

外源抗坏血酸对酸雨胁迫油菜幼苗的缓解效应

周 琴¹, 张 佩², 曹春信¹, 张国正¹, 江海东¹, 濮梅娟²

(1.南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095; 2.江苏省气象局, 南京 210008)

摘 要:为探讨抗坏血酸(AsA)对酸雨胁迫油菜毒害效应的缓解效果,以苏油 1 号为供试材料,采用盆栽土培的方法研究了不同浓度的外源 AsA 处理对 pH2.5 酸雨胁迫下油菜幼苗生长的影响。结果表明,pH2.5 酸雨显著抑制了油菜幼苗的生长,喷施外源 AsA 后,一定浓度范围的 AsA 可明显缓解油菜的酸雨胁迫,生物量、叶片色素含量、抗氧化酶活性等显著高于酸雨胁迫的油菜,丙二醛(MDA)含量和相对电导率显著低于酸雨处理油菜。但随着 AsA 喷施浓度的增加,缓解效应下降,生物量、叶绿素含量等下降,而 MDA 和电导率上升。可见适宜浓度的外源 AsA 对酸雨胁迫下的油菜幼苗具有一定的缓解效应,但浓度过高则产生促氧化作用,在试验中以 $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的效果最佳。

关键词:油菜幼苗;抗坏血酸;缓解;酸雨;胁迫

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)08-1437-06

Alleviative Effects of Exogenous ASA on Acid Rain Stressed Oilrape Seedlings

ZHOU Qin¹, ZHANG Pei², CAO Chun-xin¹, ZHANG Guo-zheng¹, JIANG Hai-dong¹, PU Mei-juan²

(1.Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Nanjing 210095, China; 2.Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China)

Abstract: Acid rain is considered the top ten environment concerns in the world. In a pot experiment, oilrape (*B. napus* var.) cultivar Suyou No. 1 was subjected to simulated acid rain (AR, pH2.5), followed by foliar application of different concentrations of ascorbic acid (AsA). The alleviative effect of AsA on AR stress in oilrape seedling was then investigated. AR obviously depressed growth and reduced biomass of seedlings. Chlorophyll content, antioxidant content, antioxidative enzyme activities in AR stressed seedlings were enhanced, while malonyldialdehyde (MDA) content and relative conductivity (RC) were repressed by application of $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ AsA. However, biomass and chlorophyll content in leaf reduced while MDA and RC increased when concentration of AsA was higher than $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, compared with plants treated with $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ AsA. Thus, AR stress on oilrape plants was effectively alleviated by foliar application of mild concentration of AsA, and the alleviation effect could be depressed under excessively high concentration of AsA. Here, the optimum concentration of AsA was $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ for the best alleviation of AR stressed plants.

Keywords: rape seedlings; AsA; alleviate; simulated acid rain; stress

酸雨已成为一个严重的全球性环境问题^[1]。我国是世界上第三大酸雨区,酸雨区主要分布在长江以南地区^[2],与南方酸性红壤相重叠,危害更加严重。油菜是我国重要的经济作物,也是惟一的冬季油料作物,在种植业中占有重大比例。酸雨对植物伤害的生

理机制之一在于产生氧化胁迫,如梁骏等研究显示在 $\text{pH} < 3.5$ 的酸雨胁迫下,油菜叶片细胞质膜透性、丙二醛含量明显升高,最终导致产量和品质显著下降^[3]。抗坏血酸(AsA)是植物体内一种重要的小分子抗氧化物,它可以在抗坏血酸过氧化物酶的催化下与 H_2O_2 反应或直接与 H_2O_2 反应,将 H_2O_2 还原为 H_2O ,从而减轻氧化胁迫伤害^[4]。近年来 AsA 在提高植物抗逆性方面有广泛的应用,它可增强油菜种子耐盐性^[5]、缓解重金属镉对黑藻的氧化胁迫^[6]、缓解臭氧对水稻叶片的氧化胁迫^[7],延缓细胞死亡^[8]等。

收稿日期:2010-03-23

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD89B12)

作者简介:周 琴(1977—),女,副教授,江苏盐城人,主要从事作物逆境生理研究。

通讯作者:江海东 E-mail:hdjiang@njau.edu.cn;

