

近地层 O₃ 污染对陆地生态系统的影响

寇太记¹, 常会庆¹, 张联合¹, 徐晓峰¹, 郭大勇¹,
周文利¹, 朱建国², 苗艳芳¹

1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008

摘要: 随着全球气候变化对生态环境的影响日益增加, 近地层臭氧(O₃)污染的环境生态效应备受人们关注。现有研究表明, 陆地生态系统的温室气体NO_x和CH₄释放、矿质能源消耗和机动车辆尾气排放量的增加将加剧近地层O₃污染。O₃污染通过降低植物叶片气孔导度、光合速率和净同化作用, 改变同化物的分配, 进而抑制植物生长和加速植物老化, 导致作物和林木减产。O₃污染导致植物-土壤系统碳积累和固定降低势必影响未来全球碳动力学和碳预算, 而植物和根系生长受到抑制则不利于土壤养分、水分的吸收进而影响植物-土壤系统养分循环, 但目前报导极少, 尚无法准确判断对全球碳和养分循环的影响, 亟待深入研究。由于环境因素间具有互作效应, 目前模拟研究过多集中O₃与CO₂增加对陆地生态系统的复合效应方面, 而与其它环境因子(如O₃与NO_x、SO₂、水分、温度等)的复合效应研究偏少, 不利于在全球气候变化背景下深入了解与预测O₃污染对陆地生态系统的影响程度与趋势。基于研究现状, 未来应加强: (1) 地表O₃监测网络建设和监测, 结合田间试验和建模加强草地、森林和农田生态系统对O₃污染的响应研究; (2) 长期定位研究, 侧重陆地生态系统对O₃污染连合其它温室气体、温度增加等模拟未来气候情景下的环境响应研究; (3) O₃污染下土壤-植物系统碳循环和固定研究; (4) O₃污染条件下优势植物和农作物在不同时空条件下的土壤-植物系统养分利用研究; 以期为判断和预测全球气候变化背景下陆地生态系统对近地层O₃污染加剧的响应程度与趋势提供数据资料和科学依据。

关键词: 臭氧; 陆地生态系统; 温室气体; 碳循环; 养分; 污染

中图分类号: S161; X171

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0704-07

目前全球气候持续变暖, 气候变化对陆地生态系统带来的影响是多尺度、全方位、多层次的。O₃既是温室气体又是最主要的光化学污染物^[1], 大气中O₃浓度的变化是引起气候变化的主要因子之一。O₃在平流层中具有吸收紫外线保护地球生物的作用, 而在对流层中因其较强的氧化作用而对生物圈具有不利影响^[1]。近些年由于大气中碳氟化合物和氮氧化物含量的增加, O₃浓度在平流层呈降低和对流层中呈增加趋势, 对流层O₃每年以0.5%的速率增长^[2], 近地层呈现出明显的O₃增加趋势。大气中O₃浓度变化引起太阳紫外线辐射强度改变和大气化学混乱, 由于O₃除影响大气及全球气候变化外, 还可能直接危害陆地生物圈, 因此尽管O₃在大气中的含量很少, 但其对地球气候和地表生态系统的影响却非常大。由于矿质能源消耗和机动车辆的增加, 近地层中O₃污染加剧, 更多的地域暴露于高浓度O₃污染中, 这将对敏感的陆地生态系统产生较大影响。1950年以来, 由于O₃影响人体健康和危害植物生长以及对全球变暖的贡献而备受关注, 鉴于O₃增加对植物-土壤系统的影响能更好的理解和预测全球变化对陆地生态系统的影响, 因此科研人员开展了O₃浓度升高对

植物-土壤系统的影响研究。高O₃浓度环境采用类似于CO₂浓度增高技术^[3]的密闭箱^[4]、开顶箱^[5]和自由空间中O₃浓度增加技术(如中科院南京土壤研究所位于扬州江都的中日合作O₃平台)来实现。尽管开展O₃浓度增加对植物系统的影响研究较早、较多, 但过于偏重对植物生长的影响。本文总结了O₃污染对植物-土壤系统的已有研究结果, 旨在推动全球气候变化背景下陆地生态系统对近地层O₃污染加剧的响应研究深入开展。

1 近地层臭氧的来源及其环境效应

近地层是对流层下层接近地表部分的通称。O₃普遍存在于大气中, 约90%集中在平流层, 对流层中O₃主要源于平流层进入^[6]和光化学反应生成部分^[7]。光化学反应产生的O₃主要受人类活动影响, 其中NO_x(如NO₂、NO)、某些有机物(羟基自由基与碳氢化合物如CH₄、萜烯类化合物)和无机物(CO)反应过程中均会产生O₃。碳氢化合物主要源于化石燃料的燃烧、溶媒的使用、化工产物和植物释放的易挥发性有机碳, NO_x主要源于化石燃料和植物体燃烧、闪电、土壤的地球生物化学过程^[8]。近地层O₃危害受NO_x、CO、CH₄和其它碳氢化合物

基金项目: 河南科技大学博士基金项目(09001266); 河南省前沿基础研究项目(082300430230); 国家自然科学基金重点基金项目(40110817)

