

臭氧胁迫对大豆根系形态和活性氧代谢的影响

赵天宏,曹艳红,王 岩,戴 震,刘轶欧,刘 波

(沈阳农业大学 农学院,辽宁 沈阳 110866)

摘 要:利用开顶式气室(OTCs)对大豆进行臭氧(O_3)胁迫试验,研究了高浓度 O_3 对大豆根系体积、根瘤数、根瘤干重、根干重等根系形态指标以及膜脂过氧化程度、活性氧、抗氧化酶活性等活性氧代谢指标的影响。结果表明:在高浓度 O_3 处理下,根系体积、根及根瘤干重、根瘤数降低,根系MDA含量、相对电导率显著上升,膜脂过氧化程度加剧;超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率和 H_2O_2 含量增加; O_3 胁迫处理的SOD活性在分枝期高于CK处理,其余各时期均低于CK处理;CAT活性除在开花期低于CK处理外,其它时期均高于CK处理;POD活性呈先升后降的趋势,各个时期均高于CK处理。高浓度 O_3 导致大豆抗氧化系统的氧化损伤,对大豆表现为伤害效应,从而抑制了大豆根系的正常生长发育。

关键词: O_3 浓度升高;大豆根系;根系形态;活性氧代谢

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2012)01-0052-06

Effects of Ozone Stress on Root Morphology and Reactive Oxygen Species Metabolism in Soybean Roots

ZHAO Tian-hong, CAO Yan-hong, WANG Yan, DAI Zhen, LIU Yi-ou, LIU Bo

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

Abstract: In recent years, the elevated ozone has become a serious problem which has some significant effects on plant. The response of morphological characteristics and reactive oxygen species metabolism in roots of soybean to elevated ozone concentrations was investigated in this paper. Soybean grown in open top chambers (OTCs) exposed to ambient air ($O_3 = 40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$) and elevated ozone ($O_3 = 110 \pm 10 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$). Root volume, nodule number, root and nodule dry weight, relative electrical conductivity and malonaldehyde (MDA), hydrogen peroxide (H_2O_2) and superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) production rate, activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) were determined. The results showed that the root volume and root dry weight per plant decreased, then the nodule number and nodule dry weight per plant also declined with ozone concentration rising. Compared to CK, elevated ozone treatment significantly increased MDA and H_2O_2 content ($P < 0.05$), relative electrical conductivity and $O_2^{\cdot-}$ production rate ($P < 0.05$). SOD activity was higher than CK at branching stage but lower than CK at the other stages under elevated ozone stress. Activity of CAT was lower than CK at flowering stage but higher at the other stages. Activity of POD increased in the early period and decreased in the late period, which was higher than CK at all growing stages. It can be concluded that the ozone stress has negative effects on soybean roots on account of oxidative damage, which restrains the growth and development of soybean roots.

Key words: Ozone stress; Soybean roots; Root morphology; Reactive oxygen species metabolism

对流层(距离地面约15 km范围内)大气中的臭氧是一种主要气体污染物,高浓度臭氧对地球上的生物具有危害作用。近年来,由于工农业对化石燃料、含氮化肥等的不合理使用,致使大气中的氮氧化物和有机挥发物(VOCs)等剧增,我国每年排放的氮氧化物量约占世界总排放量的16.4%,且以0.5%~2.5%的年增长率增加^[1],预计到2100年大气 O_3 浓度将增加至 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]。在世界的很多地区, O_3 被认为是影响植物生产力的最重要的

空气污染物^[3]。

臭氧从植物微观结构到生理功能、生长发育及生态系统的层次上对植物产生一系列有害的影响^[4]。由于植物地上部位直接暴露于大气中,目前关于臭氧对植物的研究主要以地上部位为研究对象^[5-11],而臭氧对植物根系影响的研究鲜有报道。植物根系是植物吸收水分和矿质元素的主要器官,有研究表明,臭氧对植物地下部位的影响较地上部位表现更早,生物量降低也比较明显^[12]。因此,研

收稿日期:2011-10-28

基金项目:国家自然科学基金(30970448,30500069);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(2011)。