濮梅娟 E-mail:pumeijuan@163.com

AsA 无毒、成本低,其在缓解酸雨氧化胁迫方面的功效值得研究和探讨。本试验研究了不同浓度的 AsA 对酸雨胁迫下油菜幼苗生长的影响,以探索抗坏血酸缓解酸雨伤害的可能机理,为油菜优质安全生产提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试油菜品种为苏油 1 号(*B. napus var. Suyou No.1*)。

1.2 试验设计

试验于 2007 年 11 月在南京农业大学网室进行,采用土培方式。油菜种子清洗消毒后播于沙池中,待油菜第一片真叶露心后选长势好且一致的幼苗移栽到盛有营养土的一次性塑料杯里,每杯 4 株。待幼苗长至三叶一心时分别用 pH6.0 和 pH2.5 的酸雨喷施,酸雨的喷施量相当于 10 mm 降雨量,模拟酸雨中的离子成分和含量根据江苏省自然降雨中的化学组分确定。处理后第 2 d 叶面喷施不同浓度的抗坏血酸, pH6.0 未喷施抗坏血酸设为 T。pH2.5 的酸雨处理喷施抗坏血酸浓度分别为 0、2、4、6、8、10 mmol·L⁻¹,分别设为 T0、T2、T4、T6、T8、T10,处理 9 d 后取样进行指标测定。

酸母液:制备 0.25 mol·L⁻¹H₂SO₄ 和 0.05 mol·L⁻¹HNO₃ 溶液(SO₄²⁻与 NO₃⁻的摩尔浓度之比约 5:1),将两者等体积混合后作为模拟酸雨的酸母液。

电解质母液:制备高于天然酸雨成分 1 000 倍的电解质母液,使母液中含 CaCl₂ 3.1 g·L⁻¹,NH₄Cl 2.8 g·L⁻¹,NaCl 0.91 g·L⁻¹ 和 KCl 0.75 g·L⁻¹。

模拟酸雨制备:将电解质母液稀释 1 000 倍,用酸母液将其调节至需要的 pH 值。模拟酸雨的 pH 值

设为 6.0(对照)和 2.5。

1.3 测定项目与方法

油菜幼苗生物量测定方法:取样 15 株,分地上部和地下部,称重后 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重后称干重。

叶绿素和类胡萝卜素含量测定参照张宪政方法^[9]。SOD 活性采用 NBT 法^[10];POD 活力采用愈创木酚法^[10];CAT 活力采用 Chance 法^[11]。MDA 含量测定采用赵世杰等改进方法^[12]。相对电导率含量使用 DDP-210 型电导率仪测定。抗坏血酸含量的测定参照 WU 的方法进行^[13]。谷胱甘肽含量的测定参照 Guri 的方法^[14]。可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法^[10]。

1.4 数据分析

采用 SAS9.1 软件对数据进行统计分析,利用 Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗生物量的影响

由表 1 可以看出,pH2.5 酸雨使油菜幼苗生长受到明显伤害,地上部和地下部干重分别较 pH6.0 处理下降了 13.03%和 4.82%(*P*<0.05)。随着抗坏血酸喷施浓度的升高,幼苗地上部和地下部干重先上升后下降,其中 T2、T4 处理地上部干重较 T0 处理上升了 8.47%和 11.81%(*P*<0.05),其余与 T0 处理无显著差异;T4 处理地下部干重较 T0 处理增加了 4.02%(*P*<0.05),其余与 AR2.5 处理无显著差异。

2.2 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗色素含量的影响

pH2.5 酸雨使油菜幼苗色素含量显著下降(见表 1),叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别较 pH

表 1 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗生物量和色素含量的影响

Table 1 Effects of AsA on biomass and pigment content in rape seedlings under pH2.5 AR stress

处理 Treatment	地上部干重 DW in shoot/g·10plants ⁻¹	地下部干重 DW in root/g·10plants ⁻¹	叶绿素 a 含量 Chla content/mg·g ⁻¹	叶绿素 b 含量 Chlb content/mg·g ⁻¹	类胡萝卜素含量 x.c content/mg·g ⁻¹
T	1.060a	0.502a	0.915a	0.235a	0.244a
T0	0.922cd	0.477cde	0.508ef	0.130fg	0.146ef
T2	1.000b	0.490bc	0.684c	0.190c	0.186c
T4	1.031ab	0.497ab	0.862ab	0.213ab	0.233ab
T6	0.975bc	0.488bc	0.652cd	0.174cd	0.188c
T8	0.941c	0.481cd	0.619d	0.155e	0.169cd
T10	0.918d	0.472de	0.513e	0.134f	0.148e

