臭氧污染与陆地生态系统生产力

任 巍^{1 2 3} 田汉勤^{2 *}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)
(2 美国奥本大学林业与野生生物学院 生态系统与区域研究实验室 奥本 AL36849 美国)
(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 空气污染的严重性、普遍性和不断发展的趋势及其对陆地生态系统生产力造成的重大影响已引起科学工作者的高度重视, 成为一个急需解决的重要课题。对流层臭氧(O_3) 在空气污染现状与未来发展趋势中占据重要角色, 该文重点探讨了 O_3 对陆地生态系统生产力的光合、分配、生长和产量形成等主要过程的影响及其对整个生态系统的长期效应, 并评述了相关研究方法进展。主要结论包括: O_3 在生产力形成过程中的每个环节中都有着不同程度的负面影响, 通过影响光合作用和气孔导度, 减少根冠比改变碳分配量, 而最终导致粮食生产和森林生物量损失率高达 30%; 气候变化、 CO_2 和 O_3 协同作用对植物影响较为复杂, 有促进也有抑制; 生态系统模拟已成为研究 O_3 污染影响陆地生态系统生产力的主要方法之一, 在区域评估和未来气候预测方面都具有重要作用。

关键词 空气污染 臭氧 陆地生态系统生产力 生态系统模式

EFFECTS OF OZONE POLLUTION ON TERRESTRIAL ECOSYSTEM PRODUCTIVITY

REN Wei^{1 2 3} and TIAN Han-Qin^{2 *}

¹Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, ²Ecosystem Science and Regional Analysis Laboratory, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn AL36849, USA, and ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Air pollution is a key factor that threatens earth's ecosystems and sustainability. Tropospheric ozone continues to be of major concern in the field of air pollution effects on terrestrial ecosystem productivity. In this paper, we have reviewed recent progresses in the studies of ozone effects on terrestrial production processes (including plant photosynthesis, carbon allocation, plant growth and crop yield), nutrient cycling, and species composition. Increased evidence shows that ozone can reduce the capability of photosynthesis by influencing leaf area and stomatal conductance, and alters the pattern of carbon allocation between shoot and root. Previous studies have also shown that elevated ozone could result in a maximum loss of 30% crop yield or forest production. However, little is known about how elevated ozone affects decomposition, nutrient cycling, species composition and trophic dynamics. There is an urgent need to investigate the synergetic effects of ozone pollution and climate change on terrestrial ecosystems. To address such a complex and large-scale environmental problem, spatially-explicit process-based ecosystem models have been used extensively in recent years. To advance our understanding of how air pollution and climate change influence terrestrial ecosystem productivity, further studies are needed to address multifactor experiments in the field and enhance the interaction between field studies and modeling.

Key words air pollution, ozone, terrestrial ecosystem productivity, ecosystem model

全球卫星监测系统、地面观测以及模拟分析结果表明, 空气污染已经成为全球性问题, 而且区域分布不均衡, 同时具有不断恶化的趋势(Reichle *et al.*, 1986; Klimont *et al.*, 2001; Wild & Akimoto, 2001; Nakajima *et al.*, 2001; Borrell, 2003)。陆地生态系

统生产力是碳循环的关键过程, 其结构与功能的维持与光照、热量、水分等气候条件紧密联系。大量事实说明, 大气成分数量变化(如温室气体 CO_2 、 O_3 、 CH_4 等排放的增加) 和空气质量改变(O_3 、Aerosol、 SO_2 和 NO_x 等浓度变化) 对生态系统生产力的形成过程

也有着直接和间接的影响(Akimoto , 2003)。空气污染的主要污染源是人类活动 , 如工业生产中化石能源的燃烧 , 汽车尾气排放和农业生产活动中刀耕火种的管理方式造成的气体排放等。空气污染事件不仅发生在城市地区 , 而且可以通过气流传输由城市中心扩散到周边地区(Heggstad & Middleton , 1959)。Jilliam 等(2003)的研究表明 , 通过气流输送等方式在城市周边的郊区可以形成高浓度污染气体沉降的环境 , 进而对农作物和森林等造成更大的伤害。关于各种污染气体(SO_2 、 NO_x 、 CO 、 O_3 、Aerosol、氟化物等)对陆地生态系统生产力的影响已有大量报道(Heagle , 1989 ; Barnes & Wellburn , 1998 ; Bergin *et al.* , 2001)。针对不同区域和不同植物类型的研究发现 , 90% 以上的空气污染危害是由对流层中 O_3 引起的(Adams *et al.* , 1989)。不同的研究结果都说明 , 目前陆地生态系统中 O_3 导致粮食生产和森林生物量损失可达 0 ~ 30% , 在未来 20 年内一些作物的减产率可增加 10 倍(McLaughlin & Percy , 1999 ; Aunan *et al.* , 2000)。预计到 2100 年陆地上 50% 森林生态系统将暴露于高浓度 O_3 (> 60 ppb)环境中 , 森林生产力将受到极大影响(Fowler *et al.* , 1999)。因此 , 深入研究臭氧污染对陆地生态系统生产力的影响机制和正确评估预测区域空气污染状况是非常必要的。

卫星遥感、地面观测和试验等先进手段在空气污染监测中的应用 , 以及各类光化学模式的出现 , 为研究空气污染物的发生、发展、分布与消亡等规律奠定了坚实的基础。同时大量研究进一步揭示了污染气体对生态系统生产力关键过程 , 包括光合、分配、生长及整个生态系统功能的影响机制(Virginia *et al.* , 1990 ; Andersen *et al.* , 1997 ; Woodbury *et al.* , 1994 ; Piikki *et al.* , 2004)。大气污染物(如 CO_2 、 O_3 、 SO_2 、 NO_x 、Aerosol 等)可以直接影响气候变化 , 并且协同气候变化、水分胁迫等多个环境因子 , 对生态系统生产力的形成过程以及格局变化产生多方位的影响。因此 , 空气污染物本身发生发展规律的不稳定性和空气污染影响气候变化的复杂性 , 以及陆地生态系统植物对这些污染物和气候变化的生理机制响应的不确定性 , 使得空气污染对生态系统生产力影响的研究仍然是一个巨大的挑战。生态系统模式模拟与区域综合分析方法(Tian *et al.* , 1999 , 2003)在空气污染区域评估和预测中发挥了越来越重要的作用(Felzer *et al.* , 2004)。

1 空气污染概述

1981 年卫星监测空气污染系统 MAPS 的观测资料首次表明 , 亚洲、非洲和南美洲的热带地区 CO 浓度已很高(Reichle *et al.* , 1986)。模拟分析结果显示 , 欧亚大陆和北美洲的中高纬度地区的地面 O_3 浓度已从 1860 年的 15 ~ 25 ppbv (10^{-9})增加到现在的 40 ~ 50 ppbv , 同时东亚区域监测系统和试验研究也表明 , O_3 的平均浓度已经达到伤害农业和自然生态系统的程度 , 最新的全球臭氧监测系统 GOME 观测到的 O_3 、 NO_2 、 SO_2 和 HCHO 等多种气体污染物(Borrell *et al.* , 2003)浓度变化和分布状况、MODIS/AVHRR 的遥感数据所获取的 Areole 的颗粒数量和云物理参数(Nakajima *et al.* , 2001)及其不同类型的分布(Higurashi & Nakajima , 2002)都表明 , 空气污染物的分布存在很明显的区域差异 ; 卫星资料(Derwent *et al.* , 1998 ; Stohl & Trickl , 1999 ; U.S. Environmental Protection Agency , 1999 ; Kato & Akimoto , 1992 ; Streets *et al.* , 2001)和化学气体传输模型研究(Wild & Akimoto , 2001)均表明 , O_3 、 CO 、 NO_x 和 Aerosol 在北美、欧洲和亚洲之间进行着洲际传输。此外 , 从 O_3 的主要前体污染物 NO_x 气体排放量的发展趋势来看 , 与欧美地区自 20 世纪 80 年代后基本保持每年 25 ~ 28 Tg 情况不同 , 亚洲地区在 70 ~ 90 年代一直保持增加的趋势(Akimoto 2003) , 而且在未来 20 年内将继续增加(Klimont *et al.* , 2001)。因此 , 全球范围空气污染不断恶化的趋势已成为一个无可争议的事实。

