作物生长模型 AFRC-WHEAT2 的基础上,加入臭氧因子( 图 3 ),研究臭氧对作物( 小麦 )短期和长期的影响。该模型从 2 个方面进行数值模拟:一方面是抑制光合作用;另一方面臭氧加速叶片的衰老,减少叶面积。

AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> 模型从臭氧降低羧化速率角度出发,在作物生长过程模型的基础上进行研究,反

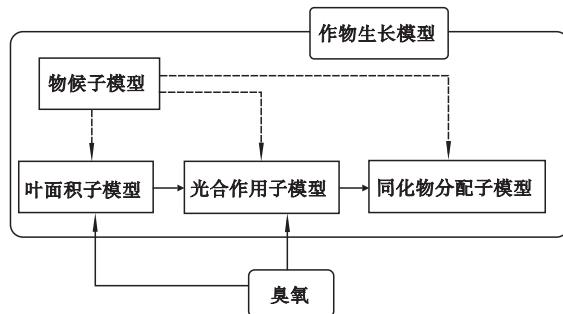


图 3 AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> 模型示意图

Fig. 3 Sketch of AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> model

表 1 臭氧模型优缺点比较

Tab. 1 Advantages and disadvantages in O<sub>3</sub> models

模型类型	优 点	缺 陷
统计模型	浓度响应关系模型	臭氧影响过程处理得过于简单,忽略了环境因素和作用时间的影响,忽略了 O <sub>3</sub> 对作物生长过程的影响
	剂量响应关系模型	没有体现臭氧效应和环境因素的关系,忽略了植物实际吸收与浓度的关系;忽略了植物对臭氧的响应,即防御力和解毒能力
	通量响应关系模型	对气孔导度与臭氧吸收响应尚未了解透彻,没有对作物的解毒效应进行模拟,忽略了作物夜间的修复过程
机理模型	CLASS 模型	没有将臭氧与羧化率下降相联系,没有把握臭氧造成作物产量下降的关键,不能充分说明臭氧对作物生理机理过程的影响
	Martin 模型	空间上没有推广到整个植株;时间上未能适应整个生育期,且所得臭氧临界通量值是否适应于其它物种仍有待于验证
AFRCWHEAT2-O <sub>3</sub> 模型	结合作物生长过程模型和气孔导度模型,将臭氧导致的羧化率下降归为有效臭氧量作用和加速叶片衰老作用的协同效应,实现了在植株水平上对臭氧胁迫效应的长期模拟	生理机制的复杂性和生理过程的不确定性,导致模型在通用性上存在一定缺陷

映了臭氧在小麦生长过程中的动态影响。同时模型考虑到植物自身的抗氧化能力,提出适合该模型的伤害临界值,并将臭氧加速叶片衰老过程与叶面积子模型相关联,实现了臭氧对作物慢性效应的模拟。此外,该模型还表达了作物的自我修复功能。AFRCWHEAT2-O<sub>3</sub> 模型考虑因素比较全面,其它作物可以参考这种方法进行研究。另一方面,由于生理机制的复杂性和生理过程的不确定性,也导致该模型在通用性上存在一定缺陷。

### 4 臭氧对作物影响模型研究的发展趋势

纵观臭氧对作物影响模型的发展历程,可以看出,模型是从简单到复杂、从经验性的统计方法向机理理论性研究方向发展的,但仍存在一些不足之处( 表 1 )。

臭氧模型在研究臭氧与作物之间相互关系的同时,还涉及植物生理学、气象学、土壤学等领域。但由于各学科之间发展的不平衡性,如对边界层理论的认识相对成熟,对植物生理机制与生理过程的相对不确定,所以从机理入手进行模拟难度很大,尤其很难模拟出作物对臭氧胁迫的反馈作用。因此,现有的机理模型都是在一定理论框架基础上的简化。寻求模型在简化和机理之间的平衡,是当前臭氧模拟研究的热点和难点。

随着计算机语言的发展,各种模型的不断完善和作物对臭氧耐受机制的清晰化,今后研究必然会将臭氧模型与近地层产生臭氧变化的光化学模型相

耦合,建立大气环境下臭氧作为限制因子之一的作物模型,这是臭氧对作物影响模型研究的重要发展方向,也是切实可行的方案。这样的模型可以从臭氧产生量、沉降量、有效臭氧积累、净固碳速率、有机物分配的依次过程出发,研究臭氧对整片农田生长发育过程的影响,进而通过尺度调控对局部地区、区域、国家甚至全球作物产量和经济损失进行预测和评估。

## 5 结语

臭氧对植物的伤害是人们关注的热点问题之一。建立模型模拟臭氧对作物生理生化机理的影响,能够为今后进一步精确预算臭氧对农业的影响提供重要参数,为国家制定符合国情的大气环境质量标准、预防和治理大气污染提供科学依据。

本文主要介绍了国内外臭氧浓度变化对作物影响模型研究的成果。通过分析和讨论,可以发现模型的发展与观测水平的提高是分不开的。所以只有继续深入地建立观测网络和数据库,扩大研究的作物品种,探讨植物生理活动对臭氧的响应,才能更好地发展和完善适用于中国的臭氧统计模型和机理模型,才能适应中国生态农业发展的需求。

## 参考文献

- 王春乙, 郭建平, 郑有飞. 1996. 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产. 北京: 气象出版社.
- 周秀骥. 2004. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京: 气象出版社.
- 郑昌岭, 王春乙. 2004. 臭氧对作物影响的模型研究概述. 气象科技, 32(3): 143–148.
- Adams RM, Glycer SL, Johnson SL, et al. 1989. A reassessment of economic effects of ozone on U. S. agriculture. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 39: 960–968.
- Ashmore MR. 2005. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment*, 28: 949–964.
- Basson S, Calanca P, Weidinger T, et al. 2004. Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: Model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment*, 38: 2349–2359.
- Danielsson H, Karlsson GP, Karlsson PE, et al. 2003. Ozone uptake modelling and flux-response relationships: An assessment of ozone-induced yield loss in spring wheat. *Atmospheric Environment*, 37: 475–485.