第一作者简介:赵天宏(1972-),男,博士,副教授,主要从事植物生理生态研究工作。E-mail: zth1999@163.com。

究臭氧对植物根系的影响为全面了解臭氧浓度升高对植物影响提供依据。

该试验以大豆根系为研究对象,研究在高浓度 O_3 下大豆根系形态及膜脂过氧化程度、活性氧及抗氧化酶活性的变化,对研究全球气候变化对植物生长发育的影响及植物的响应机理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2010 年 5~9 月在中国科学院沈阳野外农田生态系统生态站进行。以大豆栽培品种铁丰 29 为试材,利用开顶式气室(OTCs)对大豆进行 O_3 胁迫处理。 O_3 浓度由臭氧发生器(BGY-Q8,中国)、臭氧传感器(S-900,新西兰),以及数据分析与自动控制充气系统(LT/ACR-2002,德国)控制。

设 CK 和 O_3 2 个处理, O_3 浓度分别约为 $40\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(110 \pm 10)\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$,每个处理 3 次重复。采用盆栽试验,于 5 月 20 日播种,每个气室内放置 25 盆,每盆播种 10 粒大豆种子,出苗后保留 5 株生长一致的幼苗(即每个气室约 125 株),大豆出苗 20 d 后(6 月 20 日),每天 8:00~17:00 进行 9 h O_3 胁迫处理,分别于大豆分枝期(7 月 6 日)、开花期(8 月 1 日)、结荚期(8 月 23 日)和鼓粒期(9 月 7 日)取样,大豆成熟时停止 O_3 胁迫。每次随机取样 3 盆(15 株),依次用自来水、蒸馏水小心冲洗大豆根系,再用滤纸吸干水分后进行相关指标测定。在大豆整个生育时期,保证水肥条件一致,及时防治病虫害,保持大豆正常生长发育。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系形态指标 根及根瘤生物量:将根系洗净置入牛皮纸袋(将每株大豆根系全部根瘤置牛皮纸袋),均放在 105°C 的烘箱中杀青 30 min 后, 85°C 烘至恒重,冷却后用万分之一电子天平称取根系(及根瘤)干重;根瘤数:计数法统计单株平均根瘤数;根系体积:采用排水法测定。

1.2.2 活性氧代谢 相对外渗电导率:采用外渗电导法,用 DDS-11A 型电导率仪测定,确定膜透性变化,以相对电导率(%)表示^[13];丙二醛(MDA)含量:采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定^[14]。超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率:采用羟胺法测定^[15];过氧化氢(H_2O_2)含量:采用分光光度计法测定^[14]。

超氧化物歧化酶(SOD)活性:采用 NBT 光氧化还原法,以抑制 NBT 光氧化还原 50% 的酶量为 1 个酶活性单位^[14];过氧化氢酶(CAT)活性:采用紫外

吸收法,以每分钟 OD_{240} 减少 0.01 为 1 个酶活力单位^[15];过氧化物酶(POD)活性:采用愈创木酚法,将每分钟 OD_{470} 增加 0.01 定义为 1 个酶活力单位^[15]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 13.0 及 Microsoft Excel 2003 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度升高对大豆根系形态的影响

2.1.1 根系体积 根系体积能直观反映根系形态的变化。图 1A 表明,在整个生育期内, O_3 处理和 CK 处理下大豆根系体积均表现为先升高后降低的趋势,在结荚期达到最大值。经过高浓度臭氧熏蒸的大豆根系体积在各个生育时期均小于 CK 处理,降幅依次为 29.60%、29.75%、25.87% 和 22.20%,在大豆开花期 O_3 处理显著降低了根系体积($P < 0.05$),而在其余 3 个时期与 CK 相比差异不显著($P > 0.05$)。可见, O_3 浓度升高抑制了大豆根系的生长,不利于根系对水分和养分的吸收。

2.1.2 根系干重 由图 1B 看出,在整个生育期,大豆单株根系干重呈现先升高后降低的趋势。至开花期时,干重达到最高峰值。 O_3 胁迫下,根系干重在各时期均低于 CK 处理,结荚期极显著($P < 0.01$)低于 CK 处理,降幅为 30.45%,开花期和鼓粒期降幅分别为 20.24% 和 33.90%,达到了显著差异水平($P < 0.05$)。可见, O_3 胁迫抑制了大豆根系干物质的合成。

