

文章编号:1007-2284(2022)02-0034-05

4种挺水植物在高浓度氮磷污染条件下 耐受性试验研究

朱士江¹, 贵树彪¹, 徐文¹, 向鹏¹, 孟婉^{1,2}, 朱瑾¹, 李凯凯¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100000)

摘要:为了探究4种挺水植物在高浓度氮、磷胁迫下对污染水体的耐受能力,人工模拟水体氮磷动态变化条件,在室外开展氮、磷耐受性盆栽试验,通过研究植物抗氧化酶防御系统中主要酶学指标超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量,确定4种挺水植物氮、磷耐受范围。结果表明:①随着氮、磷浓度增大,4种挺水植物SOD、CAT活性及MDA含量逐渐升高,当氮、磷浓度超出植物耐受范围,SOD、CAT活性及MDA含量开始下降。②4种挺水植物氮耐受范围:菖蒲、香蒲:20~400 mg/L,美人蕉、芦苇:20~500 mg/L。③4种挺水植物磷耐受范围:菖蒲:2~200 mg/L,美人蕉、芦苇和香蒲:2~300 mg/L。

关键词:挺水植物;SOD;MDA;CAT;耐受性

中图分类号:TV93;S682.32;X522 **文献标识码:**A

朱士江,贵树彪,徐文,等. 4种挺水植物在高浓度氮磷污染条件下耐受性试验研究[J]. 中国农村水利水电,2022(2):34-38.

ZHU S J, GUI S B, XU W, et al. Experimental research on the tolerance of four emergent plants under high nitrogen and phosphorus pollution conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(2):34-38.

Experimental Research on the Tolerance of Four Emergent Plants under High Nitrogen and Phosphorus Pollution Conditions

ZHU Shi-jiang¹, GUI Shu-biao¹, XU Wen¹, XIANG Peng¹, MENG Wan^{1,2}, ZHU Jin¹, LI Kai-kai¹

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China;

2. Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000, China)

Abstract: To explore four quite underwater plants in the high concentration of nitrogen and phosphorus stress tolerance ability of the polluted water, artificial simulated water conditions on the dynamic change of nitrogen and phosphorus, nitrogen and phosphorus in the outdoor tolerance pot experiment, through the study of plant antioxidant enzyme defense system main enzymology indexes superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activity and malondialdehyde (MDA) content, this paper determines the tolerance range of nitrogen and phosphorus of four emergent plants. The results show that with the increase in nitrogen and phosphorus concentration, the activities of SOD and CAT in the four plants increased first and then decreased, while the content of MDA gradually increased and began to decline after exceeding the plant tolerance capacity. The final conclusion is that the tolerance range of the plants to ammonia nitrogen is as follows: calamus and cattail: 20~400 mg/L, canna and reed: 20~500 mg/L, phosphorus tolerance range was as follows: calamus: 2~200 mg/L, canna, reed and cattail: 2~300 mg/L.

Key words: emergent plant; SOD; MDA; CAT; tolerance

收稿日期:2021-04-29

基金项目:湖南省科技重大专项课题项目(2018SK1010)。

作者简介:朱士江(1980-),男,副教授,主要从事小微水体水生态

修复。E-mail:46212465@qq.com。

通讯作者:徐文(1989-),女,讲师,主要从事农业节水灌溉方面的教学与科研工作。E-mail:xuwen@ctgu.edu.cn。

0 引言

目前,水体富营养化已成为水污染中一个突出问题^[1,2]。水生植物在生长过程中能够吸收大量的氮(N)、磷(P)^[3,4],利用水生植物及其根系负载生物膜的吸收、吸附和降解作用,并及时收获植株避免二次污染,是一种简单易行、成本低廉且极具景观效应的技术,在污染水体治理中得到了广泛应用^[5,6]。因此,在水体修复工程中,有必要了解水生植物对氮磷耐受性,从而选取适宜的水生植物,提高水生植物成活率,降低物质成本和时间成本。