注:a、b、c、d、e 和 f 表示差异达到显著水平($\alpha=0.05$),下同。

Note: Those marked with a, b, c, d, e and f indicate significant difference at 5% probability level, the same as below.

6.0 处理下降了 44.47%、44.72% 和 40.21% ($P < 0.05$)。喷施抗坏血酸后, T2、T4、T6、T8 的叶绿素 a 含量较 AR2.5 增加了 34.67%、69.90%、28.39% 和 21.90% ($P < 0.05$), 叶绿素 b 含量增加了 45.85%、64.14%、34.14% 和 18.86% ($P < 0.05$), 类胡萝卜素含量增加了 27.21%、59.38%、28.59% 和 15.81% ($P < 0.05$), T10 各色素含量与 AR2.5 处理间无显著差异。

2.3 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

pH2.5 酸雨使油菜幼苗可溶性蛋白含量明显下降(见图 1), AR2.5 处理较 CK 下降了 30.10% ($P < 0.05$)。喷施抗坏血酸处理的可溶性蛋白含量较未喷施的均高, T2、T4、T6、T8 和 T10 的可溶性蛋白含量较 AR2.5 分别增加了 55.17%、66.84%、41.15%、34.04% 和 15.05% ($P < 0.05$)。

2.4 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 2、3 可看出, pH2.5 酸雨使油菜幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性显著下降, 与 pH6.0 处理相比, 下降量分别为 24.90%、18.56% 和 36.47% ($P < 0.05$)。喷施抗坏血酸后, 3 种酶活性随抗坏血酸浓度的增大先缓慢上升后下降继而又开始回升, T2、T4、T8、T10 的 SOD 活性较 AR2.5 分别增加了 10.40%、20.77%、38.21% 和 28.30% ($P < 0.05$), T6 与 T0 处理间无显著差异; T4、T8、T10 的 POD 活性较 T0 分别增加了 34.56%、63.49% 和 100.43% ($P < 0.05$), T2、T6 与 AR2.5 处理间无显著差异; T2、T4、T8、T10 的 CAT 活性较 AR2.5 分别增加了 32.38%、57.95%、49.00% 和 54.23% ($P < 0.05$), T6 与 T0 处理间无显著差异。

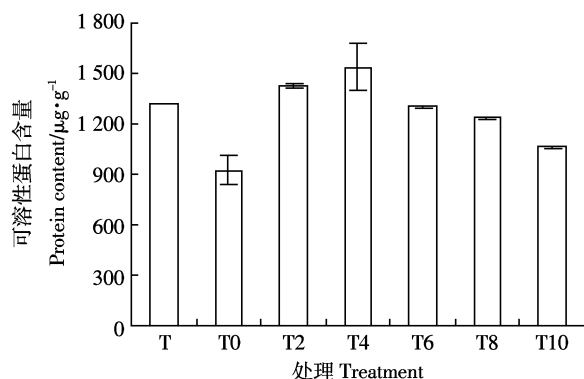


图 1 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

Figure 1 Effect of AsA on protein content of rape seedlings under pH2.5 AR stress

2.5 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗非酶抗氧化剂含量的影响

如图 4 所示, pH2.5 酸雨使油菜幼苗抗坏血酸和谷胱甘肽含量较 CK 分别下降了 9.42% 和 19.82% ($P < 0.05$), 喷施抗坏血酸后, 这两种物质含量随抗坏血酸浓度的增大先缓慢上升后下降, T2、T4、T6 的抗坏血酸含量较 AR2.5 分别增加了 3.21%、8.36% 和 2.02%

