

# 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响

陈 展 ,王效科\* ,段晓男 ,冯兆忠 ,吴庆标

(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** 模拟研究了臭氧浓度升高(日变化熏蒸方式)对小麦根系和土壤微生物活性的影响。实验分 3 个处理,即空气对照(CF, 臭氧浓度约  $4 \sim 10 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ )、臭氧浓度 I(O I 8h 平均  $75 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ )、臭氧浓度 II(O II 8h 平均  $110 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ )。结果表明,臭氧浓度升高后小麦茎叶、根系生物量以及根冠比都会降低,根系活力更是显著低于空气对照,可见臭氧对植物地下部分的影响是显著的。与对照相比,低浓度  $\text{O}_3$  ( $75 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ )对根际土和非根际土的微生物生物量碳没有什么影响,而较高的  $\text{O}_3$  浓度( $110 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$ )会造成根际土微生物生物量碳降低 9.3%,非根际土微生物生物量碳降低 5.3%,说明高浓度臭氧抑制土壤微生物的量。臭氧浓度升高后小麦根际土壤微生物利用单一碳源的能力(AWCD)都明显低于对照,低浓度的臭氧对土壤微生物的多样性指数和丰富度指数都没有显著影响,而浓度较高的臭氧则显著降低了根际土微生物的多样性指数,而对丰富度指数没有显著影响,且也没有发现  $\text{O}_3$  浓度升高对非根际土微生物的影响。可见,臭氧主要影响根际土壤微生物而对非根际土壤微生物影响不大,且只有在高浓度的臭氧处理下才会显著降低根际土壤微生物的多样性指数。

**关键词** 臭氧;根系;土壤微生物;微生物碳;多样性指数;丰富度指数;BIOLOG

文章编号:1000-0933(2007)05-1803-06 中图分类号:Q938,Q948 文献标识码:A

## Ozone effects on wheat root and soil microbial biomass and diversity

CHEN Zhan ,WANG Xiao-Ke\* ,DUAN Xiao-Nan ,FENG Zhao-Zhong ,WU Qing-Biao

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology ,Research Center for Eco-Environmental Sciences ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100085 ,China  
*Acta Ecologica Sinica* 2007 27 (5) 1803 ~ 1808.

**Abstract** :Ozone ( $\text{O}_3$ ) is considered to be a major air pollutant that affects the yields of several sensitive crop species while reducing carbon acquisition by plants and the subsequent allocation of carbon to roots. Ozone concentrations have dramatically increased in some parts of China. Despite the emphasis on research in this area ,however ,little has been done to study below-ground component responses when shoots are exposed to ozone ,even though evidence suggests that ozone can affect roots more than shoots. Since ozone can not penetrate soil ,effects on the below-ground system are the indirect results of altered plant processes. Most current research focuses on constant ozone concentrations that are not in accordance with ambient ozone daily changes. This study is therefore initiated to explore the dynamic Ozone exposure effects on potted wheat roots and soil microorganisms ,which can better demonstrate the below-ground response to natural dynamic ambient ozone. Three treatments were performed in this study : (1) control regime :very low ozone with a daily average of  $4 - 10 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$  (CF) ; (2) ozone exposure regime :I (OI) ,low ozone with an 8h average of  $75 \text{ nl} \cdot \text{L}^{-1}$  ;and (3) ozone exposure regime :

基金项目 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB410803) ;国家自然科学基金面上基金资助项目 (30670387)

收稿日期 2006-08-25 ;修订日期 2007-02-10

作者简介 陈展 (1980 ~ ) ,女 ,湖南人 ,博士生 ,主要从事污染生态学和微生物生态学研究. E-mail :zhenchen323@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :wangxk@rcees.ac.cn

**Foundation item** The project was financially supported by State Key Basic Research and Development Plan of China (NO. 2002CB410803) ; The National Natural Science Foundation of China (No. 30670387)

**Received date** 2006-08-25 ; **Accepted date** 2007-02-10

**Biography** CHEN Zhan , Ph. D. candidate , mainly engaged in pollution ecology and microbial ecology. E-mail :zhenchen323@163.com