植物在受到外界胁迫时,细胞内NADPH氧化酶增加,细胞壁上产生大量有毒的活性氧(ROS),机体内细胞膜脂过氧化作用加剧,此时植物体内代谢平衡被打破,植物自身抗氧化系统酶发挥作用,通过清除体内活性物质来保护植物免受伤害。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)在植物抵抗ROS伤害时发挥着重要作用^[7-9],丙二醛(MDA)是膜脂氧化的主要产物之一^[10]。氮、磷元素对植物的生长起着非常重要的作用,缺氮处理的黄瓜在短时间内,抗氧化酶SOD、CAT活性显著上升,MDA含量随着处理时间延长不断累积^[11];低浓度氮、磷会对植物造成胁迫,植物幼苗在低磷胁迫下生长受到抑制,叶片内叶绿素和可溶性蛋白含量下降,MDA含量及SOD、CAT活性升高^[12,13],低氮胁迫下苦荞也产生了相似的生理响应^[14];同时氮、磷元素水平可调控植物在重金属胁迫下的抗氧化酶系统,有试验结果证明增加供磷水平可以提高杉木幼苗细胞内抗氧化酶活性以减轻铝(Al)胁迫产生的过氧化毒害^[8,15];重金属处理的种子中施加氮元素能提高种子发芽率、幼苗生长和叶面积^[16];高浓度氮、磷元素会毒害植物甚至导致植物死亡^[17],国内外学者开展了诸多有关水生植物对污染水体氮磷去除效果的研究,但关于水生植物在高浓度氮磷污染加剧条件下的耐受性研究并不完善。

因此,本试验选取4种常见的挺水植物,人工模拟水体氮磷动态变化条件,在室外开展氮、磷耐受性盆栽试验,记录植物在氮、磷元素浓度梯度增长过程中,抗氧化系统酶SOD、CAT活性及膜脂过氧化产物MDA含量的变化特征,以此探究4种挺水植物在高浓度氮、磷胁迫下的耐受性,并为高浓度氮、磷富营养化水体治理植物的选择提供建议。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物美人蕉 *Canna indica*、菖蒲 *Acorus calamus* L、香蒲 *Typha orientalis* Presl 和芦苇 *Phragmites communis*^[18] 采购于湖北省荆州市水生植物培育基地,洗净根系后在自来水中预培养2周待用。改进 *Hoagland* 营养液配方见表1。

1.2 试验设计

试验于2020年8月10日在当阳市泉河水库管理处开展,试验周期80 d。选取外形完好、生长一致的植株移栽至试验盆(高26 cm×底径31 cm)中,每盆种植1株,盆内加入8 L水,pH值保持在6.0左右,标记水深刻度线,置入改进 *Hoagland* 营养液,以石英砂作固定基质。整个试验过程在室外自然光照下进行,

表1 改进 *Hoagland* 营养液(N、P除外) mg/L

Tab.1 Improved Hoagland Nutrient Solution (except N and P)		
元素类别	药品	药品用量
大量元素	CaCl ₂	44.400
	MgSO ₄	49.300
	KNO ₃	50.600
铁盐	Na ₂ Fe-EDTA	18.650
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	13.900
微量元素	H ₃ BO ₃	0.620
	MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.230
	ZnSO ₄	0.860
	CuSO ₄	0.025
	CoCl ₂	0.025
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.250

温度变化幅度为:14~33℃。每种植物设两个处理,每个处理设置3个重复,氮源为氯化铵,磷源为磷酸二氢钾,对照组分别为N、P元素缺失,每隔10 d增加水体中N、P浓度,前期浓度成倍数增加,当N元素浓度增加至400 mg/L,P元素浓度增加至100 mg/L后,后续试验水体浓度每次升高100 mg/L直至植物死亡停止试验,5 d更换培养液,适时根据蒸腾量补充蒸馏水,最终试验浓度见表2。

表2 试验浓度设置 mg/L

Tab.2 Test concentration setting								
时间/ d	10	20	30	40	50	60	70	80
氨氮	20	50	100	200	400	500	600	700
磷	2	10	25	50	100	200	300	400

1.3 样品采集与分析

每隔10 d在同一时间采集植物叶片,测定叶片中丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)的活性。MDA测定采用硫代巴比妥酸法,SOD测定采用氮蓝四唑(NBT)光化学还原法^[19],CAT测定采用紫外吸收法^[20]。

1.4 数据分析

数据采用Excel 2020和Origin 2018软件进行数据统计与作图,使用SPSS 25.0软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 4种挺水植物氨氮耐受性

2.1.1 氨氮浓度对SOD、CAT活性的影响

SOD是重要的活性氧清除酶,当外来胁迫导致大量活性氧产生时,它能及时有效地清除自由基,保护细胞免受活性氧胁迫的伤害^[21,22]。CAT是抗氧化酶系统的重要组成成分,分解H₂O₂为O₂和H₂O,它对细胞内的H₂O₂分解有重要作用^[23]。