空气质量与人类活动密切相关 , 空气污染的研究重点也是随着空气污染物的发生发展而变化的。在人类活动干扰剧烈的一个多世纪内 , 从冶炼业、战争时代飞机制造到现代工业化的迅速发展过程中 , 大量化石燃烧和废气排放使得空气污染物也日益复杂多变。对于空气污染的研究也由单一的大气 SO_2 (Legge *et al.* , 1995)、氟化物(Adams *et al.* , 1952)、光化学污染物 SO_2 和 NO_x ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)及二次污染物 O_3 (Heck *et al.* , 1984 ; Heagle , 1989 ; Chameides *et al.* , 1994 ; Martin & Farage , 2000 ; Martin *et al.* , 2001)、气溶胶 Aerosol (Bergin *et al.* , 1997 , 2000 , 2001 ; Chameides *et al.* , 1999)、酸雨(Fowler *et al.* , 1999)等 , 逐渐转为对各种污染气体与温度、湿度和光照等气候条件的交互作用影响的研究(Barnes & Wellburn , 1998)。

不同空气污染物的化学特性差别较大 , 对植物

的影响也不同。目前对于评价不同空气污染气体对植物的影响 ,还没有一个简单的综合指数来表示。空气质量标准的制定与完善为空气污染生物学提供了一个重要的平台(表 1),已由原来简单的考虑空气污染物的平均浓度对植物的影响 ,发展到综合考虑植物冠层梯度变化、物候发育期和其它环境变量(如水汽压差、太阳辐射和温度)与空气污染相互作用下的真实复杂环境中植物所遭受的空气污染伤害。空气质量标准制定是随观测技术和研究方法提高而不断改进的。例如 O₃ 对植物伤害的定量化研究最初美国农业部和环境保护局 NCLAN 是以 SUM60(3 个连续生长季内超过 60 ppb 浓度的 O₃ 浓度累积值)来表示的,后来欧洲开顶式气室项目 EOTC 研究发现,当 O₃ 浓度超过 40 ppb 时,会对植物造成影响,因此普遍采用 AOTC₄₀(超过 40 ppb 浓度的累积值)来确定 O₃ 对植物的伤害。但在随后的

研究表明,大气污染物通过风或湍流由发生源传输到不同类型的生态系统,然后以不同的沉降速率到达植物的冠层和叶表面,并通过气孔和非气孔途径影响植物生长(Garland *et al.* , 1973 ;Erisman *et al.* , 1994)。于是许多研究人员认为,空气污染指数应该以动态的通量值来确定(Karlsson *et al.* , 2003)。而且部分实验表明生物量减产率与气孔导度的关系比 ATO₄₀更加密切(Uddling *et al.* , 2004)。但是也有研究发现,辐射、水汽压差和 CO₂ 浓度等环境因子可以降低植物气孔导度对 O₃ 的敏感性(Grulke *et al.* , 2002)。尽管还存在许多不确定因素,但是大量关于 O₃ 气孔传导与植物光合作用和生长率关系的研究(Reiling & Davison, 1992 ; Fredericksen *et al.* , 1996 ; Bungener *et al.* , 1999 ; Power & Ashmore , 2002 ; Wei *et al.* , 2004 ; van Oijen *et al.* , 2004)为进一步揭示 O₃ 影响生产力形成机制提供了依据。

表 1 空气污染指标计算(摘自 Bell & Treshow , 2002)
Table 1 Air pollution index calculation(Source : Bell & Treshow , 2002)

	单位 Units	计算时间 Calculation period
1 平均浓度 Mean concentration	μg·m ⁻³ or ppbv	季节平均或年平均 Seasonal or annual
2 峰值浓度 Peak concentration	μg·m ⁻³ or ppbv	季节平均或年平均 Seasonal or annual
3 累积潜在危害浓度 Accumulated exposure to potentially damaging concentration	AOT ₄₀ (ppbh > 40 ppb) SUM06 SUM 40	作物 4 ~ 6 月平均 树木 4 ~ 9 月平均 Cereals from Apr. to Jun. Tree from Apr. to Sept.
4 总酸输入量 Total acidifying input (∑SO _x + NO _y + NH _x)	k eq h ⁻² ·hm ⁻²	年平均 Annual
5 污染物沉降通量 Deposited flux of pollutant	kg·hm ⁻² per year nitrogen , eutrophication	全年 Year

2 臭氧对陆地生态系统生产力主要过程的影响

2.1 对光合作用的影响

光合作用是生态系统碳循环的起点,是生态系统生产力形成的基础。整个过程包括光能的吸收、传递以及光化学反应。限制光合作用碳固定的内部因素主要涉及光合器官叶片的发育和结构、CO₂ 进入植物体的气孔阻力、光合作用限速酶 RuBP 的羧化与再生、形成“同化力”的磷脂再生以及光合产物的输出等。而不良的环境条件是限制植物光合作用的碳固定的外部因素,它们主要涉及光照、温度、水分、CO₂ 以及矿质营养等几个方面。

O₃ 是制约植物光合作用内部因素的主要污染气体之一。大量研究表明,O₃ 对植物光合作用的影响主要是通过损伤叶片外形和叶肉组织,影响羧化

酶 RuBP 的活性、细胞通透性、有机物质的转化和运输、生长调节物质等方面,进而降低光合能力,加快器官组织衰老(Farage *et al.* , 1991 ; McKee *et al.* , 1995 ; Pell *et al.* , 1997)。气孔导度直接影响 CO₂ 和水汽通量,而 O₃ 浓度的增加使得气孔导度发生变化,进而也对光合作用产生影响(Tjoekler *et al.* , 1995)。而且通过气孔吸收 O₃ 吸收量对植物光合作用的影响大于不同基因对 O₃ 敏感性的作用(Reich , 1987),因此 O₃ 通量与气孔导度的关系已经成为目前研究的热点。Mauzerall 和 Wang(2000)认为,植物的 O₃ 吸收量应该由环境浓度值和气孔导度共同决定。目前,O₃ 对植物影响的背景浓度值常用 AOT₄₀/AOT₆₀(ppbh)表示,即超过 40 ppb/60 ppb 界限的 O₃ 浓度值的累积。Fowler 和 Duyer(1989)认为在田间试验可用微气象方法确定气孔吸收 O₃ 的通量,前提是能够算出气孔导度和水汽通量。经过两年草原植物

O₃ 沉降通量测定研究,结果表明非气孔沉降占总的 O₃ 沉降通量的 65%(Fowler *et al.*, 1999)。Emberson 等(2000)发展并应用了通量方法,定量研究了全欧洲作物的 O₃ 气孔通量。气孔与非气孔 O₃ 通量区分为研究 O₃ 对气孔导度的影响提供了基础。Farage 等(1991)运用 Farquhar 模型(Farquhar *et al.*, 1980)研究表明,长期或短期急剧 O₃ 的暴露并没有增加或减小气孔导度。Torsethaugen 等(1999)的试验表明,当 O₃ 浓度增加时,气孔导度的响应速度还与周围环境密切相关。Reich(1987)等的试验和模拟研究结果也表明,与 CO₂ 浓度增加降低气孔导度的行为相似,O₃ 浓度增加会直接降低气孔导度,进而影响光合速率(Tjoekler *et al.*, 1995; Ollinger *et al.*, 1997; Felzer *et al.*, 2004)。Martin 和 Farage(2000)与 Martin 等(2001)的试验与模拟研究表明,O₃ 浓度增加造成羧化酶 Rubisco 活性的损伤和电子传递速度(Kull *et al.*, 1996)的降低,直接导致气孔导度的下降和同化速率的降低。

