

外源脱落酸对湿地植物美人蕉抗寒性的影响

陈金梅 褚一凡 谭启洋 刘伟 杨玲丽 黄涛 吴振斌 贺锋

STUDY ON INCREASE OF THE COLD RESISTANCE AND OVERWINTERING EFFECT OF *CANNA INDICA* LINN IN CONSTRUCTED WETLAND BY ABSCISIC ACID

CHEN Jin-Mei, CHU Yi-Fan, TAN Qi-Yang, LIU Wei, YANG Lin-Li, HUANG Tao, WU Zhen-Bin, HE Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.180>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

辐照提高人工湿地美人蕉抗寒性及其越冬效果研究

STUDY ON INCREASE OF THE COLD RESISTANCE AND OVERWINTERING EFFECT OF *CANNA INDICA* LINN IN CONSTRUCTED WETLAND BY IRRADIATION

水生生物学报. 2019, 43(1): 173–180 <https://doi.org/10.7541/2019.021>

人工湿地-微生物燃料电池耦合系统缓解生物堵塞试验研究

STUDY ON RELIEVING BIO-CLOGGING WITH THE HYBRID SYSTEM OF CONSTRUCTED WETLAND AND MICROBIAL FUEL CELL

水生生物学报. 2021, 45(1): 190–196 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.077>

剩余污泥资源化利用新工艺研究进展

THE REVIEW OF NEW TECHNOLOGY ON DISPOSAL OF EXCESS SLUDGE

水生生物学报. 2017, 41(5): 1149–1156 <https://doi.org/10.7541/2017.143>

不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响

THE IMPACT OF DIFFERENT AMOUNT BIOSTIMULANTS SUPPLEMENT ON THE PERFORMANCE OF WATER PURIFICATION IN VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND

水生生物学报. 2019, 43(2): 431–438 <https://doi.org/10.7541/2019.053>

不同湿地模型净水效果与基质酶活性相关性的比较研究

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SUBSTRATE ENZYME ACTIVITY AND WATER PURIFICATION EFFECT IN DIFFERENT WETLAND MICROCOSM

水生生物学报. 2017, 41(3): 692–699 <https://doi.org/10.7541/2017.87>

黄腐酸对单针藻生长和油脂含量的影响

EFFECT OF FULVIC ACID ON THE GROWTH AND LIPID ACCUMULATION OF OLEAGINOUS MICROALGA *MONORAPHIDIUM* SP. FXY-10

水生生物学报. 2017, 41(2): 437–442 <https://doi.org/10.7541/2017.54>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.180

外源脱落酸对湿地植物美人蕉抗寒性的影响

陈金梅^{1,2} 褚一凡^{1,2} 谭启洋^{1,2} 刘伟^{1,2} 杨玲丽^{1,2}
黄涛^{1,2} 吴振斌¹ 贺锋¹

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 低温时植物枯萎导致人工湿地运行效率降低, 研究将脱落酸应用于湿地植物, 以期提高其抗寒性。采用 0、5、10、15、20 和 25 mg/L 的脱落酸(ABA)对美人蕉(*Canna indica* L.)幼苗叶面进行喷施并进行阶段性降温培养, 评价各组在 0℃ 时的抗寒性, 筛选出最适 ABA 处理浓度。结果表明: 在低温条件下, 经过适宜浓度外源脱落酸预处理组的丙二醛(MDA)、相对电导率显著性低于对照组; 脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量显著高于对照组, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性也有所提高。综合以上指标, 认为 15 mg/L 脱落酸处理为最佳。随后将其应用于人工湿地, 对其冬季净化效果进行评估。结果发现, 15 mg/L 脱落酸预处理可使人工湿地的冬季 TP、TN 和 COD 去除率显著高于对照组($P < 0.05$)。由此可见, 一定浓度的脱落酸预处理能够有效提高美人蕉的抗寒性, 并提高人工湿地冬季净化效果。