2.1.3 根瘤数 由图 1C 可知,随着生育时期的延长, O_3 处理和 CK 处理的根瘤数量从分枝期开始均大量增加,在大豆开花期达到最大值,然后逐渐下降,生育后期变化不显著。经过高浓度臭氧处理的大豆植株,其根瘤数量在各个时期均低于 CK 处理,降幅范围为 11.43%~23.00%,大豆分枝期和结荚期,显著低于 CK 处理($P < 0.05$),降幅分别为 22.58% 和 11.43%。可见, O_3 浓度升高可抑制大豆根系根瘤的形成,不利于大豆的生长。

2.1.4 根瘤干重 如图 1D 所示,除分枝期外,其余各时期 O_3 处理的大豆根系根瘤干重均极显著低于 CK 处理($P < 0.01$),且随生育时期的进行,均表现为先升高后降低的趋势,与根瘤数的变化基本相一致。CK 处理的根瘤干重在大豆开花期达到最大值,比同一时期的 O_3 处理高 77.91%,而 O_3 处理下的单株根瘤干重却在大豆结荚期达到最大值。

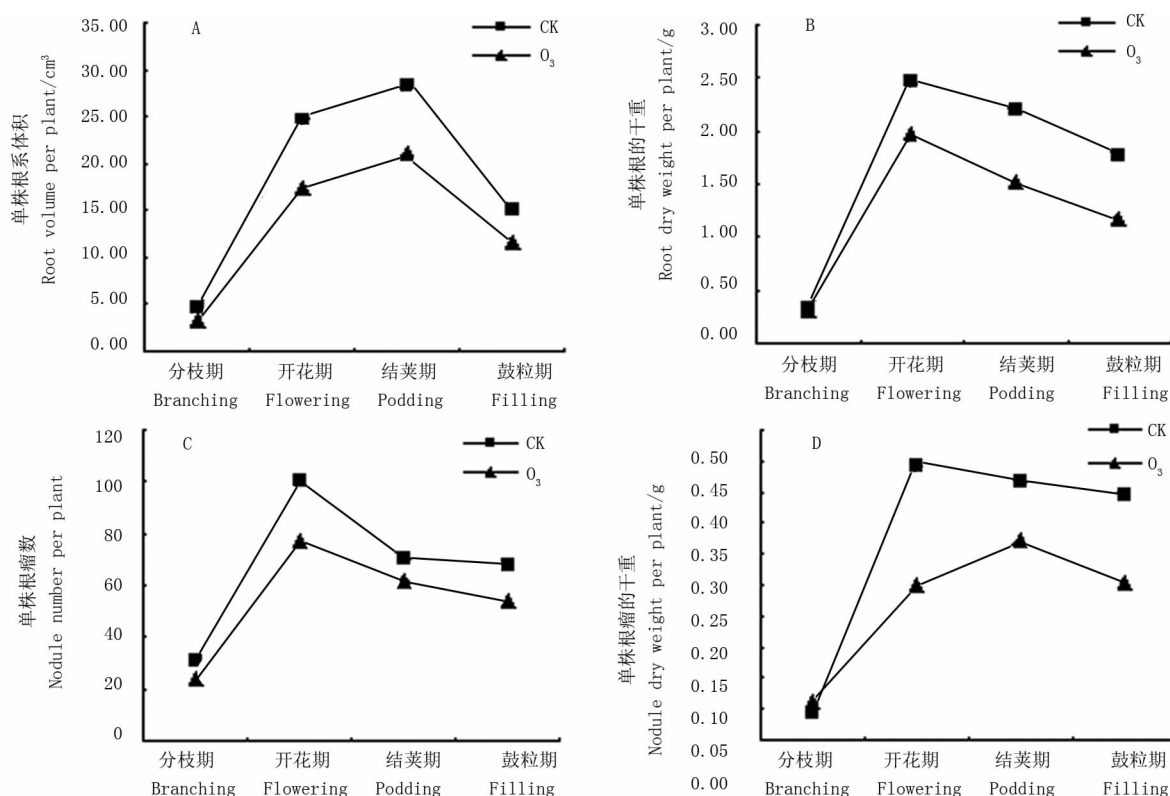
图 1 O₃胁迫下大豆根系形态指标的变化

Fig. 1 Variation of roots morphological index in soybean under ozone stress

2.2 臭氧浓度升高对大豆根系活性氧代谢的影响

2.2.1 膜脂过氧化程度 如图 2A 所示,在整个生育期间,各处理 MDA 含量呈明显的上升趋势,且在各个时期,均表现为 O₃ 处理高于 CK 处理,增幅依次为 29.28%、43.71%、50.65% 和 50.32%。与 CK 处理相比,除了在开花期 O₃ 胁迫下 MDA 含量差异不显著 ($P > 0.05$) 外,其余 3 个时期均达显著差异 ($P < 0.05$) 水平,在分枝期和鼓粒期表现为极显著差异 ($P < 0.01$)。说明 O₃ 浓度升高可使大豆根系膜脂过氧化程度增加,且随生育期的延长,程度加重。