- Edwin LF, Fitzgerald LB, Kent OB. 2005. Crop responses to ozone: Uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell and Environment*, 28: 997–1011.
- Emberson L, Ashmore MR, Cambridge HM, et al. 2000. Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution*, 109: 403–413.
- Ewert F, Porter JR. 2000. Ozone effects on wheat in relation to CO<sub>2</sub>: Modelling short-term and long-term responses of leaf photosynthesis and leaf duration. *Global Change Biology*, 6: 735–750.
- Fuhrer J, Achermann B. 1999. Critical Levels for Ozone: A UN-ECE Workshop Report Liebefeld-Bern, Switzerland: Swiss Federal Research Station for Agricultural Chemistry and Environmental Hygiene.
- Fuhrer J, Skarby L, Ashmore M. 1997. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 97: 91–106.
- Grönhage L, Haenel HD, Jäger HJ. 2000. The exchange of ozone between vegetation and atmosphere: Micrometeorological measurement techniques and models. *Environmental Pollution*, 109: 373–392.
- Grönhage L, Jäger HJ, Haenel HD, et al. 1999. The European critical levels for ozone: Improving their usage. *Environmental Pollution*, 105: 163–173.
- Grönhage L, Jäger HJ. 2003. From critical levels to critical loads for ozone: A discussion of a new experimental and modelling approach for establishing flux-response relationships for agricultural crops and native plant species. *Environmental Pollution*, 125: 99–110.
- Heck WC, Adams RM. 1983. Reassessment of crop loss from ozone. *Environmental Science and Technology*, 17: 572–581.
- John AL, Christian PA. 2003. Ozone and natural systems: Understanding exposure, response, and risk. *Environment International*, 29: 155–160.
- Jürg F, Fitzgerald B. 2003. Ecological related to ozone: Agricultural issues. *Environment International*, 29: 141–154.
- Kobayashi K. 1992. Modeling and assessing the impact of ozone on rice growth and yield// Berglund RL, ed. *Tropospheric Ozone and the Environment*. Pittsburgh: Air & Waste Management Association: 537–551.
- Krupa SV, Nosal M, Legge AH. 1998. A numerical analysis of the combined open-top chamber data from the USA and Europe on ambient ozone and negative crop response. *Environmental Pollution*, 101: 157–160.
- Martin MJ, Host GE, Lenz KE, et al. 2001. Simulating the growth response of aspen to elevated ozone: A mechanistic

- approach to scaling a leaf-level model of ozone effects on photosynthesis to a complex canopy architecture. *Environmental Pollution*, **115**: 425–436.
- Martin MJ, Peter FK, Steve HW, et al. 2000. Can the stomatal changes caused by acute ozone exposure be predicted by changes occurring in the mesophyll? A simplification for models of vegetation response to the global increase in tropospheric elevated ozone episodes. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**: 211–219.
- Massman WJ, Musselman RC, Lefohn AS. 2000. A conceptual ozone dose-response model to develop a standard to protect vegetation. *Atmospheric Environment*, **34**: 745–759.
- Massman WJ. 2004. Toward an ozone standard to protect vegetation based on effective dose: A review of deposition resistance and a possible metric. *Atmospheric Environment*, **38**: 2323–2337.
- Mathy P. 1988. The European open-top chambers programme: Objectives and implementation// Assessment of Crop Loss from Air Pollutants. New York: Elsevier Applied Science: 505–513.
- Musselman RC, Lefohn AS, Massman WJ, et al. 2006. A critical review and analysis of the use of expose-and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment*, **40**: 1869–1888.
- Nussbaum S, Remund J, Rihm B, et al. 2003. High-resolution spatial analysis of stomatal ozone uptake in arable crops and pastures. *Environment International*, **29**: 385–392.
- Pleijel H, Danielsson H, Ojanperä K, et al. 2004. Relationships between ozone exposure and yield loss in European wheat and potato: A comparison of concentration-and flux-based exposure indices. *Atmospheric Environment*, **38**: 2259–2269.
- Pleijel H, Danielsson H, Vandermeiren K, et al. 2002. Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield: Results from the European CHIP programme. *European Journal of Agronomy*, **17**: 303–317.
- Uddling J, Günthardt-Goerg MS, Matyssek R, et al. 2004. Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake of ozone than to indices based on external exposure. *Atmospheric Environment*, **28**: 4709–4719.
- USEPA. 1997. National ambient air quality standards for ozone: Final rule. *Federal Register*, **62**: 38855–38896. Environmental Protection Agency, July 18, 1997.
- Zeller K, Nikolov N. 2000. Quantifying simulations fluxes of ozone, carbon dioxide and water vapor above a subalpine forest ecosystem. *Environmental Pollution*, **107**: 1–20.
- Zeller K. 2002. Summer and autumn ozone fluxes to a forest in the Czech Republic Brdy Mountains. *Environmental Pollution*, **119**: 269–278.

**作者简介** 姚芳芳,女,1981年生,硕士研究生。主要从事污染生态学和生理生态学研究。E-mail: shuijingfangfang@163.com  
**责任编辑** 李凤芹