II (OII) , high ozone with an 8h mean  $110\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$ . Wheat seedlings were grown either in a water-hydroponic system for root analysis or in soil for soil microbial analysis and exposed to ozone for 75days in a series of replicated experiments. In both of the two environments with ozone exposure , the root biomass and root/shoot ratio are reduced by 18% and 7.7% , respectively , compared to the control treatment. Effects on root activity were also examined as this parameter is an important indicator of wheat's ability to absorb nutrients. The results show that root activity is significantly reduced by 58% for the low ozone regime and by 90.8% for the high ozone regime. We also studied the effects of ozone on rhizosphere and nonrhizosphere soil microorganisms. It is demonstrated that low ozone (OI) concentrations can appreciably increase microbial carbon , while high ozone (OII) concentrations cause rhizosphere and nonrhizosphere soil microbial biomass carbon to decrease by 9.3% and 5.3% , respectively , compared to the control treatment. Microbial diversity was studied using sole-carbon-source-utilization (BIOLOG). In the BIOLOG assays , the average well color development (AWCD) and the richness and diversity indices indicate differences in microbial activity and diversity. The AWCD and both of the indices for rhizosphere soil microorganisms are higher than those in nonrhizosphere soil both in the control and ozone treatments. Ozone largely reduces the AWCD of rhizosphere soil microorganisms , while it has little influence on the nonrhizosphere soil microbial AWCD. The richness and diversity indices of both the rhizosphere and nonrhizosphere soil microorganisms in ozone exposure regime I have no difference compared to the control regime. While ozone exposure regime II remarkably decreases the diversity index in rhizosphere soil microorganisms , it does not have such an effect in nonrhizosphere soil. Although rhizosphere soil microorganisms can be considered more susceptible to ozone than nonrhizosphere soil microorganisms , this may actually be due to the indirect effects of ozone via the reduction of carbon allocation to roots. As a result , root exudation is decreased , forming the carbon and energy sources of rhizosphere soil microorganisms.

**Key Words** : ozone ; root ; soil microorganism ; microbial biomass ; microbial diversity ; BIOLOG

臭氧是一种在地球对流层自然产生的光化学氧化剂 ,其背景浓度认为在  $25 \sim 50 \text{ nl}\cdot\text{L}^{-1}$  之间。近几十年来 ,化石燃料的大量使用导致近地层大气臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 浓度以每年 0.5% ~ 2.5% 的速度增长 , $\text{O}_3$  污染事件频发、持续时间增长、影响范围和破坏程度不断增大<sup>[1,2]</sup>。

以往的研究主要是臭氧对植物地上部分 (如光合作用、产量等) 的影响 ,而对作物地下部分的影响较少<sup>[3]</sup>。事实上 ,臭氧对地下生态系统的影响研究是非常重要的<sup>[3]</sup> ,现有的研究已表明臭氧对植物地下部分的影响出现的比对地上部分的影响早 ,生物量降低也比较明显 ,而且臭氧对地下过程有一个积累效应<sup>[4]</sup> ;更重要的是生态系统地下部分直接关系着植物的水分利用和养分吸收及物质循环。很多学者在研究臭氧对植物的影响时都考虑到了对根系生物量的影响 ,而只有少数学者研究了臭氧对植物根系分泌物及土壤微生物的影响<sup>[5~7]</sup> ,且这些多是森林树木的研究而关于作物上的研究很少。

现有的研究大多是在恒定浓度下进行臭氧熏蒸 ,这并不能完全真实的反应实际情况 ,实际上大气环境中的臭氧会有一个明显的日变化 ,从清晨开始臭氧浓度会随光照等条件有所升高 ,14:00 ~ 15:00 ,有时是傍晚臭氧浓度达到一天的最高值 ,之后臭氧浓度又会缓慢回落。为了真实反映大气中  $\text{O}_3$  浓度变化 ,本研究采用具有日变化的熏蒸方式 ,室内模拟研究臭氧浓度升高对盆栽小麦的根系及土壤微生物活性的影响 ,为科学评价未来大气  $\text{O}_3$  浓度增加对作物地下部分的不利影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

该实验所用的熏气装置采用专门定做的研究大气污染对植物影响的柜式气室<sup>[8]</sup> ,臭氧由臭氧发生器产生 ,通过质量流量计控制臭氧发生器的进气量来控制气室内的臭氧浓度。并采用臭氧分析仪 (ML9810B , MONITOR) 对气室内的臭氧浓度进行实时监测记录。