作者简介: 寇太记(1975年生), 男, 讲师, 博士, 主要从事农田碳氮循环与环境生态、逆境植物营养生理生态方面的研究。E-mail: ktj1975@sohu.com;

tjkou@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-18

的浓度影响^[9]。目前全球温室气体 NO_x 和 CH₄ 排放明显增加^[10], 理论上将导致近地层 O₃ 浓度增加; 而持续增加的矿物能源消耗和机动车辆尾气排放也将加剧近地层 O₃ 污染。

由于 O₃ 既具有吸收紫外线功能, 又具有强氧化性且极不稳定, 故大气中 O₃ 具有正负双重效应。通常近地层 O₃ 具有以下环境效应: (1) 为大气中吸收 <300 nm 波长太阳辐射的主要气体, 降低到达地球表面的紫外线辐射强度, 而平流层 O₃ 的减少将导致到达地表的紫外线射线增加^[11], 对海洋生物生存和陆地生态系统平衡以及人类健康构成严重威胁; (2) 也能吸收地表长波辐射的温室气体, 平流层和对流层中 O₃ 浓度的变化均将影响地球表面的辐射平衡和气候变化。作为一个重要的温室气体和近地层空气污染物, O₃ 和其它主要温室气体如 CO₂ 和 CH₄ 一样, 空气中含量的动态变化对全球气候的影响仍存在争议, 但一旦浓度过高将对人体健康和植被产生直接危害, 并对地球生物自然演替产生深远影响; (3) 直接参与空气中许多物质的转化或生成羟基自由基。例如, SO₂ 和 NO_x 转化为硫和硝酸均有 O₃ 参与。

大气中 O₃ 气体独具以上环境效应, 20 世纪以来近地层 O₃ 浓度因人类活动而发生了改变, O₃ 浓度由 19 世纪中叶的 5~16 μg·kg⁻¹^[12] 增加到 20 世纪末 20~30 μg·kg⁻¹^[11], 目前工业发达地区 O₃ 为 20~60 μg·kg⁻¹, 高度污染地区甚至高达 400 μg·kg⁻¹^[13]。O₃ 具有明显时空变异特征, 在北半球每年春天-夏天达到最大值和一天中日出前 O₃ 浓度最高而下午最低^[6], 北半球较南半球 O₃ 污染明显, 工业发达地区明显。北美和欧州 O₃ 污染发现较早^[14], 中国 O₃ 污染问题广泛存在并在南方经济发达地区污染呈加剧趋势^[10], 鉴于 O₃ 的特殊环境效应, 近地层 O₃ 污染的加剧势必影响到污染区域的植物生态系统演替和农业生产的正常进行。

2 臭氧浓度增加对植物生长发育的影响及其机理

2.1 臭氧增加对植物生长发育的影响

O₃ 污染对自然生态系统植被的危害最早在二战期间洛杉矶盆地的黄松上首先被发现, 危害症状类似萎黄矮化病变、叶片上呈点状病斑和分枝逐渐死亡, 柑桔类果树的伤害尤其严重^[15]。此后森林植物和作物上 O₃ 污染危害于美国和欧洲频繁被发现^[14], 如造成松属物种死亡^[1]。O₃ 除直接危害树木外还间接增加了害虫(如树皮甲虫等)对树木的危害, 导致树木死亡增多进而危害土壤生物并增加了森林火灾的发生, 造成森林系统物种组成发生改变^[16]。由于 O₃ 能造成森林植被衰亡, 因此 O₃ 势必也能影响其它陆地生态系统的植被生长。因 O₃ 危害造成的粮食减产

在 1987 年给美国经济造成了高达 30 亿美元的损失^[17] 和在 1990 年给中国造成了 327.6 亿元的经济损失^[10]。而 O₃ 污染对植物的外形美观和农作物品质、口感等造成的伤害使损失更大, 如致烟叶产生伤害斑点就造成了巨大的经济损失^[14]。

关于 O₃ 对植物生长影响的研究较多^[4-5, 18-27]。室内与田间研究表明, O₃ 对不同植物、器官、组织和细胞具有选择性氧化作用, 当进入细胞的 O₃ 浓度达到一定程度时, 伤害敏感植物的叶片, 降低光合作用、抑制生长^[18, 28], 导致敏感植物生长减缓、生育期缩短、同化作用减弱和积累降低^[18, 27, 29]、生物量和产量下降。O₃ 浓度倍增将导致根系受害, 断根、烂根, 根长缩短, 根重显著降低^[28]。不同植物对 O₃ 的响应有较大差异, 同样浓度 O₃ 对植物的影响和危害, 一般来说, 双子叶植物大于单子叶植物, 农作物大于树木, 蔬菜大于油料作物, 而油料作物又大于粮食作物^[1, 30]; 其中豆科最敏感, O₃ 浓度倍增抑制大豆根系和茎的生长, 固氮能力下降, 叶片伤害使绿叶数和绿叶面积显著下降, 衰老提前^[28]; 三叶草在众多杂草中减产幅度最大^[14]。