图1所示为4种挺水植物叶片内SOD、CAT活性试验组与对照组的比较,对照组SOD、CAT活性变化较为平缓,试验组两种抗氧化酶活性都随着氨氮浓度变化呈现出先上升后下降的趋势。试验各阶段植物SOD活性上升速率不同,单次增加浓度后酶活性上升速率最快的是香蒲(49.5%),说明香蒲在应对高

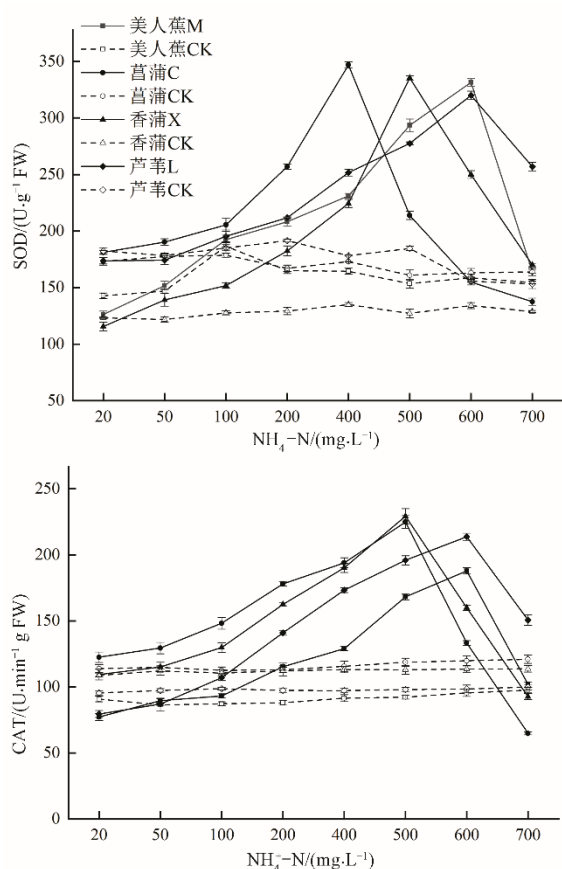


图1 植物在高浓度氨氮胁迫下抗氧化系统酶SOD、CAT活性变化
Fig.1 Changes in SOD and CAT contents of antioxidant enzymes
in plants under high ammonia nitrogen stress

浓度氨氮时,机体能够迅速提升SOD活性来应对胁迫;CAT活性上升过程相对平缓。SOD活性最先出现最大值的是菖蒲,美人蕉和芦苇最后出现最大值,各植物最大值差异显著。CAT活性中,香蒲、菖蒲同时最先表现出最大值,美人蕉、芦苇则在第70 d出现最大值,且美人蕉的CAT活性显著低于芦苇。

2.1.2 氨氮浓度对MDA含量影响

MDA是膜脂过氧化的重要产物,通常利用它作为膜脂过氧化指标,其含量的变化可反映逆境条件下膜系统受到伤害的程度。植物在逆境条件下,往往发生膜脂过氧化作用。其中MDA的产生可以表示膜脂的过氧化用的程度,MDA含量高低是膜脂过氧化作用强弱的一个重要指标^[24]。

图2所示为4种挺水植物MDA含量试验组与对照组的比较。对照组MDA含量处于一个相对稳定的水平,其中菖蒲叶片内MDA含量显著高于其他植物对照组。试验组MDA含量在图中呈现出与抗氧化酶SOD、CAT相似的变化规律,且试验组最大值显著高于对照组。试验各阶段植物MDA含量上升速率不同,芦苇、美人蕉在受到胁迫后膜脂过氧化产物MDA的含量随着氨氮浓度递增缓慢上升和下降,而香蒲、芦苇均表现出在前期缓慢上升后迅速达到最大值,然后迅速下降。单次增加氨氮浓度后上升速率最快的是香蒲(74.1%),与该植物叶片中SOD活性表现相同。表明外界高浓度氨氮胁迫加快了MDA产生,植物机体也对此作出反应,提升SOD活性来提高植物的适应力。