臭氧浓度升高下根系相对电导率的变化趋势 (图 2B),与 MDA 含量变化相一致,随着生育期的延长,相对电导率呈现依次升高趋势,且在各个生育时期内 O₃ 胁迫下大豆根系相对电导率均大于 CK 处理。在分枝期 O₃ 处理下根系的相对电导率增幅为 65.92%,差异达到极显著 ($P < 0.01$) 水平;结荚期相对电导率增幅为 39.99%,达到了显著差异 ($P < 0.05$) 水平;在开花期和鼓粒期,差异均不显著 ($P > 0.05$)。可见, O₃ 胁迫可导致细胞质膜结构破坏,细胞内电解质外渗,进而导致外渗电导率增加。

2.2.2 活性氧 植物体内产生的 O₂⁻ 等主要活性氧可引发或加强膜脂过氧化作用,最终导致细胞膜系统损伤,严重可致植物细胞死亡。如图 3A 所示,整个生育时期内,大豆根系 O₂⁻ 产生速率呈现明显的上升

趋势,即随生育期延长, O₂⁻ 产生速率增加,膜脂过氧化加强。且在各个时期, O₃ 处理的 O₂⁻ 产生速率均高于 CK 处理。除了开花期差异不显著 ($P > 0.05$) 外,大豆分枝期和结荚期分别比 CK 处理增加了 33.94% 和 39.27%,差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$);鼓粒期大豆根系 O₂⁻ 产生速率增幅为 60.60%,差异达显著水平 ($P < 0.05$)。上述结果表明, O₃ 浓度升高可使大豆根系细胞 O₂⁻ 产生速率加快,这个结果与根系 MDA 含量的变化相一致。

O₃ 胁迫也造成大豆根系另一重要的活性氧 H₂O₂ 含量的增加,如图 3B 所示,在整个生育期内,其变化趋势与 O₂⁻ 产生速率趋势相一致。各个时期内, O₃ 胁迫使大豆根系 H₂O₂ 含量均增加,并在分枝期和鼓粒期差异显著 ($P < 0.05$),与 CK 相比分别增加 23.08% 和 32.80%。这一结果更加证明了 O₃ 胁迫加重了根系细胞膜脂化。

2.2.3 抗氧化酶活性 由图 4A 可知,在整个生育期中, SOD 活性呈现波动性变化,除在分枝期 O₃ 处理的根系 SOD 活性略微高于 CK 处理 ($P > 0.05$),其余 3 个时期均低于 CK 处理,且在大豆鼓粒期达到差异极显著水平 ($P < 0.01$)。表明短期的 O₃ 胁迫可刺激 SOD 活性升高,随着胁迫时间延长,会对植物细胞带来伤害作用,降低 SOD 活性。