近地层 O₃ 污染加剧将对粮食和蔬菜作物的生产造成重要危害。田间试验发现当暴露于 30~50 μg·kg⁻¹ O₃ 浓度中一季后(7 h·d⁻¹) 豆类作物和大麦均显著减产^[19, 27]。菠菜在高浓度 O₃ 下暴露 3 天会失去食用价值和经济价值^[31]。O₃ 浓度为 50 μg·kg⁻¹ 的大气环境对部分粮食作物和大部分蔬菜作物将产生较严重的不利影响^[31]。中国科研人员结合监测和田间试验结果, 利用模型得出, 在水肥充足的麦田中, O₃ 污染导致的冬小麦春后生物量损失量为 11.4%, 穗重损失量约为 16.7%, 产量损失 17.8%^[32]。不同浓度、剂量的 O₃ 和通气时间长短对植物的影响不同, 通常 O₃ 浓度越高危害性越强^[4] 即危害程度同浓度成正相关, 当 O₃ 浓度由 25 μg·kg⁻¹ 升高到 40 μg·kg⁻¹ 和 50 μg·kg⁻¹ 时, 扁豆减产 11% 和 18%、小麦减产 9% 和 16%、花生减产 6% 和 12%、棉花减产 6% 和 10%、大豆减产 5.6% 和 10.4%^[4]。在目前自然环境下, O₃ 浓度为 50 μg·kg⁻¹ 时, 冬小麦可减产 7%~15%, 水稻减产 5%~15%, 大豆减产 10%~12%; O₃ 浓度增加到 100 μg·kg⁻¹ 时, 冬小麦可减产 30% 以上; O₃ 浓度达到 200 μg·kg⁻¹ 时, 冬小麦可减产 60%, 水稻减产 30%。菠菜分别在 50、100 和 200 μg·kg⁻¹ O₃ 浓度下生长 1 个月, 分别减产 50%、70% 和 90%^[31]。然而, O₃ 浓度变化比固定浓度对植物的伤害更大, 对同一植物, 一段时间内 O₃ 的多次短期间断暴露比 O₃ 浓度稳定不变的连续暴露更加有害^[27]。

此外, O₃ 污染会导致高产作物的高产性能消失, 甚至使植物丧失遗传基础^[6]。

总之,近地层 O_3 增加将对植物的生长发育和作物产量产生不利影响, O_3 作为光化学氧化剂的主要成分可抑制植物生长,降低叶片气孔导度、光合速率、叶面积和株高,加速植物老化,改变碳代谢,导致作物和林木减产^[6]。

2.2 臭氧增加影响植物生长发育的机理

O_3 主要通过影响植物的气孔导度和光合作用来影响植物的生长发育,进而减少净同化作用,减缓植物生长并改变同化物的分配^[19]。

学者们对 O_3 影响植物气孔导度的机理进行了深入探讨。气孔是植物体与外界气体交换的“大门”,控制着蒸腾、光合、呼吸等重要生理过程,是 O_3 进入植物体的主要通道。气孔通常在光热条件下打开,在干旱、水分胁迫和高 CO_2 浓度条件下关闭^[8]。这暗示着 O_3 污染将使气孔导度降低,类似 CO_2 增加所致结果^[3],田间观测证实了该猜测^[20,21,23]。然而,Hassan等通过扫描电镜观察发现高浓度 O_3 能引发埃及萝卜表皮细胞部分破裂,从而导致气孔开放率增大而气孔导度增加^[20]; O_3 也可直接抑制保卫细胞的 K^+ 通道,降低 K^+ 通道调控气孔开张^[18];叶片可通过维持相对稳定的胞间 CO_2 浓度而降低气孔导度,同时气孔导度的变化与叶肉细胞内其它过程的变化相偶联^[33]。因此,高浓度 O_3 可能通过改变植物气孔的可塑性^[21]来改变气孔导度大小,而气孔导度的降低将降低水分利用率,导致生物量大幅减产^[1,6],将对植物生长发育产生深远影响。

O_3 通过张开的气孔进入植物体,进而影响植物组织的各个层次。当进入细胞的 O_3 浓度积累超过一定阈值时,过高的活性氧积累就会破坏其防御系统,改变与膜有关的酸碱度和 K^+ 、 Ca^{2+} 浓度,破坏膜蛋白质的巯基,使膜透性增加,细胞液和细胞质外渗,出现失水、萎蔫、干枯、叶片褐斑等可见症状;进入细胞的 O_3 影响植物体内活性氧代谢系统的平衡,即增加植物体内的活性氧,如超氧自由基、氢氧自由基、单态氧、过氧化氢等,这些自由基十分活跃,能对生物体膜系统产生危害^[31]。此外, O_3 对气孔的作用将影响植物生产力,同时也将影响植物对其它环境胁迫如干旱等的响应。

O_3 对植物光合作用的影响备受关注,因光合作用的好坏与产量密切相关,研究相对较多。 O_3 的强氧化性导致高浓度 O_3 环境中植物的光合速率下降,已得到大量实验证实^[23,27]。植物光合作用降低的生理原因主要是 O_3 导致叶绿素和可溶性蛋白分解,叶片衰老加快^[25]、叶绿体结构发生改变^[25]、活性氧清除酶和与C固定有关酶的活性降低^[26]、光合产物向外运输受阻而导致的反馈抑制^[34]。