4种挺水植物MDA含量在不同时期均有显著性差异,MDA

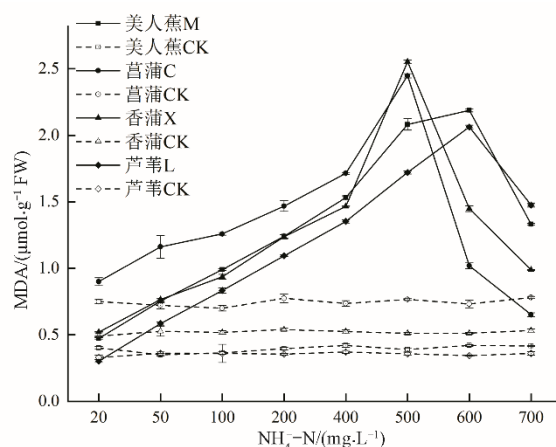


图2 植物在高浓度氨氮胁迫下MDA含量变化
Fig.2 Changes of MDA content in plants under high
ammonia nitrogen stress

含量最大值比较:香蒲(2.55 $\mu\text{mol/g}$, FW)>菖蒲(2.45 $\mu\text{mol/g}$, FW)>美人蕉(2.19 $\mu\text{mol/g}$, FW)>芦苇(2.06 $\mu\text{mol/g}$, FW),各植物MDA含量达到最大值时的施加浓度不同,菖蒲、香蒲在施加500 mg/L浓度的氨氮后MDA含量达到了最大值,且前期菖蒲体内MDA含量显著高于香蒲。美人蕉、芦苇在施加600 mg/L浓度氨氮后MDA含量达到最大值,且除最后一次浓度更换外,其余阶段美人蕉均高于芦苇。

2.2 4种挺水植物磷耐受性

2.2.1 磷浓度对SOD、CAT活性的影响

图3显示,试验组各挺水植物体内SOD、CAT活性都表现出先升后降的趋势,缺磷对照组表现较为平稳。在初期施加浓度为2 mg/L的磷培液后,试验组SOD、CAT活性均低于对照组;试验组植物SOD活性在浓度为10、25 mg/L时,除菖蒲外,其余均低于对照组;CAT活性则在25 mg/L时,除芦苇外,其余均高于对照组。其可能原因是缺磷对照组植物受到了低磷胁迫。随着磷浓度逐渐升高,菖蒲SOD活性表现出显著差异,其活性在施加200 mg/L的磷培液后达到最大值,美人蕉、香蒲、芦苇则在施加300 mg/L浓度磷培液达到最大值,此时各植物体受到高磷胁迫的严重毒害,根系组织受到损伤,SOD活性开始迅速下降。

2.2.2 磷浓度对MDA含量影响

图4显示,4种植物在2 mg/L的磷培液中MDA含量低于缺磷对照组,此时对照组各植物受到低磷胁迫,这与图3中SOD活性对比结果相同。试验组除美人蕉外,其余挺水植物体内MDA含量都表现出先升后降的趋势,缺磷对照组MDA含量较为平稳,菖蒲的MDA含量与其他3种植物存在显著差异,在更换300 mg/L磷培液后达到的峰值(2.79 $\mu\text{mol/g}$, FW)显著高于香蒲(2.14 $\mu\text{mol/g}$, FW)和芦苇(2.11 $\mu\text{mol/g}$, FW)。美人蕉在整个试验中,MDA含量一直处于上升状态,该植物体内SOD酶活性在300 mg/L浓度磷培液处理后已经达到最大值,出现这种现象的原因可能是美人蕉对高磷的耐受性更强,植物组织未完全被毒害,细胞的膜脂过氧化作用还在继续发生,加之抗氧化防御系统中的SOD酶活性下降,导致MDA积累量持续上升。