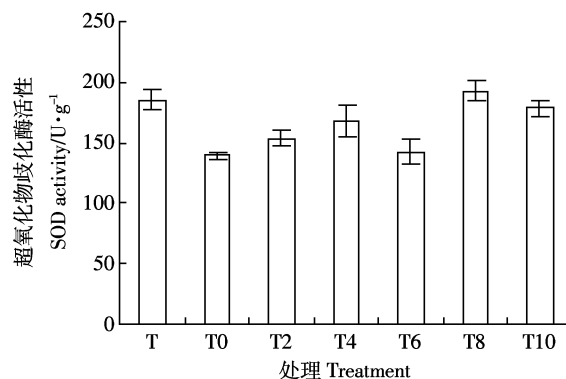


图 2 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗 SOD 活性的影响

Figure 2 Effect of AsA on SOD activity of rape seedlings under pH2.5 AR stress

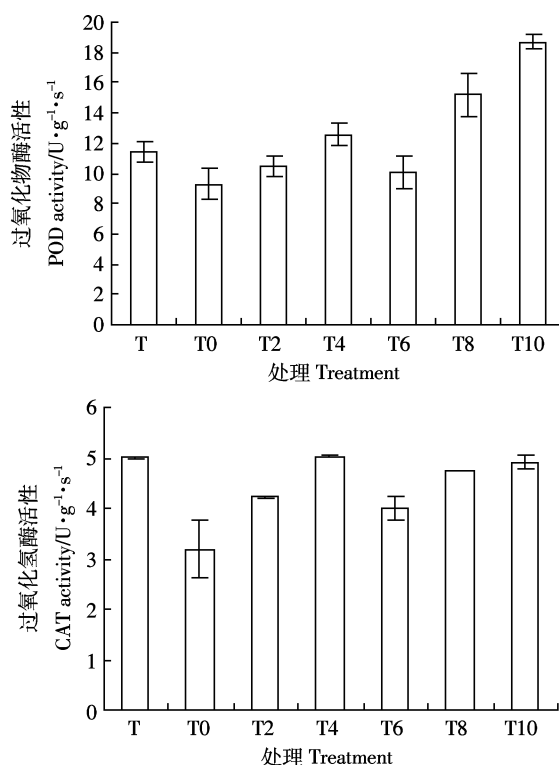


图 3 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗 POD 和 CAT 活性的影响

Figure 3 Effect of AsA on POD and CAT activity of rape seedlings under pH2.5 AR stress

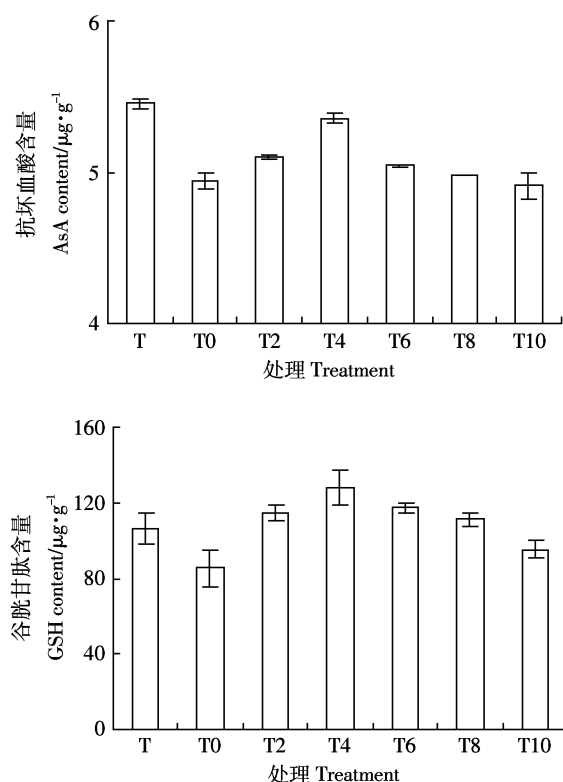


图4 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗抗坏血酸和谷胱甘肽含量的影响

Figure 4 Effect of AsA on AsA and GSH content of rape seedlings under pH2.5 AR stress

($P<0.05$), T8、T10 分别与 AR2.5 处理间差异不显著; T2、T4、T6 和 T8 的谷胱甘肽含量较 AR2.5 分别增加了 34.51%、50.53%、37.58% 和 30.60%, T10 与 AR2.5 处理间无显著差异。