O_3 增加影响植物同化物分配,产量大小在很大

程度上取决于同化物的分配状况。Meyer等^[27]利用 $110\ \mu g\cdot kg^{-1}$ O_3 熏蒸小麦,发现短时间处理导致叶片细胞膜系统受损、光合产物输出受阻,而长期 O_3 污染导致小麦叶片的光合速率、光化学效率、叶绿素含量和蔗糖含量均显著降低。白月明等^[35]用高浓度 O_3 熏蒸拔节前的冬小麦,发现小麦春季分蘖数量增加,然而随着 O_3 胁迫时间的延长大部分新生分蘖逐渐枯死。姚芳芳等^[32]认为,高浓度 O_3 环境中冬小麦在成熟期前几天总生物量缓慢下降,主要是高 O_3 浓度暴露加速了叶片黄化进程,叶片衰败过早,其光合作用累积的同化物不足以维持呼吸消耗,导致生物量下降出现时间提前。 O_3 改变光合产物分配的可能原因为:一是植物叶片作为碳源的能力降低;研究发现 O_3 环境下,植物叶片厚度降低,栅栏组织和海绵组织比率增大,过氧化物酶体和线粒体的数量增加^[36],叶绿素含量下降和衰老加快^[25];二是叶片作为碳库增加了对同化物的需求;叶片细胞中与抗氧化胁迫有关的次生代谢物质如绿原酸、黄酮等的含量增加^[37]和光合产物向外运输受阻而滞留增多。由此可见,环境中 O_3 浓度升高可引起植物光合产物的分配发生巨大改变。从作物产量方面来看, O_3 胁迫对同化物的分配效应比其对光合作用及生物量积累的负影响更为重要^[38]。

3 臭氧浓度增加对物质循环的影响

20世纪以来,温室气体排放导致空气组成发生变化直接影响到植被、土壤及全球碳循环^[30]。 CO_2 增加的气肥效应^[39]和氮沉降的氮肥效应^[40]均对全球陆地生态系统产生正效应,而90%以上的负效应主要来自于近地层 O_3 污染^[17]。 O_3 污染能抑制植物生长,降低光合速率和株高,加速植物老化,改变碳代谢,导致作物和林木减产^[6], O_3 影响碳在根系、茎和叶间的分配^[41],这势必影响到碳循环。Felzer等^[30]将美国主要树种和农作物响应 O_3 污染的经验公式引入陆地生态系统模型来研究臭氧污染对净初级生产力(NPP)和碳固定,发现20世纪90年代前后 O_3 污染造成美国植被NPP年均减产2.6%~6.8%,中西部地区农作物在 O_3 污染最严重时减产甚至超过13%,阔叶树年均NPP减产3%~16%;自上世纪50年代以来,因 O_3 污染年均碳固定降低18~38 Tg C, NPP减少不低于 $9 g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ ^[30];自1950年以来因 O_3 污染增加林地开发成农田和农田耕作过程中碳分别多损失5.7%和27.0%,且高 O_3 浓度环境中碳固定极少^[30]。因此 O_3 污染导致植物-土壤系统碳积累和固定的降低势必影响未来全球碳动力学和碳预算。

养分吸收利用与植物的蒸腾、光合、呼吸等重要生理过程密切相关。 O_3 污染改变了叶片的气孔导度、降低了光合速率和抑制了植物生长、降低了生

物量与产量必将减少植物对养分的需求。O₃显著降低植株同化物向根系的分配^[42]而同化物向根系分配的改变将导致根系与整株植物功能关系的改变。O₃污染通常使植物根系缩短、根重减轻、根系生长受到抑制^[28,29]不利于土壤养分与水分的吸收。综上知O₃污染加剧将影响植物-土壤系统养分循环,然而目前研究偏少,有待深入研究。

4 全球变化与臭氧增加对陆地生态系统的影响

全球变暖约有5%~10%源于空气中近地层温室气体O₃的增加,大气中O₃浓度由10~15 μg·kg⁻¹达到30~40 μg·kg⁻¹,将导致气温增加0.9 °C^[7]。大气中温室气体浓度的增加影响全球气候变化,而环境条件变化将明显改变O₃对植物的影响,同时O₃污染加剧也改变着植物对环境胁迫的响应^[15,20]。许多自然条件下O₃伤害的症状,在实验条件下很难复制伤害症状,暗示着O₃对植物的伤害受其它环境胁迫因子(如CO₂和SO₂)的作用。由于O₃主要通过气孔进入植物体内,故目前研究主要集中在能显著调节气孔导度的环境因子,如空气中持续增加的温室气体CO₂、气温和土壤水分状况对O₃危害程度的影响,关于O₃与高NO_x和SO₂对植物的复合效应几乎无报道。