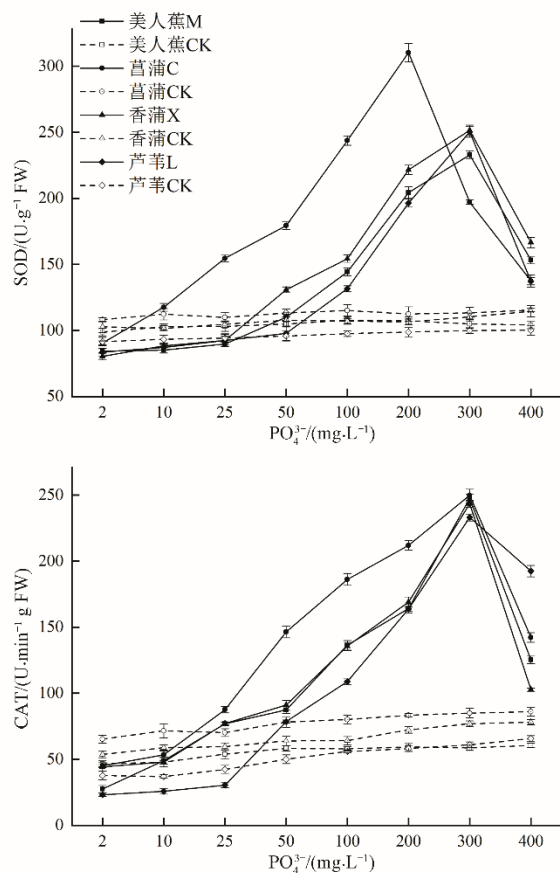


图3 植物在高浓度磷胁迫下抗氧化系统酶SOD、CAT活性变化
Fig.3 Changes in SOD and CAT contents of antioxidant enzymes
in plants under high phosphorus concentration stress

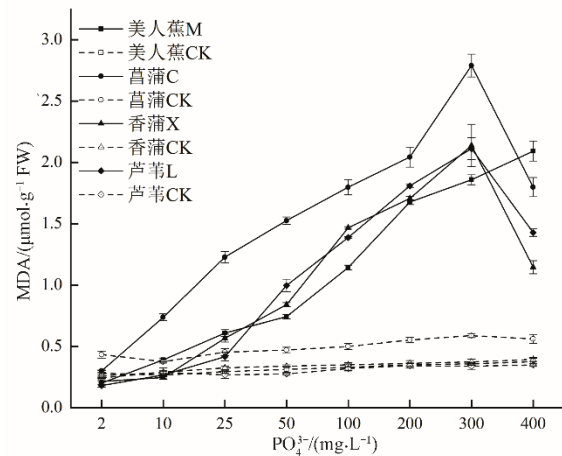


图4 植物在高浓度磷胁迫下MDA含量变化

Fig.4 Changes of MDA content in plants under high phosphorus stress

2.3 美人蕉、芦苇在连续增加氮、磷胁迫下生理指标的相关性

选择耐受性表现较好的美人蕉、芦苇进行氮磷胁迫过程中SOD、CAT活性和MDA含量的相关性分析,表3、4显示,美人蕉和芦苇叶片内MDA含量与SOD、CAT活性呈极显著正相关($p < 0.01$)。即当氮磷浓度持续上升,细胞膜脂过氧化程度加强,过氧化产物MDA含量增加;高氮、磷胁迫使SOD、CAT活性增强,

表3 美人蕉在氮、磷胁迫下生理指标相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of physiological indexes of Canna under N and P stress

指标	美人蕉(N)			美人蕉(P)		
	MDA	SOD	CAT	MDA	SOD	CAT
MDA	1.000	0.951**	0.966**	1.000	0.865**	0.834*
SOD		1.000	0.982**		1.000	0.963**
CAT			1.000			1.000

表4 芦苇在氮、磷胁迫下生理指标相关性分析

Tab.4 Correlation analysis of physiological indexes of reed under N and P stress

指标	芦苇(N)			芦苇(P)		
	MDA	SOD	CAT	MDA	SOD	CAT
MDA	1.000	0.981**	0.976**	1.000	0.913**	0.950**
SOD		1.000	0.971**		1.000	0.895**
CAT			1.000			1.000

注: *和**分别代表在0.05级别(双尾)和0.01级别(双尾)相关性显著。植物体清除活性氧自由基的能力增强,有利于缓解细胞膜遭受的损伤,降低MDA含量,但无法完全清除胁迫后增加的活性自由基^[25,26]。