实验共有 3 个气室 ,分别为 3 个臭氧处理 ,即对照 ,CF (直接向气室内通空气 ,其臭氧浓度约  $4 \sim 10$

nl·L<sup>-1</sup>) ;臭氧浓度 I (O I ) ,其配气方案为 9 00 臭氧浓度约 40 nl·L<sup>-1</sup> ,每过半小时臭氧浓度升高 10 nl·L<sup>-1</sup> ,直到 12 30 达到一天的最大值为 110 nl·L<sup>-1</sup>持续 1h ,随后臭氧浓度与上午呈对称式下降 ,到 17 00 回落到 40 nl·L<sup>-1</sup> ,其 8h 平均为 75 nl·L<sup>-1</sup> ;臭氧浓度 II (O II ) ,其配气方案与 O I 大致相同 ,起始浓度也为 40 nl·L<sup>-1</sup> ,每半小时升高 20 nl·L<sup>-1</sup> ,最大值为 170 nl·L<sup>-1</sup> ,其 8h 平均为 110 nl·L<sup>-1</sup>。

小麦分别采用两种栽培方式 ,即水培和土培。水培小麦用于根系生物量、根系活力的测定 ,而土培小麦主要用于土壤微生物的研究。水培小麦在有机玻璃罐 (容积为 500ml )中进行培养 ,采用的营养液是 Hoagland 和 Arnon 溶液 ,定期每 5d 更换 1 次营养液 ,每个臭氧处理共 6 盆 ,每盆 2 株。土培实验采用的土是从浙江嘉兴野外实验基地采回的田间土 (pH5.36 ,TN 0.2% ,TC 1.9% ) 过 2mm 筛。移栽小麦前在土壤中添加一定的肥料 0.428g/kg 尿素、0.323g/kg CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O、0.247g/kg K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ,采用高 30cm 的 PVC 桶培养小麦 ,每个处理共 8 盆 ,每盆 2 株 ,且在每个 PVC 桶的中部埋有尼龙网以将植物根系阻隔在网内 ,从而区分根际和非根际土壤。

2005 年 12 月 8 日小麦种子萌芽 ,12 日移栽 2006 年 1 月 4 日移入气室内开始熏气 3 月 21 日停止熏气 ,每天熏蒸 8h ,共熏气 75d。

1.2 根系指标的测定

停止熏气后收苗测定小麦各部分生物量 (烘干法) ,根系活力采用 TTC 法<sup>[9]</sup>。

1.3 土壤微生物测定

收获时将植物根系小心从盆内取出 ,将尼龙网附近 5mm 的土壤作为根际土壤 ,5mm 以外的 5cm 内的土壤作为非根际土壤 ,分别进行取样分析微生物量和微生物的功能多样性。微生物量用氯仿熏蒸法测定。微生物多样性采用 BIOLOG 进行分析。即将 10g 土壤加 90ml 无菌的 0.85% 的 NaCl 溶液在摇床上振荡 30min ,然后将土壤样品稀释至 10<sup>-3</sup> ,再从中取 125μl 该悬浮液接种到 BIOLOG 专用的革兰氏阴性板的每一个孔中 ,最后将接种好的板放置 25℃ 的恒温培养箱中暗室培养 ,每隔 8h 在波长为 590nm 的 BIOLOG 读数器上读数 ,培养时间共为 224h。

孔的平均颜色变化率 (AWCD) 计算方法如下 :

$$AWCD = \sum (C - R) / n$$
 (1)

式中 ,C 为每个有培养基孔的光密度值 ,R 为对照孔的光密度值 ,n 为培养基孔数 ,GN 板 n 值为 95。培养基的丰富度 (richness) 指数指被利用的碳源的总数目 ,多样性 (diversity) 指数采用 Shannon-Weinner 指数 (H') :

$$H' = \sum (Pi \times \log Pi)$$
 (2)

式中 ,Pi = (C - R) / ∑ (C - R)

本研究运用 96h 的数据来比较 BIOLOG 板中微生物代谢多样性。

本研究数据采用 SPSS11.5 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水培小麦生物量及根系活力

由表 1 发现 ,O<sub>3</sub>熏蒸过的小麦无论是根长、株高还是生物量与对照相比都呈下降趋势 ,且臭氧对株高和生物量的影响是显著的。两个臭氧处理下小麦的生物量差不多 ,地上部分总生物量比对照降低 18% 而根系生物量则比对照下降了 25% ,并且都达到显著差异。而根冠比虽有所降低但不显著。且臭氧处理显著降低了小麦的根系活力 ,分别比对照降低了 58% 和 90.8% ,且两个臭氧处理之间根系活力差异明显。

2.2 小麦土壤微生物的变化

2.2.1 微生物生物量碳

无论是根际土还是非根际土壤的微生物生物量碳在低浓度臭氧处理下都与对照相差不多 ,而臭氧浓度较高的处理下 ,与对照处理相比 ,根际土壤和非根际土壤微生物生物量碳分别降低了 9.3% 和 5.3% (表 2) ,根际土壤微生物生物量碳的降低幅度要大于非根际土壤 ,这说明臭氧对根际土壤微生物量的影响要大于非根际