关于CO₂与O₃的复合效应研究较多,Hertstein等综述了复合效应对不同作物和蔬菜产量的影响^[2],Donnelly等研究了复合效应对春小麦、马铃薯等的叶绿素含量、光合作用和产量的影响^[29],Rudorff研究了复合效应对小麦和玉米同化物分配、产量形成及收获指数的影响^[43]。由于CO₂浓度倍增虽缩短了根长,但根粗度增加,侧生根、毛根发达,增加了根系总表面积,有利于吸收水分和养分;而O₃浓度增加导致敏感植物生长降低、生育期缩短、同化作用减弱和积累降低、成熟期提前。复合效应研究大多表明CO₂浓度增加明显缓解了O₃浓度增加对叶片和根系的伤害,绿叶数、绿叶面积有所增加、根重和根长无明显下降^[28]。CO₂可缓解因O₃浓度增加对植物同化CO₂的抑制^[44]。通常CO₂浓度增加使豆科植物根瘤数和根瘤重增加,提高根系固氮能力^[28],而O₃浓度增加抑制根瘤菌的繁殖和生长^[44],但CO₂、O₃持续倍增和逐渐增加复合效应使根重和根长无明显下降,持续倍增增加了大豆根瘤数和根瘤重,其最大增加达25%和12%,逐渐倍增最大分别增加68%和33%,明显提高了固氮能力^[28]。CO₂、O₃复合效应使籽粒粗蛋白含量与单独CO₂影响趋势相同,粗脂肪含量与单独CO₂和单独O₃影响效果相反^[28]。然而CO₂、O₃复合效应比单纯O₃污染也可能更大的危害植物生长。植物短时暴露于500 mg·kg⁻¹ CO₂和300 μg·kg⁻¹ O₃中比单独暴露于O₃中使烟草叶片受害面积

增加67%^[45];而王春乙等发现CO₂、O₃持续倍增浓度过高时间过长,将导致大豆根瘤数和根瘤重降低24%,高于单独O₃危害^[28]。此外,CO₂缓解O₃危害程度也受二者浓度、改变方式影响。CO₂、O₃浓度逐渐倍增前期O₃浓度较小时,叶片无明显伤害症状,当浓度过高时,O₃的刺激作用和O₃剂量累积作用使伤害进程加快加重^[28];而持续倍增当污染时间过长,将会造成生长后期伤害加重,绿叶数减少、绿叶面积显著下降,根瘤数和根瘤重最大可降24%^[28]。Bell^[15]认为环境因素与O₃间互相修正着自身对植物的影响,而O₃对环境胁迫的这种修正效应比直接危害对生态系统更有积极作用。因此,今后研究O₃/CO₂复合效应时,应在较接近真实的大气CO₂与O₃环境中研究不同生态系统主要植物种类长时间暴露下的结果,来评价激增的CO₂温室气体对O₃污染危害的效应趋势。

目前全球变暖毫无争议,因此研究温度与O₃间的复合效应显得极有必要。通常气温在30°C以下叶片受O₃伤害敏感性程度随温度升高而增加,超过30°C则恰好相反,但植物种类、O₃浓度和污染时间可能改变该规律,然而该方面研究极少。Dunning等^[46]发现当气温达到32 °C时O₃造成菜豆叶片受伤害的程度高于烟叶,而在低温时则相反。由此可知温度与O₃复合效应对植物影响的复杂性,在温度改变和温差明显的地区,研究温度增加与O₃污染的复合效应具有现实意义,该方面研究亟待加强。

全球变暖已使世界上干旱区域增加,O₃与干旱复合效应研究得以开展。理论上干旱致土壤水分亏缺将降低植物的气孔导度,减少O₃吸收量,从而降低O₃对植物的伤害^[47];该理论被田间干旱与O₃对植物的复合效应研究证实^[36]。Heggestad等^[48]在13个试验点研究6种不同作物在干旱条件下O₃对作物危害时发现,不同作物对干旱与O₃的复合效应响应不同,当O₃浓度在80 μg·kg⁻¹以上时干旱促进了O₃对大豆作物的减产效应,而在低浓度时则恰好相反。Khan和Soja^[49]研究表明,水分充足条件下小麦对O₃的吸收量增加,而产量下降幅度减小;小麦受到干旱胁迫后,对O₃的吸收量减少,但产量降低的幅度依然增加;只有当植株处于严重干旱环境下,产量才不再因O₃胁迫而降低。此外,在水分亏缺环境下,O₃通过降低茎的水分含量而提高植株对水分亏缺的敏感性,如O₃胁迫加强了水分亏缺对大豆的效应^[49]。总之,水分状况影响植物对O₃污染的响应程度。

5 存在问题与研究展望

当前O₃污染已成为我国及全球的环境问题,目前经济和城市化的快速发展,光化学事件频繁,使近地层O₃污染问题愈加突出。作为重要的温室气体,

O₃污染的生态环境效应是目前环境问题之一。现有监测调查与模拟研究均表明O₃污染影响植物-土壤系统。在模拟O₃污染试验技术日趋成熟的背景下,研究植物-土壤系统对O₃污染的响应是估算和评价O₃污染对陆地生态系统影响的前提与基础,而养分吸收利用的变异将影响地球化学物质循环,植物光合产物的数量与分配直接影响全球的碳收支和碳循环,因此研究O₃污染对陆地生态系统的影响成为气候变化研究中不可或缺部分。到目前为止,O₃污染对植物-土壤系统的影响研究已取得了一些重要成果;但仅为较少的几个点数据资料且都是短期的监测和试验结果,缺乏长期定位监测与动态资料;过多偏重于农作物和植物生长及其机理研究,较少直接或间接对物质循环(C和养分)影响研究;因环境因素间具有互作效应,目前过多集中于O₃与CO₂对陆地生态系统的复合效应研究,而有关O₃污染与其它环境因子(如O₃与NO_x、SO₂、水分、温度等)的复合效应研究偏少。总之,目前所获数据对预测和理解我国与全球O₃污染对植物-土壤系统的影响远远不够,有关O₃污染对陆地生态系统的影响尚待深入研究。