关键词: 美人蕉; 抗寒性; 人工湿地; 脱落酸

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)06-1264-09



人工湿地是人工建造的, 通过基质、植物和微生物的物理、化学、生物三重协同作用来净化污水的一种技术^[1]。植物作为人工湿地重要组成部分之一, 不仅能摄取利用污水中营养物、吸收富集有毒有害物质, 还具有传输氧气、强化根际微生物、增强和维持介质的水利传输等作用。然而植物在人工湿地污水净化过程中的作用与其生长状况密切相关, 在气温低下的冬天, 植物进入休眠期甚至枯萎死亡, 不能在湿地系统中充分发挥其功能, 从而导致人工湿地系统在冬季净化效果下降。

目前现有的提高湿地植物的抗寒性方法主要有天然植物的抗寒性筛选^[2, 3]、诱变育种^[4, 5]和化学诱导^[6]。本研究采用脱落酸处理湿地植物, 以期提升其抗寒性能。脱落酸(Abscissic acid, ABA)作为植物五大激素之一, 是一种存在于植物体内的具有倍半萜结构的内源激素。有研究表明^[7], ABA 作为重要的逆境信号分子, 可诱导抗寒基因发挥作用,

即, 当植物遭受低温胁迫时, 植物体内 ABA 会迅速累积, 启动或诱导植物自身抗寒基因的表达, 参与低温胁迫信号传导途径, 从而使植物更快适应寒冷。ABA 参与的抗寒过程一般分为 3 种: 一种是 ABA 依赖途径, 主要受转录因子和 ABRE 的调控^[8, 9], 如 PYR/PYL/RCARs (受体)、PP2C (负调控) 和 SnRK2s (正调控); 另外逆境诱导基因 RD28 和 RD29 等也受 ABA 调控; 第二种是非 ABA 依赖途径, 然而 ABA 的信号传导还是会影响到基因的表达, 如 *lti78*; 第三种是 ABA 与低温协同作用下才进行表达的基因, 例如 *cor47* 基因在经外源 ABA 处理后, 表达量有所升高^[10, 11]。由于研究 ABA 的相关生理过程可反映植物的抗逆机理, 揭示其应答基因及表达蛋白, 可定向增强作物对环境的适应力, 故被广泛应用于园艺和农业生产的抗寒性^[12, 13]、抗旱性^[14, 15]、盐胁迫^[14]及沉水植物的金属胁迫^[16, 17]中。综上所述, 适宜浓度下的外源脱落酸预处理可增强植物抗

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51709254和51709255); 江西省重点研发计划(20171BBH80018); 江西省水利科技项目(KT201737)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (51709254 and 51709255)]; Key Research and Development Project of Jiangxi Province (20171BBH80018); the Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangxi Province (KT201737)]

作者简介: 陈金梅(1995—), 女, 硕士研究生; 研究方向为人工湿地。E-mail: 2436184652@qq.com

通信作者: 贺锋, 研究员; 主要从事水处理技术及水体生态修复研究。E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

逆生物效应, 但其在湿地植物领域的研究还未见报道。因此, 本研究拟将外源脱落酸应用于湿地植物美人蕉上探究其在低温状态下的生理响应。

美人蕉(*Canna indica* L.)属多年生热带和亚热带植物, 喜温, 抗寒能力差, 生物量大, 适应力强, 根系发达, 被广泛应用于长江中下游的人工湿地系统中。时至今日, 已有学者对提高湿地植物的抗寒性进行大量探索, 但尚未探究外源脱落酸对湿地植物美人蕉耐寒性的影响。故本研究将采用不同浓度ABA处理美人蕉幼苗的叶片, 通过测定其抗寒指标的变化, 确定最适宜的脱落酸施用浓度, 再将其应用于人工湿地小试系统中, 探究适宜浓度的外源ABA对美人蕉植物本身抗寒能力的影响及其对自然冬季条件下人工湿地水质的反馈效果, 为突破湿地系统低温运行瓶颈提供新思路。

1 材料与方法

1.1 植物处理与方法

红花美人蕉幼苗来自于中国科学院水生生物研究所官桥研究基地, 取长势相近的美人蕉幼苗移植于塑料盆中, 幼苗高度为30—50 cm, 从基地移栽后在恒温室进行14d的缓苗期, 待长势稳定后, 放入低温光照培养箱中, 每组设置3个平行, 均重复实验3次。