2.6 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗丙二醛含量和相对电导率的影响

如图 5 所示, pH2.5 酸雨使油菜幼苗叶片细胞膜脂过氧化产物——丙二醛含量显著升高, AR2.5 处理较 CK 增加了 34.90% ($P<0.05$)。随着抗坏血酸施用浓度的增加, 叶片丙二醛含量先下降后上升, T2、T4 和 T6 的丙二醛含量较 AR2.5 分别下降了 14.38%、21.15% 和 15.39% ($P<0.05$), T8 和 AR2.5 处理间无显著差异, T10 较 AR2.5 处理增加了 13.37% ($P<0.05$)。

从相对电导率来看, 其变化趋势与丙二醛一致。AR2.5 处理的相对电导率较 CK 增加了 34.44% ($P<0.05$), T2、T4 和 T6 的丙二醛含量较 AR2.5 分别下降了 8.87%、23.23% 和 7.55% ($P<0.05$), T8 和 AR2.5 处理间无显著差异, T10 较 AR2.5 处理增加了 19.83% ($P<0.05$)。

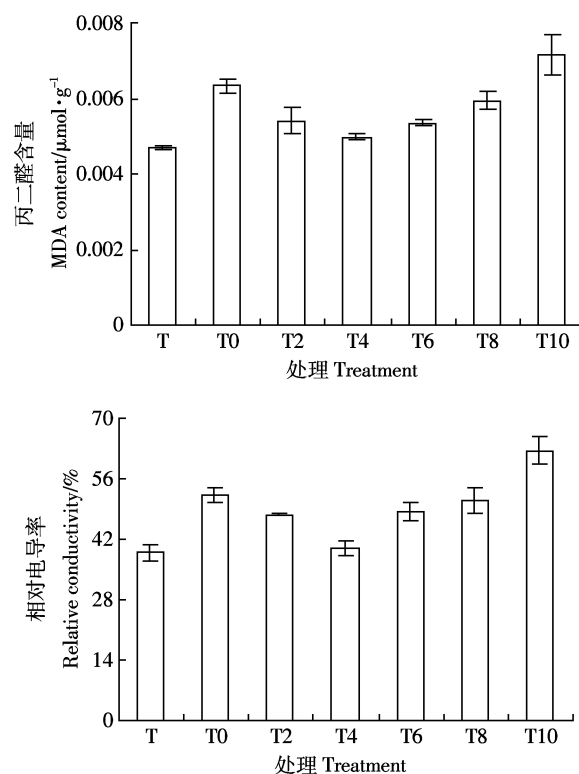


图5 外源抗坏血酸对酸雨胁迫下油菜幼苗丙二醛含量和相对电导率的影响

Figure 5 Effect of AsA on MDA content and RC of rape seedlings under pH2.5 AR stress

3 讨论与结论

植物叶片是酸雨污染的主要受体, 酸性物质通过气孔或表皮扩散进入植物器官内使细胞膜和细胞器受害, 酸雨对植物损伤的重要生理机制之一在于引起氧化胁迫。Velikova 等指出酸雨处理导致豆科植物免疫功能和抗氧化功能的变化, 从而引起伤害^[15]。酸雨胁迫下植物膜脂过氧化加剧, 细胞膜保护酶活力下降^[16-17], 进而破坏叶绿素、抑制光合作用, 引起植物生物量下降^[16]。本研究结果也显示油菜幼苗经 pH2.5 酸雨处理后, 叶片细胞膜抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性、非酶抗氧化剂(AsA 和 GSH)含量显著下降, 而叶片 MDA 含量和细胞膜透性则显著增加, 最终引起生物量的下降, 尤以地上部更明显。

AsA 是植物体内最主要也是最重要的非酶抗氧化剂^[18], 能够清除多种自由基, 是植物抵御氧化胁迫的第一道防线^[9], 可以直接清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 、 $\text{HO}\cdot$ 和 H_2O_2 等活性氧自由基, 也可通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环间接清除 H_2O_2 等^[19-20]。强酸雨处理下, 由于油菜受胁迫严