2.2 对碳分配的影响

光合作用固定的碳在各个器官的运输和分配过程直接关系到植物体的生长与经济产量的高低。根据源库分配理论,韧皮部对同化物的装载运输是碳从源到库进行分配的第一道关口。而多个品种试验研究表明,O₃ 能够直接影响韧皮部的同化物装载能力。Grantz(2003)在对海岛棉(*Gossypium barbadense*)进行试验研究的基础上(Grantz & Yang, 2000)提出,植物是通过增加反馈阻力和水汽阻力来抵御 O₃ 的损伤。由于降低了韧皮部装载能力,而对光合速率和气孔导度产生间接影响。并且他发现,进行短期 O₃ 暴露,可使得叶片碳同化率大于碳的输出量,也就是分配给根部的总碳量减少了。这一假设的前提是,溶解性糖的生产增加而运输率降低。但是,Morgan 等(2003)通过大量数据分析却认为,O₃ 是通过直接降低光合速率影响生产力形成的。这是因为叶片中的非结构碳水化合物在 O₃ 影响下明显减少了。无论是哪种假说,Ashmore(2002)认为在考虑 O₃ 对源、库和运输之间的平衡时,他们都忽略了一个重要的方面,那就是不同植物类型和生长过程的不同时期,O₃ 对各个器官的影响是不同的。

研究表明,豆科植物从开花到生殖生长结束期间,对 O₃ 影响更为敏感。这可能是因为碳水化合物向生殖器官输出量过大,修复抵御 O₃ 损伤的有效能量降低所致(Tingey *et al.*, 2002)。小麦(*Triticum aestivum*)对臭氧敏感性试验结果也表明,开花到灌

浆期间是产量损失敏感期,主要是由于 O₃ 加速叶衰老,尤其是对旗叶影响更大(Pleijel *et al.*, 1998; McKee & Long, 2001; Piikki *et al.*, 2004)。Drogoudi 和 Ashmore(2001)通过去除果实部分的试验来研究 O₃ 对碳分配影响,结果表明更多的碳会保留在叶柄中。这说明多数作物能够通过提高光合速率增长新叶来适应 O₃ 造成的叶损伤,也就是提高叶片碳分配来弥补 O₃ 造成的光合作用降低。Kolb 和 Matyssek(2001)对林木的研究表明,成年树木对 O₃ 的影响更为敏感。暴露在 O₃ 中,树木生长趋于减少根部的碳分配,来抵御其它环境胁迫。由于野生植物生态适应性强,O₃ 对碳分配的影响比对光合能力的影响更重要(Davison & Barnes, 1998)。O₃ 对于森林和半自然生态系统碳分配的影响应该是一个长期的过程,总体表现为增加地上部分碳分配量而减少根部的碳分配量(Oksanen & Rousi, 2001; Karlsson *et al.*, 2003; Woodbury *et al.*, 1994)。

2.3 对植物生长和产量的影响

植物生长和产量形成是通过光合作用与同化物分配累积而实现的,因此空气污染对植物的作用是从微观结构、生化特性到个体生理功能、群体生长发育及生态系统的各个层次上产生的一系列有害影响,最终影响植物生长和产量形成。国内外关于空气污染对农业生态系统作物生长与产量影响的研究已经开展了大量的工作,研究方法主要有试验(包括生物学指标法、控制环境研究、田间暴露和自然大气田间小区法等)和模拟评估。模型评估的基本思想是在获取试验数据的基础上,建立 O₃ 浓度和作物生物量/产量之间的关系(Virginia *et al.*, 1990)或者在已建立的关系基础上进行一定空气污染状况下产量损失的估算(Aunan *et al.*, 2000)。

试验研究表明,农业生态系统中多种作物的产量在 O₃ 影响下会有不同程度的下降,不同作物类型对 O₃ 胁迫的敏感性不同,减产率也不同。利用美国 NCLAN 早期的季节性七小时平均 O₃ 浓度法(50 ppb),估计的不同作物的减产率敏感性分别为:大豆(*Glycine max*)和棉花(*Gossypium*)大于 10%,冬小麦略低于 10%,相对不敏感作物水稻(*Oryza sativa*)、大麦(*Hordeum vulgare*)和高粱(*Sorghum bicolor*)则低于 5%。大豆在 O₃ 浓度 70 ~ 90 ppb 时的产量损失达 40%,而花椰菜(*Brassica oleracea* var. *botrytis*)、在 O₃ 浓度为 63 ppb 时没有明显的损伤(Heck *et al.*, 1984, 1988)。用欧洲开顶式气室项目 EOTC 发展的最新标准 AOT₄₀指数法和 7 小时季节平均值法,同时

对美国 and 欧洲 6 种主要作物进行研究,结果表明:两大洲地区暴露-响应关系一致,大豆和小麦在产量方面对 O_3 影响最敏感,而大麦即使在高浓度 O_3 中也表现不敏感(Mills *et al.*, 2000)。我国学者也做了许多类似工作(王春乙, 1995; 金明红和黄益宗, 2001; 白月明等, 2002; 郭建平等, 2003); 同一类型的作物在不同时期受到 O_3 的影响,最终导致对产量影响的不同(Pleijel *et al.*, 1998; McKee & Long, 2001; Piikki *et al.*, 2004)。

与农业生态系统作物相似, O_3 对森林生态系统的影响也都是通过光合作用、碳在源库中的运输和分配等过程进行的。由于空气污染对森林影响的试验难度较大,目前这方面的研究相对较少。Andersen 等(1997)和 Woodbury 等(1994)研究了 O_3 对林木生长的影响。不同林木类型对 O_3 的敏感性不同,短期 O_3 对苗树的影响与长期 O_3 对成年树木影响有显著差别(Kelly *et al.*, 1995; Samuelson & Kelly, 2001),如 O_3 对成年树木径向生长的影响比苗树的大(Braun & Fluckiger, 1995)。

3 臭氧对陆地生态系统的长期影响

由于观测和试验的难度较大, O_3 对生态系统长期影响的研究较少。关于 O_3 对整个生态系统长期效应的研究,目前还没有明确的结论。但从现有草地(Montes *et al.*, 1982; Bungener *et al.*, 1999; Tonneijck *et al.*, 2004)和森林植被(Andersen *et al.*, 1997; Barbo *et al.*, 1998; Oksanen, 2003)的几项研究结果发现,多年生植物第一年对 O_3 影响的敏感性大于以后的生长季,原因可能是由于生理或形态上的适应过程。对于生态系统受到 O_3 危害后的自然选择问题,现有的研究仅能说明不同地区相同种群对 O_3 危害的响应不同(Danielsson *et al.*, 1999; Manninen *et al.*, 2003; Bassin *et al.*, 2004),但还不能充分确定种群分布是由于对 O_3 的忍耐性而产生空间变化的。Davison 等(2003)最新的调查研究表明,尽管植物的群落形成与遗传存在相关性,但微气象条件所引发的伤害程度比遗传效应更加明显。

O_3 能否引发种群内部竞争也是一个复杂的问题。与单作农业相比,草本物种暴露于 O_3 的试验表明对 O_3 敏感的草本物种会减少更多(Davison & Barnes, 1998; Fuhrer & Booker, 2003)。而 Evans 和 Ashmore(1992)在研究酸性草地群落时发现,与单一物种对 O_3 的响应不同,群落中对 O_3 颇为敏感的物种越是在高浓度 O_3 中,生长比率越大。但他们认