基于现有研究成果,未来应侧重以下工作:

(1)加强地面O₃监测网络建设和监测,结合田间试验研究和建模加强O₃污染对草地、森林和农田生态系统的影响研究。全球近地层O₃污染存在时空差异,国外O₃监测体系较健全,而国内覆盖全国的O₃监测网络尚未建立和地面监测数据缺乏,这些制约了我国乃至全球的近地层O₃污染生态环境效应研究。目前国内外针对自然和半自然生态系统研究多集中于农作物,而林木和草地植物研究偏少,现有数据远不能满足准确评价O₃污染对生态系统影响的需要。今后应开展更大范围的多点、定点、多植物种类尤其各地区优势植物种类的研究,加强O₃污染对草地、森林系统和农作物品质的影响研究。借鉴目前温室气体研究(如CO₂)成熟的研究手段和已有的O₃污染研究成果,将模型研究和O₃污染模拟试验研究相结合,以便利用现有试验数据和点数据来预测评价O₃对陆地生态系统的影响,更好的估算评价O₃污染的生态环境效应。

(2)加强植物-土壤系统响应O₃污染与其它温室气体、温度增加等模拟未来气候情景下的环境因子的复合效应研究,增设研究点和侧重长期定位研究。空气中O₃浓度变化为全球环境变化的重要组成,O₃污染加剧对陆地生态系统的影响不应被孤立,环境因子的变异能改变O₃污染对植物的影响,同时O₃也能改变植物对环境胁迫(包括生物和非生物因素)的响应程度,目前由于气候变化导致的植物病虫害和病原菌的频繁危害一定程度上应归咎于诸

多因素对生态系统综合影响的结果。鉴于诸多环境因子的作用互相关联、较难分割,而目前已有的O₃与其它环境因子(如大气CO₂浓度、水分有效性、温度、NO_x和SO₂等)复合效应研究仍偏少、不够系统和深入、研究结果不一致,较难判断全球变化背景下O₃污染的影响程度与趋势。因此,今后应加强O₃污染与主要的生物和非生物因子对生态环境的复合效应研究。

(3)加强O₃污染对土壤-植物系统碳循环和固定研究。目前大多数研究表明O₃对植物生长和生物量的形成具有负效应,势必影响植物-土壤系统的碳固定与分配,进而影响全球碳循环和碳收支。目前关于O₃污染对生态系统碳循环影响的数据缺乏,如地上部和地下部生物碳的分配变异、有机物料的C:N比、土壤呼吸及各地下来源(如根系呼吸、微生物对土壤原、新有机物质分解情况,以及诸来源对土壤呼吸的贡献)的贡献。为了准确评价O₃污染对土壤碳库的影响,应定量研究植物碳的分配和区分O₃污染环境土壤呼吸各地下来源。O₃污染对植物-土壤系统的影响,或多或少受生物和非生物因子作用,今后应加强环境因子对碳循环和碳固定的影响研究。

(4)加强O₃污染条件下优势植物和农作物在不同时空条件下的土壤-植物系统养分利用研究。O₃影响植物生长和水分利用必将影响植物对土壤养分吸收。由于O₃污染对不同种类植物影响不同,而不同植物对养分的吸收存在差异,且植物生育期、生理代谢活动强度、种类与品种间的差异、生长季节、气温与土壤温度、湿度等均不同程度影响着植物对养分的吸收利用,致使研究更加复杂化,应该综合诸因素加以研究。然当前关于O₃污染下植物对养分吸收利用研究颇少,无法据此判断对全球养分循环的影响,亟待深入研究。

参考文献:

- [1] ASHMORE M R, BELL J N B. The role of ozone in global change[J]. *Annals of Botany*, 1991, 67: 39-48.
- [2] HERTSTEIN U, GRTINHAGE L, JAGER H J. Assessment of past, present and future impacts of ozone and carbon dioxide on crop yields[J]. *Atmosphere Environment*, 1995, 29(16): 2031-2039.
- [3] 寇太记, 苗艳芳, 庞静, 等. 农田土壤呼吸对大气CO₂浓度升高的响应[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1667-1673.
KOU Taiji, MIAO Yanfang, PANG Jing, et al. Response of soil respiration in cropland to elevated atmospheric CO₂ concentration[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1667-1673.
- [4] HECK W W, TAYLOR O C, ADAMS R, et al. Assessment of crop loss from ozone[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1982, 32: 353-361.
- [5] 许宏, 杨景成, 陈圣宾, 等. 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1205-1213.