土壤。

表1 各处理下水培小麦的根长、株高、生物量及根冠比、根系活力的变化

Table 1 The root length,height ,biomass and root activity of wheat in water-hydroponic system under different ozone treatments						
处理 Treatments	根长 (cm ) Root length	株高 (cm ) Plant height	根系生物量 (g/plant ) Root biomass	地上总生物量 (g/plant ) Shoot biomass	根冠比 Root : shoot	根系活力 (mg·g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ) Root activity
CF	50.8 ±2.43a	55.6 ±1.82a	0.078 ±0.0015a	0.61 ±0.025a	0.13 ±0.005a	168 ±1.52a
O I	49.4 ±2.18a	51.3 ±0.62b	0.058 ±0.0035b	0.50 ±0.031b	0.12 ±0.020a	69 ±0.35b
O II	50.0 ±2.25a	51.8 ±1.60b	0.059 ±0.0035b	0.50 ±0.031b	0.12 ±0.020a	15 ±0.35b

同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著 Different letter within the column stands for significant difference (*P* < 0.05 )

2.2.2 微生物代谢功能多样性

从图 1 可以看出 ,不同臭氧浓度下根际土和非根际土其 AWCD 值都随时间的延长而升高。AWCD 可反映土壤微生物利用碳源的整体能力及微生物活性 ,对照处理下的小麦根际土 AWCD 值最高 ,臭氧处理下小麦根际土的 AWCD 值明显低于对照 ,说明臭氧升高降低了小麦根际土微生物利用碳源的能力及其活性 ,两个臭氧处理间小麦根际土的 AWCD 值没有明显差别。对于非根际土而言 ,AWCD 值随着臭氧浓度的升高有降低的趋势 ,但变化不大。

较低的臭氧浓度对根际土和非根际土微生物的丰富度指数和多样性指数影响不大 ,而高浓度臭氧则显著降低了根际土壤微生物的丰富度指数和多样性指数 ,分别比对照降低 23% 和 12% (表 3 ) ,非根际土的丰富度指数和多样性指数分别比对照下降 20% 和 6% ,但没有达到显著水平。

3 讨论

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官 ,根的生长情况和活力水平直接影响作物的营养状况及产量水平。关于臭氧对植物生物量的影响研究很多 ,普遍认为臭氧使植物的光合作用受到抑制从而减少了地上生物量的积累 ,同时也降低了有机物质向根系的分配 ,因此受臭氧污染的植物根系生物量会减少 [7 , 10 ~ 12] 。目前臭氧对作物根冠比的影响有不同的研究结果 ,如有的研究表明没有影响的 [6 , 12] ,也有结果表明臭氧使植物 (如萝卜 ) 的根冠比降低 [10 , 13] 。Cooley & Manning [14] 研究了臭氧对紫花苜蓿根的影响要比对茎组织的影响更大 ,本研究的结果也表明臭氧处理后小麦地上生物量降低 18% 而根系生物量降低了 25% ,这说明臭氧对小麦根的影响要比对茎叶组织的影响要大。本研究利用水培方式考察了臭氧胁迫对小麦根系活力的影响 ,结果表明不论是低浓度还是高浓度臭氧处理后小麦根系活力都急剧下降 ,显著低于对照。根冠比以及根系活力的降低会影响植物的水分和营养物质的供应从而加剧臭氧的危害 ,这一点也更加说明研究臭氧对植物地下组织的影响的重要性。

表2 各处理下小麦根际土壤和非根际土壤的微生物生物量碳

Table 2 The microbial carbon of rhizosphere and non-rhizosphere soil under different ozone treatments

处理 Treatments	微生物生物量碳 mg·g <sup>-1</sup> Microbial biomass carbon	
	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Non-rhizosphere soil
CF	4.28 ±0.03a	4.23 ±0.011a
O I	4.34 ±0.06a	4.37 ±0.018a
O II	3.88 ±0.37a	4.21 ±0.079a

同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著 Different letter within the column stands for significant difference (*P* < 0.05 )