试验设6个处理组, 为0、5、10、15、20和25 mg/L ABA, 对照组(CK)为0 mg/L ABA美人蕉幼苗组。为模拟自然降温及日夜温差等因素, 本实验采取阶段性降温培养, 低温光照培养各阶段的温度梯度设置为昼/夜20℃/18℃、15℃/13℃、10℃/8℃、5℃/3℃和0℃/0℃, 光照参数为2300 lx, 8h。每个温度持续3d, 3d后自动降至下一梯度, 且在温度梯度切换时喷施一次相应浓度ABA至叶面完全浸湿, 于0℃时采集植株顶部从上往下第2至第3位叶, 液氮冷冻保存于-80℃冰箱中, 留存并测定其相关生理生化指标。

1.2 植物生理生化指标测定

各项生理生化指标的测定参照李合生等^[18-20], 相对电导率采用电导法, 丙二醛测定采用硫代巴比妥酸法, 脯氨酸采用茚三酮显色法, 总可溶性糖采用蒽酮-硫酸比色法, 可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝G-250法, SOD测定采用氮蓝四唑法, CAT测定采用过氧化氢比色法, POD采用愈创木酚法, 叶绿素测定采用乙醇法。

1.3 实验装置与方法

本研究采用垂直流人工湿地, 装置为内径200 mm、管高870 mm的PVC管, 装置内填充基质依次为100 mm高的粒径为5—8 mm粗砾石、300 mm

高的粒径为2—4 mm细砾石和200 mm高的粒径为0.5—1 mm石英砂(图1)。装置正式运行时间为2019年12月至2020年1月, 采取自然降温模式, 装置设3个平行, 组别分别为无植物组(A组)、植物对照组(B组)和ABA喷施处理组(C组), 植物对照组和ABA喷施处理组各种植一株红花美人蕉, 种植深度10 cm。进水采用自配水, 配方如下: 蛋白胨80 g/m³、牛肉膏55 g/m³、葡萄糖100 g/m³、NaCl 3.5 g/m³、NH₄Cl 28.5 g/m³、CaCl₂ 2 g/m³、MgSO₄ 1 g/m³和K₂HPO₄ 19 g/m³。主要指标含量为COD_{Cr} (211.6±37.6) mg/L、TN (28.07±1.83) mg/L和TP (2.62±0.25) mg/L。

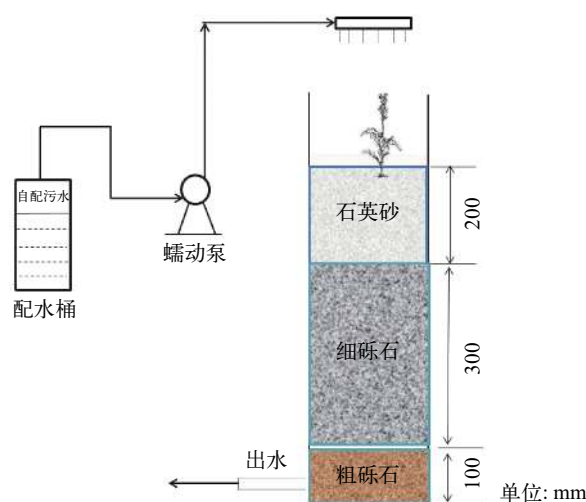


图1 试验装置图

Fig. 1 Illustration of test installation

1.4 数据分析

采用SPSS 17.0单因素方差分析对植物生理生化指标进行统计分析, 采用SPSS 17.0单因素方差分析对人工湿地各处理组和对照组的去除率进行统计分析, 各分析的显著性水平为 $P<0.05$, 并用Origin8进行绘图。

2 结果

2.1 0℃时各处理组生理指标含量变化的情况

细胞膜系统丙二醛(MDA)、相对电导率含量的变化由图2可以看出, MDA各组之间均有显著性差异($P<0.05$), 其中15 mg/L脱落酸处理的美人蕉幼苗的MDA相比对照组降低了50.24%。此外, 在0℃时(图3), 相对电导率各处理组与对照组之间均有显著性差异($P<0.05$), 但各处理组之间无显著性差异。