- XU Hong, YANG Jingcheng, CHEN Shengbin, et al. Alternative title review of plant responses to ozone pollution[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(6): 1205-1213.
- [6] OLTMANS S J, LEVY II H. Surface ozone measurements from a global network[J]. *Atmosphere Environment*, 1994, 28(1): 9-24.
- [7] HOV O. Ozone in the troposphere: high level pollution[J]. *Ambio*, 1984, 13: 73-79.
- [8] MAUZERALL D L, WANG X. Protecting agricultural crops from the effects of tropospheric ozone exposure: reconciling science and standard setting in the United States, Europe, and Asia[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2001, 26: 237-268.
- [9] LIU S C, TRAINER M, FEHSENFELD F C, et al. Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D4): 4191-4207.
- [10] 刘峰, 朱永官, 王效科. 我国地面臭氧污染及其生态环境效应[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1674-1679.
- LIU Feng, ZHU Yonggan, WANG Xiaoke. Surface ozone pollution and its eco-environmental impacts in China[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1674-1679.
- [11] FREDERICK J E, SNELL H E, HAYWOOD E K. Solar ultraviolet radiation at the earth's surface [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1989, 50: 443-450.
- [12] VOLZ A, KLEY D. Evaluation of the monsoir series of ozone measurements made in the nineteenth century[J]. *Nature*, 1988, 332: 240-242.
- [13] LEFOHN A S, OLTMANS S J, DANN T, et al. Present-day variability of background ozone in the lower troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D9): 9945-9958.
- [14] ASHMORE M R. Effects of ozone on vegetation in the United Kingdom [C]// GRENNFELT P. The evaluation and assessment of the effects of photochemical oxidants on human health, agricultural crops, forestry, materials and visibility. Swedish Environmental Research Institute, Goteborg, 1984: 92-104.
- [15] BELL J N B. Ozone in the environment[J]. *The Biologist*, 1978, 25: 279-287.
- [16] GUDERIAN R, TINGEY D T, RABE R. Effects of photochemical oxidants on plants[C]//GUDERIAN R. Air pollution by photochemical oxidants. Springer-Verlag, Berlin. 1985: 129-333.
- [17] ADAMS R M, GLYER J D, MCCARL B A. The NCLAN economic assessment: approach, findings and implications[C]// HECK W W. Assessment of crop loss from air pollutants. London: Elsevier Applied Science, 1988: 473-552.
- [18] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中O₃浓度变化对水稻影响的试验研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 822-826.
- GUO Jianping, WANG Chunyi, WEN Min, et al. The experimental study impact of atmospheric O₃ variation on rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 822-826.
- [19] 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.
- [20] HASSAN I A, ASHMORE M R, BELL J N B. Effects of O₃ on the stomatal behaviour of Egyptian varieties of radish (*Raphanus sativus* L. cv. Baladey) and turnip (*Brassica rapa* L. cv. Sultani)[J]. *New Phytologist*, 1994, 128: 243-249.
- [21] ELAGOZ V, HAN S S, MANNING W J. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140: 395.
- [22] FARAGE P K, LONG S P. Ozone inhibition of photosynthesis-a mechanistic analysis following short-term and long-term exposure in 3 contrasting species[J]. *Photosynthesis Research*, 1992, 34: 244-254.
- [23] REILING K, DAVISON A. Effects of ozone on stomatal conductance and photosynthesis in populations of *Plantago major* L[J]. *New Phytologist*, 1995, 129: 587-594.
- [24] KIVIMAENPAA M, SELLDEN G, SUTINEN S. Ozone-induced changes in the chloroplast structure of conifer needles, and their use in ozone diagnostics[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 137: 466-475.
- [25] GELANG J, PLEIJEL H, SILD E, et al. Rate and duration of grain filling in relation to flag leaf senescence and grain yield in spring wheat (*Triticum aestivum*) exposed to different concentrations of ozone[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110: 366-375.
- [26] REICHENAUER T, GOODMAN L. Stable free radicals in ozone-damaged wheat leaves[J]. *Free Radical Research*, 2001, 35: 93-101.
- [27] MEYER U, KOLLNER B, WILLENBRINK J, et al. Effects of different ozone exposure regimes on photosynthesis, assimilates and thousand grain weight in spring wheat[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 78: 49-55.
- [28] 王春乙, 白月明, 温民, 等. CO₂和O₃浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响[J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 6-10.
- WANG Chunyi, BAI Yueming, WEN Min, et al. Effects of double CO₂ and O₃ on growth and yields in Soybean[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 6-10.
- [29] DONNELLY A, CRAIGON J, BLACK C R, et al. Elevated CO₂ increases biomass and tuber yield in potato even at high O₃ level[J]. *New Phytologist*, 2001, 149: 265-274.
- [30] FELZER B, KICKLIGHTER D, MELILLO J, et al. Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model[J]. *Tellus*, 2004, 56B: 230-248.
- [31] 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: 26-123.
- WANG Chunyi, BAI Yueming. Study on the Change of Ozone and Aerosols Concentration Influencing on Crops[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 26-123.
- [32] 姚芳芳, 王效科, 欧阳志云, 等. 臭氧胁迫下冬小麦物质生产与分配的数值模拟[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2586-2593.
- YAO Fengfeng, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al. A simulation model of ozone stress on photosynthetic production and its allocation of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2586-2593.
- [33] NOORMETS A, SOBER A, PELL E J, et al. Stomatal and nonstomatal limitation to photosynthesis in two trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) clones exposed to elevated CO₂ and/or O₃[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24: 327-336.
- [34] GRANTZ D, FARRAR J. Acute exposure to ozone inhibits rapid carbon translocation from source leaves of Pima cotton[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50: 1253-1262.