为,这种变化可能是由于主要草种变化的响应,而不是 O_3 的直接影响。Barbo 等(1998)则发现, O_3 能够明显降低生物量、生物多样性和处于演替早期的森林群落的物种均匀度,但是对单个种群的影响却是很难预测的。

大量研究表明, O_3 可以影响叶片的化学成分。例如 O_3 浓度升高可以增加叶片中酚的含量,促使叶片衰老,进而影响植物生长(Saleem *et al.*, 2001),而且 O_3 可以影响酶的底物浓度和土壤微生物活动进而降低土壤的分解速率(Kim *et al.*, 1998; Islam *et al.*, 2000)。Olszyk 等(2001)认为,提高 O_3 浓度可以改变凋落物的成分(Loranger *et al.*, 2004),影响地下食物链和碳氮循环。

更多研究表明, O_3 对整个生态系统的影响与氮的有效性和土壤水分状况等胁迫因子密切相关(Wager & Baker, 2003)。植物氮浓度高对抵抗 O_3 危害是有利的,主要是因为高浓度的氮含量可以通过提高叶片转换机制来适应环境,而低浓度的氮环境降低了叶片的防御和修复功能(Maurer & Matyssek, 1997),但这两种适应过程都会降低碳在根部的分配。在美国东部为期 5 年的树干生长监测结果表明,茎的径向生长(Radial growth)是由 O_3 和土壤水分的共同作用影响的, O_3 对植物生长的影响在湿润年比干旱年要大。而且许多模式研究(Ollinger *et al.*, 1997; Martin & Farage, 2000; Felzer *et al.*, 2004)将 O_3 影响与气孔导度、光合速率结合起来,结果表明,美国东北部 64 个站点森林生产和净初级生产力(NPP)受到土壤水分的严重影响。但这与模式中 O_3 、气孔导度与水分胁迫关系的假设前提有关。研究表明生态系统种群竞争是与 O_3 浓度、氮沉降、降水以及管理措施等因子的协同效应密切相关的(Arbaugh *et al.*, 2003; Jones *et al.*, 2004)。因此, O_3 对于生态系统结构和功能的影响是不能孤立考虑的。

4 臭氧与气候变化的协同作用

陆地生态系统正在经历着全球环境物理与化学的急剧变化。以全球变暖为标志的全球气候系统变化对陆地生态系统的影响早已受到人们的普遍关注。研究表明,气温变化对陆地生态系统植物的生物化学过程影响非常复杂(Melillo *et al.*, 1993; Shaver *et al.*, 2000)。观测资料表明,大量温室气体排放(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 SO_2 和 O_3 等)是导致全球变暖的主要原因(IPCC, 2001),而对流层中 O_3 的增温效

应是 CO_2 和其它温室气体的 15% ~ 20%(Kiehl *et al.* , 1999 ; Berntsen *et al.* , 2000)。21 世纪对流层中的 O_3 浓度会持续增长 , 大气 CO_2 浓度将是现在浓度的 2 倍(Stevenson *et al.* , 1998 ; Brasseur *et al.* , 1998 ; IPCC , 2001) 因此研究大气 CO_2 和 O_3 浓度增加和它们的协同效应是非常必要的。大量试验结果说明 , 单纯 CO_2 增加和 CO_2 、 O_3 共同增加对各种作物、森林等不同植物类型生长影响状况不同。对比试验说明 , 单独 CO_2 浓度升高可以促进生物量的增加 , CO_2 和 O_3 同时增加的协同作用对植物生长影响比较复杂 , 有促进植物生长(Mulchi *et al.* , 1995 ; Rudorff *et al.* , 1996) 也有抑制植物生长的(McDonald *et al.* , 2002) , 而且同类不同品种的作物对 CO_2 和 O_3 协同效应的敏感性也不同。Volin 等(1998) 研究表明 , 提高 CO_2 可以补偿 O_3 对植物生长的负面影响。而其它研究则表明 , 提高 CO_2 浓度不但不能缓解 , 还会加重 O_3 的负面效应(Kull *et al.* , 1996 ; Wustman *et al.* , 2001 ; McDonald *et al.* , 2002)。最近的 FACE(Free-air concentration enrichment) 试验研究结果也表明 , CO_2 的施肥效应并非像以往研究那样明显(Long *et al.* , 2006) , 对于气候变化和空气污染引起的生产力的损失也没有像最初模式预测的那样能够得到完全补偿。因此 , 尽管大量试验表明大气 CO_2 浓度升高对生态系统有直接施肥效应 , 但在这两种气体浓度的增加和相互作用中 , 协同其它胁迫因子如竞争、干旱、氮沉降等对陆地生态系统生产力的影响将是非常复杂的(McDonald *et al.* , 2002 ; Karnosky *et al.* , 1992)。另外 , 空气污染物与气候变化的协同效应不但可以直接影响生态系统生产力 , 还可以通过影响植物的品质、引发自然灾害等来影响生态系统生产力(Muntifering , 2006)。

5 研究方法概述

从 20 世纪 40 年代美国洛杉矶光化学烟雾被证实对叶片有伤害起 , 空气污染对植物生长和产量形成的影响和危害日益受到科学界的重视 , 并在随后的半个多世纪内首先采用室内或田间试验方法开展了大量细致的研究。目前各种监测技术的出现和仪器的改进 , 促进了试验方法的发展 , 使研究工作者更加清楚地认识到污染气体的时空格局及其沉降过程 , 推动了以污染气体气孔传导为基础的污染机制的微观尺度研究 , 提供了多种污染气体和水肥等胁迫因子共同作用的较为真实的环境条件 , 加速了植物对污染气体响应的研究。但试验方法在区域评估

与未来影响预测的研究中存在一定局限性 : 如少数站点试验结果不能代表区域普遍性 ; 短期试验结果不能说明长期累积效应 ; 试验设计过于简化真实环境状况等。而生态系统模型模拟能够克服试验方法的诸多弊端 , 在目前全球气候变化和空气污染发生发展规律存在较大不确定性的状况下 , 将成为解决这一多变量复杂过程的有力工具 , 也使得大尺度生态系统格局与过程的区域分析和全球问题研究成为可能(Tian *et al.* , 2005)。

从目前研究状况来看 , 空气污染对陆地生态系统生产力影响的模拟可分为静态模拟和动态模拟两类。静态模拟是运用统计分析方法 , 建立污染气体浓度与最终生产力之间的经验关系。这种经验关系中关键是确定空气污染的影响函数 $F(\text{O}_3)$, 包括线性关系、指数方程、Wellbull 方程等形式(Heck *et al.* , 1988)。这种 O_3 对生产力影响的大尺度区域评估需要 3 方面的信息 : 1) 研究区域内植物的分布信息和生产力情况 ; 2) 研究区域内的空气污染物浓度 ; 3) 空气污染物浓度与不同植物类型生产力之间的影响关系(Heck *et al.* , 1984)。在此基础上 , 静态模式已经取得了如下几方面的进展 : 1) 综合考虑 O_3 与其它因子的协同作用 , 如 O_3 与水分胁迫、 CO_2 和氮元素等相互作用对生产力的影响(King , 1987 ; Heggstad & Lesser , 1990 ; Adaros *et al.* , 1991 ; Nouchi *et al.* , 1995 ; Heagle *et al.* , 1999) ; 2) 研究 O_3 浓度对植物损伤的暴露指数(US Environmental Protection Agency , 1996) , 如 AOT_{40} 、 SUMO6 和 W126 , 为准确评估生产力的损失提供了依据 ; 3) 光化学传输模式开发(Dennis *et al.* , 1996) 验证与应用 , 使得在大尺度上模拟评估 O_3 污染对作物或森林生产力影响成为可能(Chameides *et al.* , 1994 ; Murphy *et al.* , 1999) ; 4) 空气污染影响的经济损失评估模式的发展(Kuik *et al.* , 2000 ; Mauzerall *et al.* , 2000 ; Aunan *et al.* , 2000)。目前 , 多源数据、多因子的区域集成模拟以及区域空气污染状况的情景模拟为进一步揭示臭氧对大尺度生产力的影响和经济损失评估奠定了基础。但多数研究仍然基于污染气体浓度与最终产量之间的经验关系 , 因此都属于静态模拟。