重, AsA 被大量消耗含量降低, 外源 AsA 的喷施可及时补充内源 AsA 的不足, 同时也提高了 GSH 的含量。GSH 是植物体存在的含-SH 的还原物质, 具有保护酶类和结构蛋白的-SH 基不受氧化胁迫的作用^[21]。酸雨胁迫产生的活性氧可直接攻击生物大分子, 导致蛋白质、膜脂、DNA 分子结构异常。AsA 能有效清除活性氧, 解除了其对酶蛋白的破坏, 因而在一定浓度范围内随着外源 AsA 浓度逐渐增大, SOD、CAT 和 POD 酶的活性增强。

AsA 具有抗氧化作用已被很多研究者证实^[5-8], 但近来有越来越多的研究也显示, AsA 还具有促氧化作用^[22,6]。Lee 等指出 VC 可以使脂质过氧化物分解, 生成能够引起突变性 DNA 损伤的内源性基因毒物质^[22]。目前还无法明确 VC 在什么情况下起促氧化作用, 但一些试验证明在生物体内高剂量的 VC 具有促氧化作用, 低剂量的 VC 具有抗氧化作用。AsA 促氧化作用机理目前还不是很清楚, 可能和 AsA 代谢过程有关。当生物体内的 VC 含量已经达到饱和时, 过量 VC 就要代谢排出体外, 在代谢的过程中产生大量的草酸, 同时产生自由基损害细胞^[23]。许丙军研究发现, 用 AsA 缓解镉对黑藻的胁迫, 低浓度缓解效应明显, 而过高浓度则表现出与 Cd²⁺ 的协同作用, 加剧了对黑藻的伤害^[6]。本研究也显示, 随 AsA 浓度进一步升高, T6 处理生物量、叶绿素含量、抗氧化酶等指标较酸雨胁迫处理稍高但均低于 T4 处理, 虽有一点缓解作用, 但效应有限, 这可能是该浓度下 AsA 直接或间接还原了一部分活性氧, 同时由于过量 AsA 具有一定的促氧化作用, 在抗氧化和促氧化共同效应下, 对酸雨胁迫略有缓解作用, 但效应不明显。而 T8 和 T10 处理生物量、叶绿素含量、可溶性蛋白含量等指标进一步下降, MDA 含量上升, 可见 AsA 促氧化作用更加明显, 过量 AsA 产生自由基较多, SOD 是一种诱导酶^[24], 底物浓度增加, 其活性上升, CAT 和 POD 也随着底物浓度增加而活性上升。

综上所述, 喷施适宜浓度的抗坏血酸可补充非酶抗氧化剂, 有效缓解了酸雨对油菜的胁迫, 从而改善了植株生长发育状况。但 AsA 浓度过高, 则具有促氧化作用, 缓解效应下降, 甚至加剧酸雨氧化胁迫。本试验中, 较适宜的浓度为 4 mmol·L⁻¹。

参考文献:

- [1] Balasubramanian G, Udayasoorian C, Prabu P C. Effects of short-term exposure of simulated acid rain on the growth of acacia nilotica[J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2007, 19(4):198-206.
- [2] 刘梅, 濮梅娟, 尹东屏, 等. 江苏省酸雨时空分布特征及酸雨潜势预报因子[J]. *气象科技*, 2008, 36(4):462-467.
LIU Mei, PU Mei-juan, YIN Dong-ping, et al. A Study of acid rain space-time distribution and potential influencing factors in Jiangsu Province[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(4):462-467.
- [3] 梁骏, 郑有飞, 李璐, 等. 酸雨对土壤酸化和油菜中后期生长发育的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3):1043-1050.
LIANG Jun, ZHENG You-fei, LI Lu, et al. Effects of acid rain upon soil acidization and growth/development of rape crop in its middle-late stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1043-1050.
- [4] Arrigoni O, Calabrese G, De Gara L, et al. Correlation between changes in cell ascorbate and growth of *Lupinus albus* seedlings[J]. *J Plant Physiol*, 1997, 150:302-308.
- [5] 范美华, 张义鑫, 石戈, 等. 外源抗坏血酸对油菜种子在海水胁迫下萌发生长的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2009, 31(1):34-38.
FAN Mei-hua, ZHANG Yi-xin, SHI Ge, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on seed germination and growth of *Brassica napus* under seawater stress[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(1):34-38.
- [6] 许丙军, 施国新, 徐勤松, 等. 外源抗坏血酸对镉胁迫下黑藻抗氧化系统的保护作用[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9):1768-1770.
XU Bing-jun, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Protective effects of exogenous ascorbic acid on antioxidant system in *Hydrilla verticillata* under Cd²⁺ stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9):1768-1770.
- [7] 郑启伟, 王效科, 谢居清, 等. 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(4):1131-1137.
ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, XIE Ju-qing, et al. Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in situ rice leaves under O₃ stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1131-1137.
- [8] Valeria Pavet. Ascorbic acid deficiency activates cell death and disease resistance responses in arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 2005, 139:1291-1303.
- [9] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989.
ZHANG Xian-zheng. Techniques of plant physiological experiment[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1989.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [11] Chance B, Maehly A C. Assays of catalase and peroxidase//Colowick S P, Kaplan N O (eds). *Methods of Enzymology* (Vol. II)[M]. New York: Academic Press, 1955:764-775.
- [12] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物丙二醛测定方法的改进[J]. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3):207-210.
ZHAO Shi-jie, XU Chang-cheng, ZOU Qi, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. *Plant Physiology Communications*, 1994, 30(3):207-210.