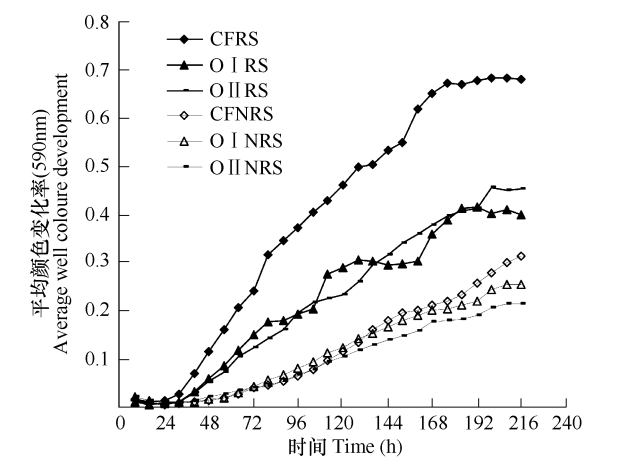


图1 各处理下小麦根际土壤和非根际土壤微生物的 BIOLOG 碳源平均颜色变化率

Fig. 1 Average well colour development (AWCD) in rhizosphere and nonrhizosphere soil under different ozone treatments  
RS 根际土 Rhizosphere soil ;NRS 非根际土 Non- rhizosphere soil ,CF 对照 Control ,O I 臭氧浓度 I Ozone exposure regime I ,O II 臭氧浓度 II Ozone exposure regime II

表3 各处理下小麦根际土壤和非根际土壤的微生物丰富度和多样性指数

Table 3 Richness and diversity of rhizosphere and non-rhizosphere soil for different ozone treatments

处理 Treatments	根际土 Rhizosphere soil		非根际土 Non-rhizosphere soil	
	丰富度指数 Richness Index	多样性指数 Diversity Index	丰富度指数 Richness Index	多样性指数 Diversity Index
CF	88 ± 3. 8a	1. 56 ± 0. 07a	69 ± 5. 5a	1. 21 ± 0. 13a
O I	90 ± 2. 1a	1. 56 ± 0. 06a	65 ± 7. 8a	1. 30 ± 0. 08a
O II	68 ± 14a	1. 37 ± 0. 03b	55 ± 1. 0a	1. 13 ± 0. 17a

同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著 Different letter within the column stands for significant difference ( $P < 0.05$ )

植物通过根系向周围环境中释放有机分泌物,这些分泌物是土壤微生物的重要碳源,因此从理论上讲植物根系的一些变化会引起土壤微生物尤其是根际微生物发生变化。Larson 研究发现当平均臭氧浓度为 54.5  $\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$  时,暴露于其中的温带森林的土壤微生物生物量碳要比环境臭氧浓度下的土壤微生物生物量碳高,但两者之间差异不显著<sup>[5]</sup>。本研究发现暴露于日平均浓度为 75  $\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$  的臭氧中 75d 后,小麦根际土和非根际土微生物生物量碳都比对照略微增加,而日平均浓度为 110  $\text{nl}\cdot\text{L}^{-1}$  臭氧处理下小麦根际和非根际土壤微生物生物量碳都比对照要低,但与对照差异不显著,这说明了土壤微生物对  $\text{O}_3$  的反应不是很敏感。

BIOLOG 代谢多样性类型与微生物群落组成相关<sup>[6]</sup>使得其对功能微生物群落变化较为敏感<sup>[7]</sup>。本研究试图用 BIOLOG 功能多样性来反映土壤微生物对  $\text{O}_3$  的反应,其中平均颜色变化率 (AWCD) 反映了土壤微生物利用碳源的整体能力及微生物活性;丰富度指数和多样性指数反映的是微生物利用碳源的数量及其功能多样性(代谢多样性)。本试验结果表明对照处理下的小麦根际土壤微生物 AWCD 值要远远高于臭氧处理,但臭氧处理间没有显著差异;臭氧处理下的非根际土壤微生物 AWCD 值与对照相比无太大差别,但都低于根际土。同时也发现臭氧处理虽然降低了小麦土壤微生物的丰富度指数但没有显著差异,但高浓度的臭氧处理显著降低了小麦根际土壤微生物的多样性指数,且对非根际土的多样性指数没有显著影响。可见在臭氧浓度较高浓度下土壤微生物的活性和代谢多样性会受到一定的影响,但主要是根际土壤微生物的影响。