动态模式是生态系统模拟的发展趋势 , 它可以突破静态模式的局限性 , 模拟全球变化背景下陆地生态系统的格局与过程(田汉勤 , 2002)。在空气污染监测和各种试验研究获取的大量数据和参数基础上 , 动态模式可以揭示污染气体对光合、分配、生长等主要过程和整个生态系统生产力形成影响的生理

机制。动态模式的发展主要归纳为:考虑空气污染对生理化学机制过程影响的光合作用模式发展(Ollinger *et al.*, 1997; Martin & Farage, 2000; Martin *et al.*, 2001; 刘建栋等, 2004); 基于植物生长发育机理过程的作物/森林生长模式(Martin *et al.*, 2001); 基于生态学过程的生物地球化学模式¹⁾²⁾(Felzer *et al.*, 2004)。从动态模式的整体发展趋势来看, 模拟尺度由叶片、植株个体到群体生态系统逐渐扩展, 模拟时间步长由月、日到瞬时逐渐精细。目前生态系统模型已经广泛应用于土地利用(陈广生和田汉勤, 2007)、氮沉降(吕超群等, 2007)、火干扰(吕爱锋和田汉勤, 2007)等胁迫因子对生态系统生产力的影响。但是 O_3 对生态系统生产力影响的研究仍然相对薄弱, 存在许多不确定性:如 O_3 的短期伤害机制是否适应于整个生长季; 叶片光合过程对 O_3 与其它污染性气体、干旱等胁迫因子与气候变化共同的响应机理还不清楚; 对某一种植物个体的模拟研究是否适用于其它种类的植物; 对整个生态系统的模拟并没有考虑到种群竞争与生态适应性的问题等。

针对目前研究存在的问题, 我们认为尺度扩展与多模式耦合是研究空气污染对陆地生态系统生产力影响的发展趋势。这主要是因为, 一方面站点试验观测时间短、试验设计在特定环境中, 加之植被类型和地域不同, 使得观测结果存在很大局限性不利于尺度扩展, 不利于生态系统的宏观评估与国家政策的制定; 另一方面我们很难对污染气体的协同作用、未来气候变化和其它胁迫因子影响的复杂多变环境进行实验研究, 这就阻碍了我们精确理解生态系统生产力对臭氧浓度变化的响应。而模式则可以通过关键参数模拟主要过程, 有助于理解 O_3 对生态系统生产力影响的生理机制与过程。耦合光化学模式、作物/森林生长模式和地球生物化学等模式的生态系统模式能够更精确地模拟区域空气污染对陆地生态系统生产力的影响, 进而推动陆地生态系统碳循环的研究。

6 问题与展望

空气污染是一个全球性的问题, 其对陆地生态系统生产力影响成为诸多学科的研究热点。深入研

究空气污染对陆地生态系统生产力的影响机制, 发展生态系统模式, 可以对地区、国家和全球的陆地生态系统生产力影响和动态变化做出较准确的评估和预测, 为采取有效措施缓解空气污染对生态系统生产力的危害提供科学依据。目前, 关于空气污染对陆地生态系统生产力的影响主要集中于部分过程, 如光合碳固定、碳分配、植物生长和产量形成等。但针对污染气体本身的不确定性与气候变化等协同效应的研究还较薄弱, 主要表现在以下几个方面: 1) 缺乏长期观测数据, 对污染气体浓度大小、分布和输送规律还不十分清楚, 严重限制了研究工作的发展; 2) 空气污染的危害机制还存在很多不确定性: 如空气污染从分子结构的伤害到对整个生态系统影响, 还有很多类似根系生理机制、植物种群竞争和进化适应方面的问题尚待解决; 3) 研究影响因子单一, 不能综合考虑多种污染气体的协同作用和气候变化的影响; 4) 模式发展存在局限性: 如基于特定区域与植物类型发展的模式的普适性问题, 叶片尺度到个体和生态系统的尺度扩展问题, 以及和多源数据的融合问题。针对以上存在的问题, 我们认为还需要在如下方面进一步开展工作:

1) 加大空气污染监测力度和数据共享机制: 卫星遥感与地面观测网结合进行长期动态监测, 建立有效的数据库, 加强政府间合作, 实现数据信息互通和共享, 为正确评价空气污染浓度大小、分布和输送规律提供可靠的数据支持。

2) 深入开展试验方法研究: 考虑多种因子协同作用和整个生育期长时间的影响, 尤其是气候变化、 CO_2 增加和 O_3 等污染气体协同作用对生态系统光合作用、同化物分配、生长发育和产量形成等主要过程的生理化学影响机制研究。

3) 加速生态系统模式的发展: 开发基于过程的空气污染与植物生长、地球生物化学模式的耦合模式研究, 使模式能够模拟有多种胁迫因子环境, 并在尺度扩展研究的基础上, 能够较为准确地进行区域评估和未来情景预测。

参 考 文 献

Adams DF, Mayhew DJ, Gnagy RM, Richey EP, Koppe RR, Allen LW (1952). Atmospheric pollution in the ponderosa pine blight area. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44,

1) Ren W, Tian H, Chen G, Liu M, Zhang C, Chappelka AH, Pan S (2007). Influence of ozone pollution and climate variability on grassland ecosystem productivity across China. *Environmental Pollution*. (in press)

2) Zhang C, Tian H, Chappelka AH, Ren W, Chen H, Pan S, Liu M, Styers D, Chen G, Wang Y (2007). Impacts of climatic and atmospheric changes on carbon dynamics in the Great Smoky Mountains National Park. *Environmental Pollution*. (in press)