CAT 可以催化 H₂O₂ 生成 H₂O,但 CAT 清除

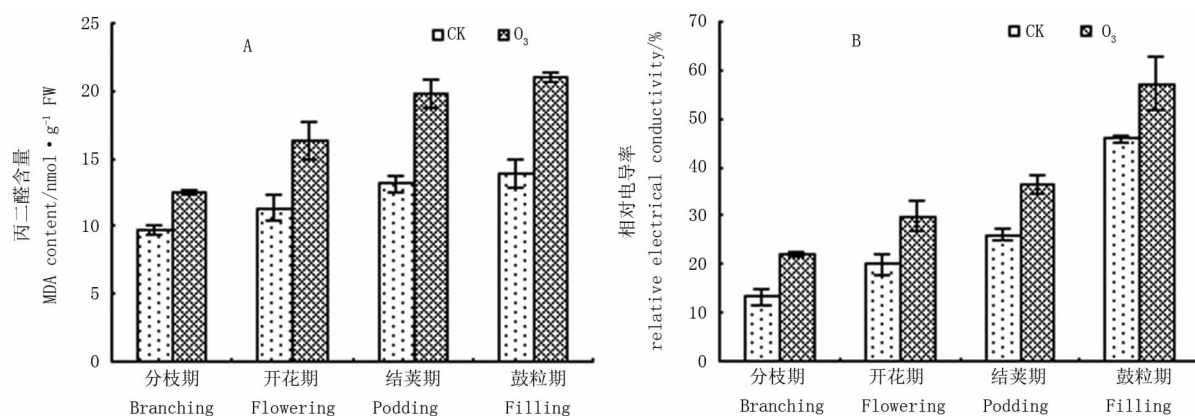
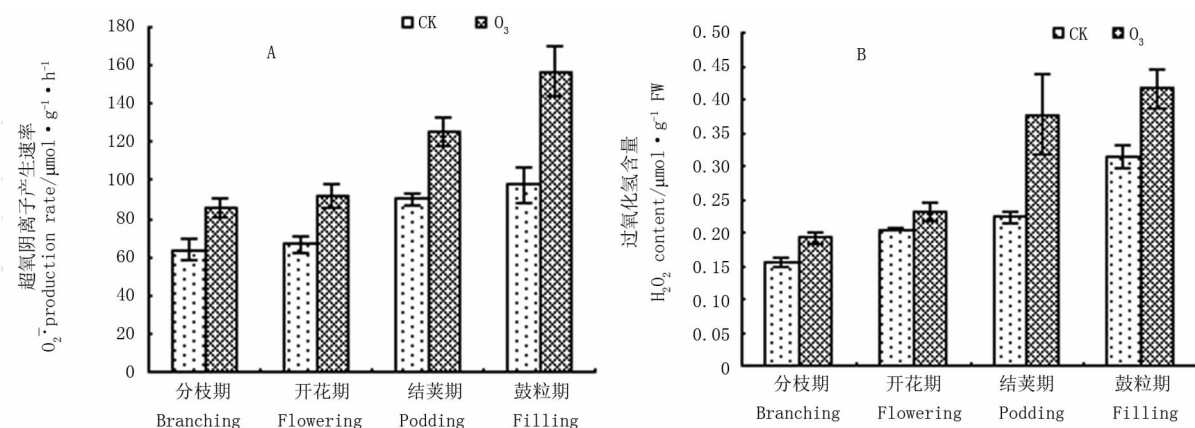
图2 O₃胁迫下大豆根系MDA含量和相对电导率的变化

Fig. 2 Variation of MDA content and relative electrical conductivity in soybean roots under ozone stress

图3 O₃胁迫下大豆根系O₂⁻产生速率和H₂O₂含量的变化Fig. 3 Variation of O₂⁻ production rate and H₂O₂ content in soybean roots under ozone stress

H₂O₂的效率非常低。O₃胁迫下(图4B),除了在开花期CAT活性稍小于CK处理($P > 0.05$),降幅为8.97%,其它3个时期均高于CK处理,在结荚期差异达显著水平($P < 0.05$)。可见,O₃胁迫可使CAT活性增加,对其做出保护性反应。除在结荚期CAT活性异常增加,整个生育期内,随O₃胁迫时间延长,呈下降趋势。

POD主要催化H₂O₂和有机过氧化物,O₃胁迫对POD活性的影响如图4C所示,在整个生育期内,呈先升高后降低的趋势。O₃处理下POD活性在结荚期达到最大值,显著高于CK处理($P < 0.05$),增加了90.5%。各时期内,POD活性均高于CK处理,增幅为11.4%~90.5%。结果表明,高浓度O₃可提高POD活性。

3 结论与讨论

根系形态决定植物获取水分和养分的能力。该试验中,O₃胁迫显著降低了大豆根系体积和根干重,抑制了根系生长,不利于对水分、养分的吸收。根瘤数减少,干重下降,进一步证明了O₃胁迫抑制

根系正常生长。

O₃胁迫提高了大豆根系中H₂O₂和MDA含量,外渗电导率和O₂⁻产生速率亦上升,表明O₃进入植物体后引发活性氧大爆发,破坏生物膜的结构和功能,进而导致电解质外渗和膜脂过氧化,使植株受害。该结果与水稻、春小麦和银杏^[16-18]等的研究结果相一致。