3 讨论与结论

正常代谢中植物自身的抗氧化系统可以控制活性氧(ROS)含量保持在正常范围内,当植物受到外界胁迫时,清除系统无法及时清除多余的ROS,累积的ROS会对植物造成伤害^[24]。本试验结果表明,高浓度氮、磷胁迫会对植物的抗氧化酶系统以及膜脂过氧化产物MDA产生明显的影响。4种挺水植物叶片内MDA积累量随着氮、磷浓度增加先上升后降低且与缺氮、磷对照组呈现显著差异,这与彭博等^[27]在研究钙胁迫对狭叶香蒲的生理影响结果一致。抗氧化系统酶SOD、CAT活性变化规律与MDA含量变化相似。其原因可能是培养液中氮、磷浓度持续增加,使植物受到氮、磷胁迫逐渐加重,植物体内细胞膜脂过氧化加剧,抗氧化酶系统为抵抗逆境胁迫,SOD活性先增加,将高浓度氮、磷胁迫产生的超氧阴离子歧化成 H_2O_2 , H_2O_2 与超氧阴离子共同作用会继续对植物细胞造成氧化伤害。CAT及其他抗氧化酶活性增加将 H_2O_2 脱毒分解成 H_2O 和 O_2 ,从而清除掉细胞膜脂过氧化产物,从一定程度减缓高浓度氮、磷对植物的胁迫,提高了植物的耐受性。但植物保护酶系统对植物的保护是有限度的,当氮、磷浓度超过植物体耐受阈值,酶结构被破坏或酶表达被抑制,使得酶活性下降。

4种挺水植物在高浓度氮、磷胁迫试验中表现出不同的耐受性。在试验周期内,菖蒲、香蒲对20~400 mg/L,美人蕉、芦苇对20~500 mg/L之间的氨氮浓度表现出较稳定的耐受性,菖蒲对2~200 mg/L,美人蕉、芦苇和香蒲对2~300 mg/L之间的磷浓度表现出较稳定的耐受性。氨氮耐受性试验中,美人蕉、香蒲和芦苇试验组SOD活性在第一次取样时均显著低于缺氮对照组,其可能原因是对照组缺乏氮元素,植物受到胁迫,植物体

内的SOD活性上升;但在增加氨氮浓度到50 mg/L后,三种植物受到的高浓度氨氮胁迫作用超过缺氮胁迫,SOD活性逐渐超过对照组。在磷耐受性试验中,试验组SOD、CAT活性在施加2 mg/L的磷培养液时均低于对照组;SOD活性在10、25 mg/L时,除菖蒲外,其余均低于对照组;CAT活性则在25 mg/L时,除芦苇外,其余均高于对照组。其可能原因是照组缺乏磷元素,植物受到低磷胁迫,导致植物体内的SOD、CAT活性上升。4种挺水植物对富营养化水体氮、磷元素的去除效果不同,根据杨子尧等^[28]研究表明,4种植物对磷浓度9.4 mg/L的生活污水去除效果,菖蒲效果最好,美人蕉最差;对氨氮浓度为15.6 mg/L的污水,去除效果为:芦苇>香蒲>美人蕉>菖蒲,这表明在耐受范围内,不同植物去除氮磷效果也存在差异。因此在处理高浓度氮、磷元素的污染水体时,既要考虑植物的耐受性,也要考虑植物对氮、磷元素去除效果^[29]。

除了胁迫浓度,胁迫时间也可能会影响抗氧化系统酶活性。当外界胁迫超出植物耐受范围,抗氧化酶防御系统就会受到损伤,抗氧化酶活性即会持续下降,也就是说,当胁迫浓度或胁迫时间未达到耐受阈值时,酶活性会受外界刺激而上升,一旦超过耐受阈值,酶活性则会持续下降。本次试验是人工模拟连续高浓度氮磷污染条件,不同胁迫时间下植物耐受性还需要进一步探究。

4 结 论

(1)随着氮、磷浓度增大,4种挺水植物SOD、CAT活性及MDA含量逐渐升高,当氮磷浓度超出植物耐受范围,SOD、CAT活性及MDA含量开始下降。

(2)4种挺水植物氨氮耐受范围:菖蒲、香蒲:20~400 mg/L,美人蕉、芦苇:20~500 mg/L。

(3)4种挺水植物磷耐受范围:菖蒲:2~200 mg/L,美人蕉、芦苇和香蒲:2~300 mg/L。

(4)耐受性表现较好的美人蕉、芦苇在连续高浓度氮、磷胁迫时叶片内MDA含量与SOD、CAT活性呈极显著正相关($p < 0.01$)。 □

参考文献:

- [1] 朱颖,马骏,陈睿哲.富营养化的湖泊[J].生态经济,2018,34(12):6-9.
- [2] 向鹏,朱士江,徐文,等.水质营养盐分布规律及水质现状分析[J].安徽农业科学,2020,48(7):100-103.
- [3] 张熙灵,王立新,刘华民,等.芦苇、香蒲和蘆草3种挺水植物的养分吸收动力学[J].生态学报,2014,34(9):2238-2245.
- [4] 张德喜.不同人工湿地植物对生活污水净化效果研究[J].基因组学与应用生物学,2018,37(4):1621-1628.
- [5] 任文君,田在锋,宁国辉,等.4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究[J].生态环境学报,2011,20(2):345-352.
- [6] 刘霄,唐婷芳子,黄岁樑,等.4种湿地植物的生长特性和污水净化效果研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2013,28(3):392-399.
- [7] 杜秀敏,殷文璇,赵彦修,等.植物中活性氧的产生及清除机制[J].生物工程学报,2001(2):121-125.
- [8] 陈天,刘云根,王妍,等.外源磷对砷胁迫下挺水植物抗氧化酶系统的影响[J].江苏农业学报,2019,35(5):1040-1046.
- [9] 薛鑫,张芊,吴金霞.植物体内活性氧的研究及其在植物抗逆方面的应用[J].生物技术通报,2013(10):6-11.
- [10] KUMAR S G, MADHUSUDHAN K V, SREENIVASULU N, et al. Stress responses in two genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity [J]. Indian journal of experimental biology, 2000,38(2).
- [11] 张雪,李强,余宏军,等.氮胁迫对黄瓜幼苗抗氧化酶系统的影响[J].农业工程学报,2016,32(增刊2):142-147.
- [12] 马建华,王玉国,孙毅,等.低磷胁迫对不同品种高粱苗期形态及生理指标的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1083-1091.
- [13] 欧阳泽怡,陈雯彬,欧阳硕龙,等.低磷胁迫对赤皮青冈幼苗叶片生理指标的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(1):69-79.
- [14] 张楚,张永清,路之娟,等.低氮胁迫对不同苦荞品种苗期生长和根系生理特征的影响[J].西北植物学报,2017,37(7):1331-1339.
- [15] 于姣姐,夏丽丹,殷丹阳,等.磷素对杉木幼苗耐铝性的影响机制[J].林业科学,2018,54(5):36-47.
- [16] AGNIHOTRI R K, SINGH G, SINGH D K, et al. Lead-and nickel-Induced Heavy-Metal Toxicity in *Vigna mungo* L. Seedlings and Detoxification through Exogenous Nitrogen Application [J]. Journal of Functional And Environmental Botany, 2015,5(1).
- [17] 万志刚,顾福根,孙丙耀,等.6种水生维管束植物对氮和磷的耐受性分析[J].淡水渔业,2006(4):37-40.
- [18] 郑洁敏,牛天新,陈煜初,等.三十九种观赏挺水植物应用于人工浮岛水质净化潜力的比较[J].北方园艺,2013(6):72-76.
- [19] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006:276-277,286-287.
- [20] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2002:120-121.
- [21] 马旭俊,朱大海.植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J].遗传,2003(2):225-231.
- [22] 窦俊辉,喻树迅,范术丽,等.SOD与植物胁迫抗性[J].分子植物育种,2010,8(2):359-364.
- [23] 王启明.干旱胁迫对大豆苗期叶片保护酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J].农业环境科学学报,2006(4):918-921.
- [24] 李翠,温海峰,郑瑞伦,等.阿特拉津胁迫对菖蒲的生理毒性效应[J].农业环境科学学报,2016,35(10):1895-1902.
- [25] 张蕊,王艺,金国庆,等.模拟氮沉降对低磷胁迫下3个种源木荷幼苗生长及叶片氮磷含量的影响[J].林业科学,2015,51(4):36-43.
- [26] 罗梓琼,王慧,陈铭,等.干旱胁迫对4个油茶品种苗木生理生化指标的影响[J].经济林研究,2019,37(2):104-113.
- [27] 彭博,徐鸣洲,王妍,等.钙胁迫对狭叶香蒲的生长及逆境生理指标的影响[J].西部林业科学,2020,49(4):163-170.
- [28] 杨子尧.四川盆地以本土湿地植物处理农村生活污水研究及工程实例[J].湖北农业科学,2014,53(13):3043-3047.
- [29] 樊开青,王其娟,汪伟.5种挺水植物净化富营养化水体氮磷效果的比较[J].江苏农业科学,2011,39(6):598-599.