- 1356 – 1365.
- Adams RM, Glyer DJ, Johnson SL, McCarl BA (1989). A reassessment of the economic effects of ozone on the U.S. agriculture. *Journal of Air Pollution Control Association*, 39, 960 – 968.
- Adaros G, Weigel HJ, Jager HJ (1991). Concurrent exposure to SO₂ and/or NO₂ alters growth and yield responses of wheat barely to low concentrations of O₃. *New Phytologist*, 118, 581 – 591.
- Akimoto H (2003). Global air quality and pollution. *Science*, 302, 1716 – 1719.
- Andersen CP, Wilson R, Plocher M, Hogsett WE (1997). Carry-over effects of ozone on root growth and carbohydrate concentrations of ponderosa pine seedlings. *Tree Physiology*, 17, 805 – 811.
- Arbaugh M, Bytnerowics A, Grulke N, Fenn M, Poth M, Temple P, Miller P (2003). Photochemical smog effects in mixed conifer forests along a natural gradient of ozone and nitrogen deposition in the San Bernadino Mountains. *Environment International*, 29, 401 – 406.
- Ashmore MR (2002). Effects of oxidants at the whole plant and community level. In: Bell JNB, Treshow M eds. *Air Pollution and Plant Life* 2nd edn. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 89 – 118.
- Aunan K, Berntsen TK, Seip HM (2000). Surface ozone in China and its possible impact on agriculture crop yields. *Ambio*, 29, 294 – 301.
- Bai YM (白月明), Guo JP (郭建平), Wang CY (王春乙), Wen M (温民) (2002). The reaction and sensitivity experiment of O₃ on rice and winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 10, 13 – 20. (in Chinese with English abstract)
- Barbo DN, Chappelka AH, Somers GL, Miller-Goodman MS, Stolte K (1998). Diversity of an early successional community as influenced by ozone. *New Phytologist*, 138, 653 – 662.
- Barnes JD, Wellburn AR (1998). Air pollutant combinations. In: de Kok LJ, Stuhlen I eds. *Responses of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change*. Backhuys Publishing, Leiden, 147 – 164.
- Bassin S, Kolliker R, Cretton C, Bertossa M, Widmer F, Bungener P, Fuhrer J (2004). Intra-specific variability in ozone elevated ozone concentrations. *Environmental Pollution*, 131, 1 – 12.
- Bell JNB, Treshow M (2002). *Air Pollution and Plant Life* 2nd edn. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 44 – 45.
- Bergin MH, Greenwald W, Xu J, Berta Y, Chameides WL (2001). Influence of aerosol dry deposition on photosynthetically active radiation available to plants: a case study in the Yangtze delta region of China. *Geophysical Research Letters*, 28, 3605 – 3608.
- Bergin MH, Halthore RS, Schwartz SE, Ogren JA, Nemesure S (2000). Comparison of aerosol column properties based on nephelometer and radiometer measurements at the SGP ARM Site. *Journal of Geophysical Research*, 105, 6807 – 6816.
- Bergin MH, Schwartz SE, Ogren JA, McInnes LM (1997). Evaporation of ammonium nitrate aerosol in a heated nephelometer: implications for field measurements. *Environmental Science & Technology*, 31, 2878 – 2883.
- Berntsen TK, Myhre G, Storal F, Isaksen ISA (2000). Time evolution of tropospheric ozone and its radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105, 8915 – 8930.
- Borrell P, Burrows JP, Platt U, Richter A, Wagner T (2003). The complexities of ozone chemistry mean that policy makers are facing many challenges to improve air quality. *Atmospheric Environment*, 37, 25 – 67.
- Brasseur GP, Kiehl JT, Muller JF, Schneider T, Granier C, Tie X, Hauglustaine D (1998). Past and future changes in global tropospheric ozone: impact on radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 25, 3807 – 3810.
- Braun S, Fluckiger W (1995). Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. *New Phytologist*, 129, 33 – 44.
- Bungener P, Nussbaum S, Grub A, Fuhrer J (1999). Growth responses of grassland species to ozone in relation to soil moisture condition and plant strategy. *New Phytologist*, 142, 283 – 293.
- Chameides WL, Li X, Tang X, Zhou X, Luo C, Kiang CS, John J St., Saylor RD, Liu SC, Lam KS, Wang T, Giorgi F (1999). Is ozone pollution affecting crop yield in China? *Geophysical Research Letters*, 26, 867 – 870.
- Chameides WL, Kasibhatla P, Yienger J, Levy H II (1994). Growth of continental-scale metro-agro-plexes, regional ozone pollution and world good production. *Science*, 264, 74 – 77.
- Chen GS (陈广生), Tian HQ (田汉勤) (2007). Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 189 – 204. (in Chinese with English abstract)
- Danielsson H, Gelang J, Pleijel H (1999). Ozone sensitivity, growth and flower development in *Phleum* genotypes of different geographic origin in the Nordic countries. *Environmental and Experimental Botany*, 42, 41 – 49.
- Davison AW, Barnes J (1998). Effects of ozone on wild plants. *New Phytologist*, 139, 135 – 151.
- Davison AW, Neufeld HS, Chappelka AH, Wolff K, Finkelstein PL (2003). Interpreting spatial variation in ozone symptoms shown by cut leaf cone flower, *Rudbeckia laciniata* L. *Environmental Pollution*, 125, 61 – 71.
- Dennis RL, Byun DW, Novak JH, Galluppi KJ, Coats CJ, Vouk MA (1996). The next generation of integrated air quality models: EPA's Models-3. *Atmospheric Environment*, 30, 1925 – 1938.
- Derwent RG, Simmonds PG, Doherty SO, Ryall DB (1998). The impact of the Montreal Protocol on halocarbon concentrations in Northern Hemisphere baseline and European air masses at Mace Head, Ireland over a ten year period from 1987 – 1996. *Atmospheric Environment*, 32, 3689 – 3702.
- Emberson LD, Ashmore MR, Cambridge HM, Simpson D, Tuovinen JP (2000). Modeling stomatal ozone flux across Europe. *Environ-*

- mental Pollution*, 109, 403 – 413.
- Erisman JW, van Pul A, Wyers P (1994). Parameterization of dry deposition mechanisms for the quantification of atmospheric input to ecosystems. *Atmospheric Environment*, 28, 2595 – 2607.
- Evans PA, Ashmore MR (1992). The effects of ambient air on a semi-natural grassland community. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 38, 91 – 97.
- Farage PK, Long SP, Lechner EG, Baker NR (1991). The sequence of change within the photosynthetic apparatus of wheat following short-term exposure to ozone. *Plant Physiology*, 95, 529 – 535.
- Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149, 78 – 90.
- Felzer B, Kicklighter D, Melillo J, Wang C, Zhuang Q, Prinn R (2004). Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model. *Tellus*, 56, 230 – 248.
- Fowler D, Cape JN, Coyle M, Smith RI, Hellbrekke AG, Simpson D, Derwent RD, Johnson C (1999). Modelling photochemical oxidant formation, transport, deposition and exposure of terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100, 43 – 55.
- Fowler D, Duyzer JH (1989). Micrometeorological techniques for the measurement of trace gas exchange. In: Andreae MO, Schimel DS eds. *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystem and the Atmosphere*. John Wiley and Sons, New York, 189 – 207.
- Fredericksen TS, Kolb TE, Skelly JM, Steiner KC, Joyce BJ, Savage JE (1996). Light environment alters ozone uptake per net photosynthetic rate in black cherry (*Prunus serotina* Ehrh.) trees. *Tree Physiology*, 16, 485 – 490.
- Fuhrer J, Booker FL (2003). Ecological issues related to ozone: agricultural issues. *Environment International*, 29, 141 – 154.
- Garland JA, Clough WS, Fowler D (1973). Deposition of sulphur dioxide on grass. *Nature*, 242, 256 – 257.
- Grantz DA (2003). Ozone impacts on cotton: towards an integrated mechanism. *Environmental Pollution*, 126, 331 – 344.
- Grantz DA, Yang S (2000). Ozone impacts on allometry and root hydraulic conductance are not mediated by source limitation or developmental age. *Journal of Experimental Botany*, 51, 919 – 927.
- Grulke NE, Preisler HK, Fan CC, Retzlaff WA, Fan CC, Retzlaff W (2002). A statistical approach to estimate ozone uptake of ponderosa pine in a Mediterranean climate. *Environmental Pollution*, 119, 163 – 175.
- Guo JP (郭建平), Wang CY (王春乙), Wen M (温民) (2003). Study on the impacts of ozone concentration on vegetables. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 11(2), 18 – 20. (in Chinese with English abstract)
- Heagle AS (1989). Ozone and crop yield. *Annual Review of Phytopathology*, 27, 397 – 423.
- Heagle AS, Mille JS, Booker FL, Pursley WA (1999). Ozone stress, carbon dioxide enrichment, and nitrogen fertility interactions in cotton. *Crop Science*, 39, 731 – 741.
- Heck W, Taylor OC, Tingoy DT (1988). *Assessment of Crop Loss from Air Pollutants*. Elsevier Science, London.
- Heck WW, Cure WW, Rawlings JO, Zaragoza LJ, Heagle AS (1984). Assessing impacts of ozone on agricultural crops. I. Overview. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 34, 729 – 735.
- Heggstad HE, Lesser VM (1990). Effects of ozone, sulfur dioxide, soil water deficit, and cultivar on yields of soybean. *Journal of Environmental Quality*, 19, 488 – 495.
- Heggstad HE, Middleton JT (1959). Ozone in high concentrations as a cause of tobacco injury. *Science*, 129, 208 – 210.
- Higurashi A, Nakajima T (2002). Detection of aerosol over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data. *Geophysical Research Letters*, 29, 1836 – 1853.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policy-Makers*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Islam KR, Mulchi CL, Ali AA (2000). Interactions of tropospheric CO₂ and O₃ enrichments and moisture variations on microbial biomass and respiration in soil. *Global Change Biology*, 9, 255 – 265.
- Jilliam WG, Clive GJ, Fodd ED (2003). Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 424, 183 – 187.
- Jin MH (金明红), Huang ZY (黄益宗) (2003). Review of crops damaged and yield loss by ozone stress. *Ecology and Environment* (生态环境), 12, 482 – 486. (in Chinese with English abstract)
- Jones ME, Paine TD, Fenn ME, Poth MA (2004). Influence of ozone and nitrogen deposition on bark beetle activity under drought conditions. *Forest Ecology and Management*, 200, 67 – 76.
- Karlsson PE, Uddling J, Skarby L, Wallin G, Sellden G (2003). Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) seedlings. *Environmental Pollution*, 124, 485 – 495.
- Karnosky DF, Gagnon ZE, Reed DD, Witter JA (1992). Effects of genotype on the response of *Populus tremuloides* Michx. to ozone and nitrogen deposition. *Water, Air, & Soil Pollution*, 62, 189 – 199.
- Kato N, Akimoto H (1992). Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: emission inventories. *Atmospheric Environment*, 26, 2997 – 3017.
- Kelly JM, Samuelson LJ, Edwards G, Hanson P, Kelting D, Mays A, Wullschlegel S (1995). Are seedlings reasonable surrogates for trees? An analysis of ozone impacts on *Quercus rubra*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 85, 1317 – 1324.
- Kiehl JT, Schneider TL, Portmann RW, Solomon S (1999). Climate forcing due to tropospheric and stratospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 104, 31239 – 31254.
- Kim JS, Chappelka AH, Miller-Goodman MS (1998). Decomposi-