SOD、CAT和POD是植物抗氧化酶系统中极为重要的3种保护酶。该试验中,除了在生育前期,SOD活性略微高于CK处理,其余时期均低于CK处理,可见由于O₃胁迫的作用,抑制了根系细胞SOD酶的活性,破坏了抗氧化系统。在臭氧对冬小麦叶片的研究中发现,SOD活性在相对低O₃浓度下逐渐升高,而后急剧下降^[19]。高浓度O₃(150 nL·L⁻¹)使水稻根系的SOD活性整体上略高于CK处理^[16]。出现不同的结果,与作物品种和臭氧浓度设置的不同有关,且O₃直接作用于叶片,间接作用于根系,会产生时间滞后效应。O₃胁迫提高了大豆根系CAT和POD活性,初期随时间延长活性升高,达到最大峰值后下降,这与张巍巍等^[16]对水稻根系研究结果相一致。该试验中H₂O₂含量与CAT、POD

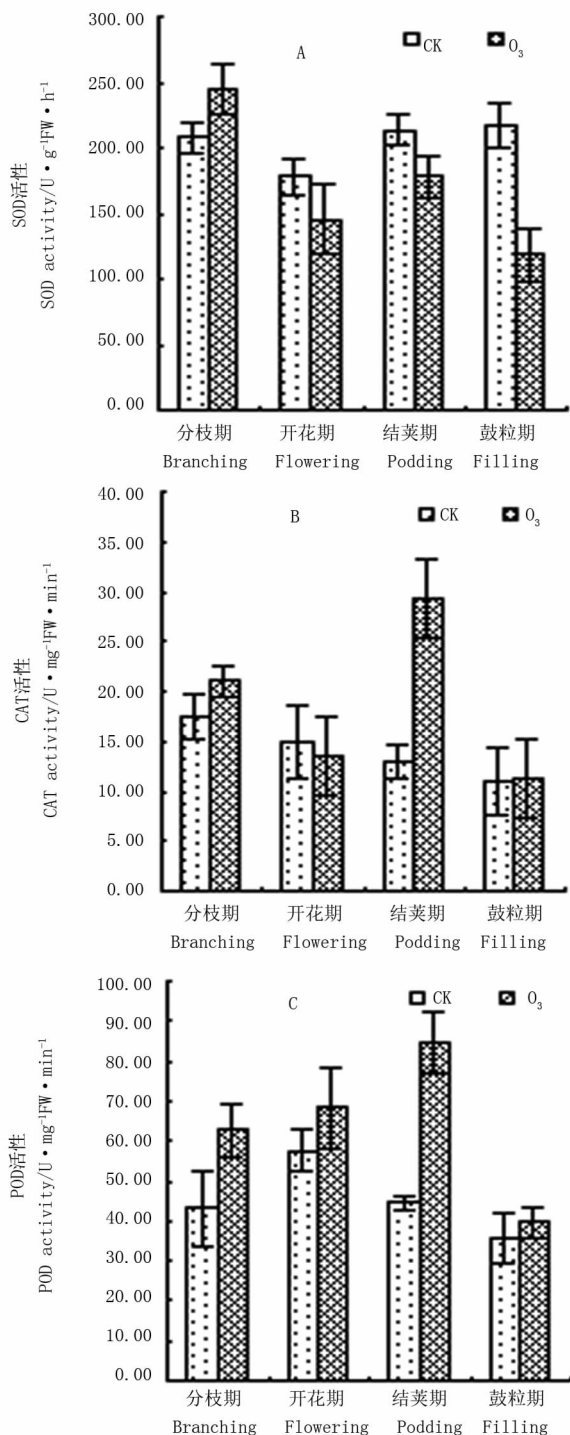


图4 O₃胁迫下大豆根系抗氧化酶活性的变化

Fig. 4 Variation of antioxidant enzymes activities in soybean roots under ozone stress