本研究表明受臭氧影响的主要是根际微生物,可能是由于臭氧引起植物气孔关闭限制了  $\text{CO}_2$  进入植物叶内,降低光合速率从而进一步影响光合产物对根系的分配,主要表现为减少根系分泌物的量以及改变根系分泌物的种类<sup>[5]</sup>。McCrady<sup>[8]</sup>认为臭氧胁迫下可溶性根系分泌物的改变可能影响根际微生物的活性,从而潜在的改变根际的生态和营养动态,同时 Edwards<sup>[5]</sup>研究表明,臭氧浓度升高会降低植物根系有机物的分泌,抑制了对土壤微生物无机有机养分供应导致微生物代谢和土壤呼吸降低。根系分泌物是根际土壤微生物主要的碳源和能源,因此可以认为臭氧对土壤微生物的影响不是直接的,是通过影响植物根系而间接影响微生物的。当然这一点还有待更多的实验数据验证。

References :

[1] Thompson C R ,Kats G ,Pippen E L *et al.* Effect of photochemical air pollution on two varieties of alfalfa. *Environmental Science Technology* ,1992 , 10 :1237 — 1241.

[2] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment* 2004 ,38 :3431 — 3442.

[3] Hofstra G ,Ali A ,Wukasch R T *et al.* The rapid inhibition of root respiration after exposure of bean (*Phaseolus vulgaris* L. ) plants to ozone. *Atmospheric Environment* ,1981 ,15 :483 — 487.

[4] Kasurinen A ,Gonzales P K ,Riikonen J *et al.* Soil  $\text{CO}_2$  efflux of two silver birch clones exposed to elevated  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_3$  levels during three growing seasons. *Global Change Biology* 2004 ,10 :1654 — 1665.

[5] McCool P M ,Menge J A. Influence of ozone on carbon partitioning in tomato :potential role of carbon flow in regulation of the mycorrhizal symbiosis under conditions of stress. *New Phytologist* ,1983 ,94 :241 — 247.

[6] Edwards N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings. *New Phytologist* ,1991 ,118 :315 — 321.

[7] Scagel C F ,Andersen C P. Seasonal changes in root and soil respiration of ozone-exposed ponderosa pine (*Pinus ponderosa* ) grown in different substrates. *New Phytologist* ,1997 ,136 :627 — 643.

[8] Wang S G ,Feng Z Z ,Wang X K ,Feng Z W. Effect of Elevated Atmospheric O<sub>3</sub> on Arbuscular Mycorrhizal (AM) and its Function. *Environmental Science* 2006 27 (9) :1872 – 1877.

[9] Chen C L. Measurement of plant root activity (TTC ). In :Li H S. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments. Beijing :Higher Education Press 2003. 119 – 120.

[10] Andersen C P. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to Ozone. *New Phytologist* 2003 157 :213 – 228.

[11] Lin X G ,Yin R ,Zhang H Y ,et al. Changes of soil microbiological properties caused by land use changing from rice-wheat rotation to vegetable cultivation. *Environmental Geochemistry and Health* 2004 26 :119 – 128.

[12] Coleman M D ,Dickson R E ,Isebrands J G ,et al. Root growth and physiology of potted and field-grown trembling aspen exposed to tropospheric ozone. *Tree Physiol* 1996 16 :145 – 152.

[13] Tingey D T ,Heck W W ,Reinert R A. Effect of low concentrations of ozone and sulfur dioxide on foliage growth and yield of radish. *Journal of American Society for Horticultural Science* 1971 96 :369 – 371.

[14] Cooley D R ,Manning W J. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants :a review. *Environmental Pollution* 1987 47 :95 – 113.

[15] Larson J L ,Zak D R ,Sinsabaugh R L. Extracellular enzyme activity beneath temperate trees growing under elevated carbon dioxide and ozone. *Soil Science Society of America Journal* 2002 66 (6) :1848 – 1856.

[16] Haack S K ,Garchow H M ,Klug J ,et al. Analysis of factors affecting the accuracy ,reproducibility ,and interpretation of microbial community carbon source utilization patterns. *Applied and Environmental Microbiology* 1995 61 :1458 – 1468.

[17] Rogers B F ,Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a topo sequence in Pineland soils. *Soil Biology & Biochemistry* , 2001 33 :1389 – 1401.

[18] McCrady J K ,Andersen C P. The effect of ozone on below-ground carbon allocation in wheat. *Environmental Pollution* 2000 107 :465 – 472.

参考文献：

[8] 王曙光 ,冯兆忠 ,王效科 ,冯宗炜. 大气臭氧浓度升高对丛枝菌根 (AM)及其功能的影响. *环境科学* 2006 27 (9) :1872 ~ 1877.

[9] 陈翠莲. 植物根系活力的测定 (TTC 法). 见 :李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京 :高等教育出版社 2003. 119 ~ 120.