- tion of blackberry and broomsedge bluestem as influence by ozone. *Journal of Environmental Quality*, 27, 953 – 960.
- King DA (1987). A model for predicting the influence of moisture stress on crop losses caused by ozone. *Ecological Modelling*, 35, 39 – 44.
- Klimont Z, Cofala J, Schopp W, Amann M, Streets DG, Ichikawa Y, Fujita S (2001). Projections of SO₂, NO_x, NH₃ and VOC emissions in East Asia up to 2030. *Water, Air, & Soil Pollution*, 130, 193 – 198.
- Kolb TE, Matyssek R (2001). Limitations and perspectives about scaling ozone impacts in trees. *Environmental Pollution*, 115, 373 – 393.
- Kuik OJ, Helming JFM, Dorland C, Spaninks FA (2000). The economic benefits to agriculture of a reduction of low-level ozone pollution in the Netherlands. *European Review of Agricultural Economics*, 27, 76 – 90.
- Kull O, Sober A, Coleman MD, Dickson RE, Isebrands JG, Gagnon Z, Karnosky DF (1996). Photosynthetic responses of aspen clones to simultaneous exposures of ozone and CO₂ Canadian. *Journal of Forestry Research*, 26, 639 – 648.
- Legge AH, Grunhage L, Nosal M, Jager HJ, Krupa SV (1995). Ambient ozone and adverse crop response: an evaluation of North American and European data as they related to exposure indices and critical levels. *Journal of Applied Botany*, 69, 192 – 205.
- Liu JD (刘建栋), Zhou XJ (周秀骥), Yu Q (于强), Yan P (颜鹏), Guo JP (郭建平), Ding GA (丁国安) (2004). A numerical simulation of the impacts of ozone in the ground layer atmosphere on crop photosynthesis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (大气科学)*, 28, 59 – 67. (in Chinese with English abstract)
- Long SP, Ainsworth EA, Leahey ADB, Nosberger J, Ort DR (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312, 1918 – 1921.
- Loranger GI, Pregitzer KS, King JS (2004). Elevated CO₂ and O₃ concentrations differentially affect selected groups of the fauna in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1521 – 1524.
- Li AF (吕爱锋), Tian HQ (田汉勤) (2007). Interaction among climatic change, fire disturbance and ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version) (植物生态学报)*, 31, 242 – 251. (in Chinese with English abstract)
- Li CQ (吕超群), Tian HQ (田汉勤), Huang Y (黄耀) (2007). Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version) (植物生态学报)*, 31, 205 – 218. (in Chinese with English abstract)
- Manninen S, Siivonen N, Timonen U, Huttunen S (2003). Differences in ozone response between two Finnish wild straw-berry populations. *Environmental and Experimental Botany*, 49, 29 – 39.
- Martin MJ, Farage PK (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.
- Martin MJ, Host GE, Lenz KE (2001). Stimulating 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.
- Maurer S, Matyssek R (1997). Nutrition and the ozone sensitivity of birch (*Betula pendula*). II. Carbon balance, water-use efficiency and nutritional status of the whole plant. *Trees*, 12, 11 – 20.
- Mauzerall DL, Narita D, Akimoto H, Horowitz L, Waters S (2000). Seasonal characteristics of tropospheric ozone production and mixing ratios of East Asia: a global three-dimensional chemical transport model analysis. *Journal of Geophysical Research*, 105, 17895 – 17910.
- Mauzerall DL, Wang X (2001). Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: science and standard setting in the United States, Europe, and Asia. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 237 – 268.
- McDonald EP, Kruger EL, Riemenschneider DE, Isebrands JG (2002). Competitive status influences tree-growth responses to elevated CO₂ and O₃ in aggregating aspen stands. *Functional Ecology*, 16, 792 – 801.
- McKee IF, Farage PK, Long SP (1995). The interactive effects of elevated CO₂ and O₃ concentration on photosynthesis in spring wheat. *Photosynthesis Research*, 45, 111 – 119.
- McKee IF, Long SP (2001). Plant growth regulators control ozone damage to wheat yield. *New Phytologist*, 152, 41 – 51.
- McLaughlin S, Percy K (1999). Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 116, 151 – 197.
- Melillo JM, McGuire D, Kicklighter DW, Moore B III, Vorosmarty CJ, Schloss AL (1993). Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363, 234 – 240.
- Mills G, Hayes F, Buse A, Reynolds B (2000). *Air Pollution and Vegetation. Annual Report 1999/2000 of UN/ECE ICP Vegetation*. Centre for Ecology and Hydrology, Bangor.
- Montes PB, Blum U, Heagle AS (1982). The effects of ozone and nitrogen fertilizer on tall fescue, ladino clover and a fescue-cover mixture. I. Growth, regrowth and forage production. *Canadian Journal of Botany*, 60, 2745 – 2752.
- Morgan PB, Ainsworth EA, Long SP (2003). How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield. *Plant, Cell and Environment*, 28, 1317 – 1328.
- Mulchi C, Rudorff B, Lee E, Rowland R, Pausch R (1995). Morphological responses among crop species to full-season exposures to enhanced concentrations of atmospheric CO₂ and O₃. *Water, Air, & Soil Pollution*, 85, 1379 – 1386.
- Muntifering RB, Chappelka AH, Lin JC, Karnosky DF, Somers GL (2006). Chemical composition and digestibility of *Trifolium ex-*