活性变化趋势相一致,可见,H₂O₂含量的增加诱导了相关酶活性的增强,清除植物体内多余的活性氧,保护植物细胞不受伤害。也有研究结果表明,O₃胁迫降低了CAT或POD活性^[19-20],出现不同的结果原因可能是作物体内存在不同的保护酶机制,一种是在逆境胁迫初期表现为保护效应,另一种是在胁迫后期表现为伤害效应^[21]。在该试验中,大豆根系POD活性升高,表现为保护效应。

综上所述,O₃胁迫致使根瘤数量、根生物量等下降,同时破坏了大豆根系细胞内活性氧代谢系统,致使保护酶体系紊乱,即使CAT和POD活性升高,清除活性氧能力增强,但由于活性氧产生量过大,以至于总体上仍表现为O₂⁻产生速率加快和H₂O₂含量增加,使膜质过氧化程度加强,细胞膜受到损伤。说明O₃胁迫抑制了大豆根系的正常生长。

参考文献

- [1] Liu L, Sundet J K, Liu Y, et al. A study of tropospheric ozone over China with a 3-D global CTM model [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2007, 18 (3) : 515-545.
- [2] Prentice I, Farquhar G, Fasham M, et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide [R]. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001 : 183-238.
- [3] Feng Z Z, Yao F F, Chen Z, et al. Response of gas exchange and yield components of field grown *Triticum aestivum* L. to elevated ozone in China [J]. *Photosynthetica*, 2007, 45 : 441-446.
- [4] 金明红, 黄益宗. 臭氧污染胁迫对农作物生长与产量的影响 [J]. *生态环境*, 2003, 12 (4) : 482-486. (Jin M H, Huang Y Z. Review of crops damaged and yield loss by ozone stress [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12 (4) : 482-486.)
- [5] Gaucher C, Costanzo N, Widden P, et al. Response to an ozone gradient of growth and enzymes implicated in tolerance to oxidative stress in *Acer saccharum* (Marsh.) seedlings [J]. *Annual Forestry Science*, 2006, 63 : 387-397.
- [6] 郑飞翔, 王效科, 张巍巍, 等. 臭氧胁迫对水稻光合作用与产量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (11) : 2217-2223. (Zheng F X, Wang X K, Zhang W W, et al. Influences of elevated ozone on rice photosynthesis and yield [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (11) : 2217-2223.)
- [7] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 等. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响 [J]. *生态学报*, 2007, 26 (5) : 645-649. (Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, et al. Effects of elevated ozone concentration on *Ginkgo biloba* photosynthesis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (5) : 645-649.)
- [8] Gerosa G, Marzuoli R, Rossini M, et al. A flux-based assessment of the effects of ozone on foliar injury, photosynthesis, and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Borlotto Nano Lingua di Fuoco) in open-top chambers [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157 : 1727-1736.
- [9] 谢居清, 郑启伟, 王效科, 等. 臭氧对原位条件下水稻叶片光合、穗部性状及产量构成的影响 [J]. *西北农业学报*, 2006, 15 (3) : 27-30. (Xie J Q, Zheng Q W, Wang X K, et al. Effect of ozone on photosynthesis of rice leaves, ear character and yield component in Situ [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2006, 15 (3) : 27-30.)
- [10] 阮亚男, 何兴元, 陈玮, 等. 臭氧浓度升高对油松抗氧化系统活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (5) : 1032-1037. (Ruan Y N, He X Y, Chen W, et al. Effects of elevated O₃ concentration on anti-oxidative enzyme activities in *Pinus tabulaeformis*. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (5) : 1032-1037.)