- [13] Wu Fei-bo, Zhang Guo-ping, Dominy Peter. Four barley genotypes respond differently to cadmium: Lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50: 67-78.
- [14] Guri A. Variation in glutathione and ascorbic acid content among selected cultivars of *Phaseolus vulgaris* prior to and after exposure to ozone[J]. *Can J Plant Science*, 1983, 63: 733-737..
- [15] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. Protective role of exogenous polyamines[J]. *Plant Science*, 2000, 151: 59-66
- [16] 童贯和, 刘天骄, 黄 伟. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗膜脂过氧化水平的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1509-1516.
TONG Guan-he, LIU Tian-jiao, HUANG Wei. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on lipid peroxidation of wheat seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1509-1516.
- [17] 龙 云, 刘 芸, 钟章成, 等. 酸雨和 UV-B 对玉米幼苗光合速率和抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4956-4966.
LONG Yun, LIU Yun, ZHONG Zhang-cheng, et al. Effects of UV-B irradiation and acid rain on photosynthetic rate and antioxidant enzyme activities of maize seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4956-4966.
- [18] Nijls D, Kelley P M. Vitamins C and E donate single hydrogen atoms in vivo[J]. *FEBS Letters*, 1991, 284: 147-151.
- [19] 黄文敏, 邢 伟, 李敦海, 等. 外源抗坏血酸对烟草细胞生长及衰老的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1157-1161.
HUANG Wen-min, XING Wei, LI Dun-hai, et al. Effects of exogenous ascorbic acid on the growth and senescence of tobacco BY-2 suspension cells[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1157-1161.
- [20] Munne-Bosch S, Alegre L. Interplay between ascorbic acid and lipophilic antioxidant defenses in chloroplasts of water-stressed *Arabidopsis* plants[J]. *FEBS Letters*, 2002, 524: 145-148.
- [21] 陈 沁, 刘友良. 谷胱甘肽对盐胁迫大麦叶片活性氧清除系统的保护作用[J]. *作物学报*, 2000, 26(3): 365-371.
CHEN Qin, LIU You-liang. Effect of glutathion on active oxygen scavenging system in leaves of barley seedlings under salt stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(3): 365-371.
- [22] Lee S H, Oe T, Blair I A. Vitamin C-induced decomposition of lipid hydroperoxides to endogenous genotoxins[J]. *Science*, 2001, 292: 2083-2086.
- [23] 郭海涛, 辛 玲. 抗坏血酸在细胞内的促氧化作用及其机理[J]. *饲料博览*, 2006, 2: 24-27.
GUO Hai-tao, XIN Ling. Discussion on intracellular pro-oxidant efficiency and mechanism of vitamin C[J]. *Feed Review*, 2006, 2: 24-27.
- [24] 杜海荣, 杨田甜, 吕荣芳, 等. 氟污染对玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2): 216-222.
DU Hai-rong, YANG Tian-tian, LV Rong-fang, et al. Effects of fluoride pollution on the growth and physiological characteristics of maize seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 216-222.