- posed to elevated ozone and carbon dioxide in a free-air (FACE) fumigation system. *Functional Ecology*, 20, 269 – 275.
- Murphy JJ, Delucchi MA, McCubbin DR, Kim HJ (1999). The cost of crop damage caused by ozone air pollution from motor vehicles. *Journal of Environmental Management*, 55, 273 – 289.
- Nakajima T, Higurashi A, Kawamoto K, Penner JE (2001). Possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters. *Geophysical Research Letters*, 28, 1171 – 1174.
- Nouchi I, Ito O, Harazono Y, Kouchi H (1995). Accelerating of ^{13}C -labelled photosynthate partitioning from leaves to panicles in rice plants exposed to chronic ozone at the reproductive stage. *Environmental Pollution*, 88, 253 – 260.
- Oksanen E (2003). Physiological responses of birch (*Betula pendula*) to ozone: a comparison between open-soil-growth trees exposed for six growing season. *Tree Physiology*, 23, 603 – 614.
- Oksanen E, Rousi M (2001). Differences of *Betula* origins in ozone sensitivity based on open-field experiment over two growing seasons. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 804 – 811.
- Ollinger SV, Aber JD, Reich PB (1997). Simulating ozone effects on forest productivity: interactions among leaf-canopy and stand-level processes. *Ecological Applications*, 7, 1237 – 1251.
- Olszyk DM, Johnson MG, Phillips DL, Seidler RJ, Tingey DT, Watrud LS (2001). Interactive effects of CO_2 and O_3 on a ponderosa pine plant/litter/soil mesocosm. *Environmental Pollution*, 115, 447 – 462.
- Pell EJ, Schlagnhauer CD, Arteca RN (1997). Ozone-induced oxidative stress: mechanisms of action and reaction. *Physiologia Plantarum*, 100, 264 – 273.
- Piikki K, Sellden G, Pleijel H (2004). The impact of tropospheric ozone on leaf number duration and tuber yield of the potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars Bintje and Kardal. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104, 483 – 492.
- Pleijel H, Danilsson H, Gelang J, Sild E, Sellden G (1998). Growth stage dependence of the grain yield response to ozone in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 70, 61 – 68.
- Power SA, Ashmore MR (2002). Responses of fen and fen-meadow communities to ozone. *New Phytologist*, 156, 399 – 408.
- Reich PB (1987). Quantifying plant response to ozone: a unifying theory. *Tree Physiology*, 3, 63 – 91.
- Reichle HGJ, Cornsen VS, Saylor MS, Hypes WD, Wallio HA, Casas JC, Gormsen BB, Saylor MS, Hesketh WD (1986). Middle and upper tropospheric carbon monoxide mixing ratios as measures by a satellite-borne remote sensor during November 1981. *Journal of Geophysical Research*, 91, 10865 – 10887.
- Reiling PB, Davison AW (1992). The response of native, herbaceous species to ozone: growth and fluorescence screening. *New Phytologist*, 120, 29 – 37.
- Rudorff BFT, Mulchi CL, Lee FH, Rowland R, Pausch R (1996). Effects of enhanced O_3 and CO_2 enrichment on plant characteristics in wheat and corn. *Environmental Pollution*, 94, 53 – 60.
- Saleem A, Loponen J, Pihlaja K, Oksanen E (2001). Effects of long-term open-field ozone exposure on leaf phenolics of European silver birch (*Betula pendula* Roth). *Journal of Chemical Ecology*, 27, 1049 – 1062.
- Samuelson L, Kelly JM (2001). Scaling ozone effects from seedlings to mature trees. *New Phytologist*, 149, 21 – 41.
- Shaver GR, Canadell J, Chapin FS III, Gurevitch J, Harte J, Henry G, Ineson P, Jonasson S, Melillo J, Pitelka L, Rustad L (2000). Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis. *BioScience*, 50, 871 – 882.
- Stevenson DS, Johnson CE, Collins WJ, Derwent RG, Shine KP, Edwards JM (1998). Evolution of tropospheric ozone radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 25, 3819 – 3822.
- Stohl A, Trickl T (1999). A textbook example of long-range transport: simultaneous observation of ozone maxima of stratospheric and North American origin in the free troposphere over Europe. *Journal of Geophysical Research*, 104, 30445 – 30462.
- Streets DG, Carmichael GR, Amann M, Arndt RL (2001). Energy consumption and acid deposition in Northeast Asia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 130, 187.
- Tian HQ (田汉勤) (2002). Dynamics of the terrestrial biosphere in changing global environments: data, models, and validation. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 57, 379 – 388. (in Chinese with English Abstract)
- Tian HQ, Liu JY, Mellio JM, Liu ML, Kicklighter DW, Yan XD, Pan SF (2005). The terrestrial carbon budget in East Asia: human and natural impacts. In: Fu CB, Freney J, Steward J eds. *Changes in the Human-Monsoon System of East Asia in the Context of Global Change*. SCOPE Series, Island Press, Washington, DC.
- Tian HQ, Melillo JM, Kicklighter DW, McGuire AD, Helfrich J (1999). The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical atmospheric CO_2 and climate variability in the United States. *Tellus*, 51B, 414 – 452.
- Tian HQ, Melillo JM, Kicklighter DW, Pan SF, Liu JY, McGuire AD, Moore B III (2003). Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 37, 201 – 217.
- Tingey DT, Rodecap KD, Lee EH, Hogsett WE, Gregg JW (2002). Pod development increases the ozone sensitivity of *Phaseolus vulgaris*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 139, 325 – 341.
- Tjoekler MG, Volin JC, Oleksyn J, Reich PB (1995). Interaction of ozone pollution and light effects on photosynthesis in a forest canopy experiment. *Plant, Cell and Environment*, 18, 895 – 905.
- Tonneijck AEG, Franzaring JC, Brouwer G, Metselaar K, Dueck TA (2004). Does interspecific competition alter effects of early season ozone exposure on plants from wet grasslands? Results of a three-year experiment in open-top chamber. *Environmental Pollution*, 131, 205 – 213.

- Torsethaugen G, Pell EJ, Assmann SM (1999). Ozone inhibits guard cell K^+ channels implicated in stomatal opening. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 96, 13577 – 13582.
- Uddling J, Günthardt-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.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996). *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. EPA, Washington, DC.
- U.S. Environmental Projection Agency (1999). *National Air Pollutant Emission Trends, 1900 – 1998 (Report EPA-454/R-00-002)*. EPA, Research Triangle Park, NC.
- van Oijen M, Dreccer MF, Firsching KH, Schnieders BJ (2004). Simple equations for dynamic models of the effects of CO_2 and O_3 on light-use efficiency and growth of crops. *Ecological Modelling*, 179, 39 – 60.
- Virginia M, Lesser V, Rawlings JO (1990). Ozone effects on agricultural crops: statistical methodologies and estimated does-response relationships. *Crop Science*, 30, 148 – 155.
- Volin JC, Reich PB, Givnish TJ (1998). Elevated carbon dioxide ameliorates the effects of ozone on photosynthesis and pathway or plant functional group. *New Phytologist*, 138, 315 – 325.
- Wager DJ, Baker FA (2003). Effects of ozone, climate, and spruce budworm on Douglas-fir growth in the Wasatch Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 910 – 921.
- Wang CY (王春乙) (1995). A study of the effect of ozone on crop. *Journal of Applied Meteorological Science (应用气象学报)*, 6, 343 – 348. (in Chinese with English abstract)
- Wei C, Skelly JM, Pennypacker SP, Ferdinand JA, Savage JE, Stevenson RE, Davis DD (2004). Influence of light fleck and low light on foliar injury and physiological responses of two hybrid poplar clones to ozone. *Environmental Pollution*, 130, 215 – 227.
- Wild O, Akimoto H (2001). Intercontinental transport of ozone and its precursors in a 3-D global CTM. *Journal of Geophysical Research*, 106, 27729 – 27744.
- Woodbury PB, Laurence JA, Hudler GW (1994). Chronic ozone exposure alters the growth of leaves, stems and roots of hibrid Populus. *Environmental Population*, 85, 103 – 108.
- Wustman BA, Oksanen E, Karnosky DK, Sober J, Isebrands JG, Hendrey GR, Pregitzer KS, Podila GK (2001). Effects of elevated CO_2 and O_3 on aspen clones varying in O_3 sensitivity: can CO_2 ameliorate the harmful effects of O_3 ? *Environmental Pollution*, 115, 473 – 481.

责任编辑：刘丽娟