- [11] 郑有飞,胡程达,吴荣军,等. 臭氧胁迫对冬小麦光合作用、膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学,2010,31(7):1643-1651. (Zheng Y F, Hu C D, Wu R J, et al. Effects of ozone stress upon winter wheat photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant systems[J]. Environmental Science, 2010, 31(7):1643-1651.)
- [12] Kasurinen A, Gonzales P K, Riikonen J, et al. Soil CO₂ efflux of two silver birch clones exposed to elevated CO₂ and O₃ levels during three growing seasons[J]. Global Change Biology, 2004, 10:1654-1665.
- [13] 薛应龙. 植物生理学实验手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1985:67-69. (Xue Y L. Phytophysiology experiments manual [M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 1985:67-69.)
- [14] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. (Zou Q. Plant physiology experiment guide [M]. Beijing: Agricultural Press, 2000.)
- [15] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京:科学出版社, 2009. (Li L. Plant physiology module experiment guide [M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [16] 张巍巍,郑飞翔,王效科,等. 臭氧对水稻根系活力、可溶性蛋白含量与抗氧化系统的影响[J]. 植物生态学报,2009,33(3):425-432. (Zhang W W, Zheng F X, Wang X K, et al. Effects of ozone on root activity, soluble protein content and antioxidant system in *Oryza sativa* roots[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3):425-432.)
- [17] 徐玲,赵天宏,胡莹莹,等. 高浓度臭氧对春小麦膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(2):74-78. (Xu L, Zhao T H, Hu Y Y, et al. Effect of ozone on membrane lipid and antioxidant system of wheat leaves[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(2):74-78.)
- [18] 于涛. 臭氧浓度升高对银杏抗氧化能力的影响[J]. 现代农业科技,2010(10):186-192. (Yu T. Effect of ozone on oxidation resistance of ginkgo[J]. Modern agricultural sciences and technology, 2010(10):186-192.)
- [19] 郑启伟,王效科,冯兆忠,等. 臭氧对原位条件下冬小麦叶片光合色素、膜脂过氧化的影响[J]. 西北植物学报,2005,25(11):2240-2244. (Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, et al. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the situ leaves of winter wheat[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2005, 25(11):2240-2244.)
- [20] 杨铁钊,殷全玉,丁永乐,等. 烟草气孔特性、抗氧化酶活性与臭氧伤害的关系[J]. 植物生态学报,2004,28(5):672-679. (Yang T Z, Yin Q Y, Ding Y L, et al. Relationships between ozone injury and stoma parameters and activities of antioxidant enzyme [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(5):672-679.)
- [21] 郭水良,方芳,强胜. 不同温度对七种外来杂草生理指标的影响及其适应意义[J]. 广西植物,2003,23(1):73-76. (Guo S L, Fang F, Qiang S. Influences of temperature on physiological indices of seven exotic weeds and their adaptive significance[J]. Guihaia, 2003, 23(1):73-76.)

(上接第 51 页)

- [17] 吕美琴,叶玉珍. 菜用大豆的研究现状及展望[J]. 福建农业科技,2002(3):26-28. (Lv M Q, Ye Y Z. Current status, production problem and prospects of vegetable soybean[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2002(3):26-28.)
- [18] 张彩英,常文锁,李喜焕,等. 种植密度和施肥对菜用大豆产量性状的效应研究[J]. 中国农学通报,2005,21(7):190-192. (Zhang C Y, Chang W S, Li X H, et al. Effect of plant density and phosphorus application rate on yield of vegetable soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(7):190-192.)
- [19] 朱根娣,杨红娟,马坤,等. 青酥二号菜用大豆的早熟覆盖栽培技术初探[J]. 上海农业学报,2004,20(4):37-39. (Zhu Y D, Yang H J, Ma K, et al. Preliminary study on forcing culture technique of a vegetable soybean variety Qingsu No. 2[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2004, 20(4):37-39.)
- [20] 张秋英,李彦生,李艳华,等. 晚播对菜用大豆根系、干物质积累及鲜食产量的影响[J]. 大豆科学,2009,28(4):623-627. (Zhang Q Y, Li Y S, Li Y H, et al. Influence of late sowing on root, dry matter accumulation and fresh yield in vegetable soybean [J]. Soybean Science, 2009, 28(4):623-627.)
- [21] 孙曦. 植物营养原理[M]. 北京:中国农业出版社,1997. (Sun X. Principles of plant nutrition [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.)
- [22] 姜琳琳,韩立思,韩晓日,等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):247-253. (Jiang L L, Han L S, Han X R, et al. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1):247-253.)
- [23] 刘慧,刘景福,刘武定. 不同磷营养油菜品种根系形态及生理特性差异研究[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(1):40-45. (Liu H, Liu J F, Liu W D. Differences of root morphology and physiological characteristics between two rape genotypes with different efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(1):40-45.)
- [24] 曾宪坤. 磷的农业化学(I)[J]. 磷肥与复肥,1999(1):69-78. (Zeng X K. Agro-chemistry of phosphorus(I) [J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 1999(1):69-78.)
- [25] Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1980, 11:233-260.
- [26] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots [J]. New Phytologist, 2000, 147(1):43-53.