- [35] 白月明, 郭建平, 刘玲, 等. 臭氧对水稻叶片伤害、光合作用及产量的影响[J]. 气象, 2001, 27(6): 17-22.
BAI Yueming, GUO Jianping, LIU Ling, et al. Influence of O₃ on the leaf injury photosynthesis and yield of rice[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(6): 17-22.
- [36] OKSANEN E, HAIKIO E, SOBER J, et al. Ozone-induced H₂O₂ accumulation in field-grown aspen and birch is linked to foliar ultrastructure and peroxisomal activity[J]. New Phytologist, 2004, 161: 791-799.
- [37] PELTONEN P A, VAPAAVUORI E, JULKUNEN-TIITTO R. Accumulation of phenolic compounds in birch leaves is changed by elevated carbon dioxide and ozone[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1305-1324.
- [38] MCKEE I F, LONG S P. Plant growth regulators control ozone damage to wheat yield[J]. New Phytologist, 2001, 152: 41-51.
- [39] CAO M, WOODWARD F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change[J]. Nature, 1998, 393: 249-252.
- [40] TOWNSEND A R, BRASWELL B H, HOLLAND E A, et al. Spatial and temporal patterns of carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen[J]. Ecological Applications, 1996, 6: 806-814.
- [41] MARTIN M J, HOST G E, LENZ K E, et al. Simulating the growth response of aspen to elevated ozone: a mechanistic thesis to a complex canopy architecture[J]. Environmental Pollution, 2001, 115: 425-436.
- [42] MCCRADY J K, ANDERSEN C P. The effect of ozone on below-ground carbon allocation in wheat[J]. Environmental Pollution, 2000, 107: 465-472.
- [43] RUDORFF B F T, MULCHI C L, LEE E H, et al. Effects of enhanced O₃ and CO₂ enrichment on plant characteristics in wheat and corn[J]. Environmental Pollution, 1996, 94(1): 53-60.
- [44] REID C D, FISCUS L E. Effects of elevated [CO₂] and / or ozone on limitations to CO₂ assimilation in soybean (Glycine max)[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(322): 885-895.
- [45] HECK W W, DUNNING J A. The effects of ozone on tobacco and pinto bean as conditioned by several ecological factors[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1967, 17: 112-114.
- [46] DUNNING A, HECK W W. Response of bean and tobacco to ozone: effect of light intensity, temperature, and relative humidity[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1977, 27: 882-886.
- [47] KING D A. Modeling the impact of ozone x drought interactions on regional crop yields[J]. Environmental Pollution, 1988, 53: 351-364.
- [48] HEGGESTAD H E, GISH T J, LEE E H, et al. Interaction of soil/ moisture stress and ambient ozone on growth and yield of soybean[J]. Phytopathology, 1985, 75: 472-477.
- [49] KHAN S, SOJA G. Yield responses of wheat to ozone exposure as modified by brought-in induced differences in ozone uptake[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 147: 299-315.

Effect of near-surface O₃ pollution on terrestrial ecosystems

Kou Taiji¹, Chang Huiqing¹, Zhang Lianhe¹, Xu Xiaofeng¹, Zhou Wenli¹,
Guo Dayong¹, Zhu Jianguo², Miao Yanfang¹

1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: With global climate change and its increasing impacts on eco-environments, on which the effects of near-surface ozone (O₃) pollution has drawn more and more attention from people. The current results showed that, O₃ concentration has increased because of the rising greenhouse gases of NO_x and CH₄ fluxes in terrestrial ecosystem, fossil energy consumption and vehicle exhaust emissions. Under the higher O₃ condition, the restrained plant growth and accelerated aging led to the decreasing biomass of crop and tree, due to the decline of stoma conductance, photosynthesis rate and net assimilation of plants, and distributive alteration of assimilation. O₃ pollution possibly reduced carbon accumulation and sequestration in plant-soil system that would influence the future global carbon dynamics and carbon budget. The restrained plant and root growth was disadvantageous to the absorption of nutrients and moisture that possibly affect the nutrient cycling. However, fewer studies restricted the understanding of O₃ pollution impacting on the global carbon and nutrient cycling, which need more studies. Currently most studies focused on the interaction between increasing O₃ and CO₂ on terrestrial ecosystems, the other way round the interaction between increasing O₃ and other factors, e.g. NO_x, SO₂, moisture and temperature, etc, has fewer studies, which went against the all-around understanding of effect of O₃ on terrestrial ecosystem under the context of climate change. The problem above could be solved through strengthening to 1) measure surface O₃ and establish the measurement network, and study the feedbacks of grassland, forest and cropland ecosystems to O₃ pollution through combining field experiment with establishment of model; 2) study the interaction between rising O₃ and other environmental factors (including other greenhouse gases, temperature, etc) on terrestrial ecosystem with the long-term experiments; 3) investigate the effect of O₃ pollution on carbon cycling and sequestration in the plant-soil system; and 4) research the nutrient cycling of dominant plants and main crops in the plant-soil system under O₃ pollution. That will boost the studies of adding surface O₃ pollution on terrestrial ecosystem under the global climate change context.

Key words: ozone; terrestrial ecosystem; greenhouse gas; carbon cycling; nutrient; pollution