在低温条件下, 相比于对照组, 15和20 mg/L的ABA处理组显著地增加脯氨酸在美人蕉幼苗叶

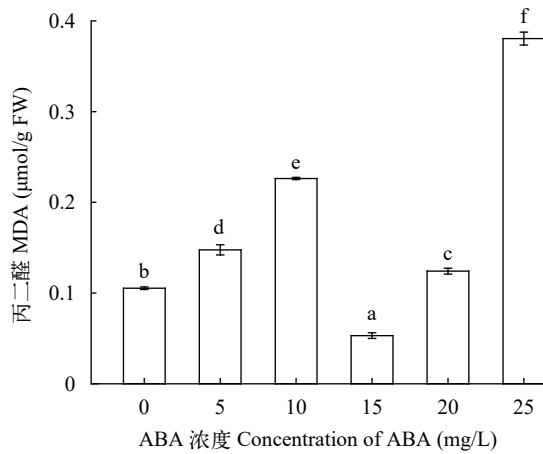


图2 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片丙二醛的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of ABA on malondialdehyde in *Canna indica* L. at 0°C

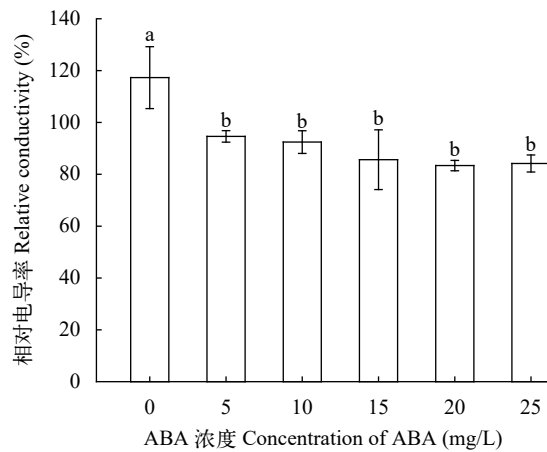


图3 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片相对电导率的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of ABA on relative conductivity in *Canna indica* L. at 0°C

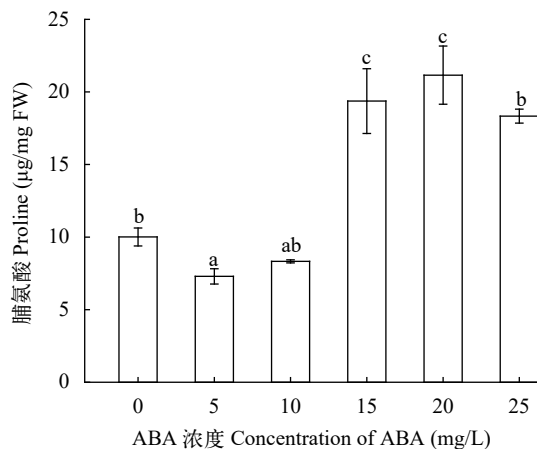


图4 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片脯氨酸的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of ABA on proline content in *Canna indica* L. at 0°C

片中的含量($P<0.05$), 相较于对照组增加到2.113倍(图4), 15 mg/L的ABA处理组显著地增加蛋白质在美人蕉幼苗叶片中的含量, 且相较于对照组增加到2.01倍(图5)。此外, 10 mg/L的ABA处理组显著地增加可溶性糖在美人蕉幼苗叶片中的含量, 相比于对照组增加到3.095倍(图6)。

抗氧化酶活性的变化由图7可以看出, 0℃时经ABA处理的美人蕉幼苗与对照组相比均有显著性提高, 且10 mg/L处理组尤为显著($P<0.05$)。POD酶规律性不强, 只有在25 mg/L处理组下才与对照组有显著性差异(图8)。CAT酶也可反映植物的抗逆性, 但在本实验中与对照组无显著性差异(图9)。

叶绿素含量变化由图10可以看出, 10、15、20和25 mg/L的ABA处理组相比对照组均有显著

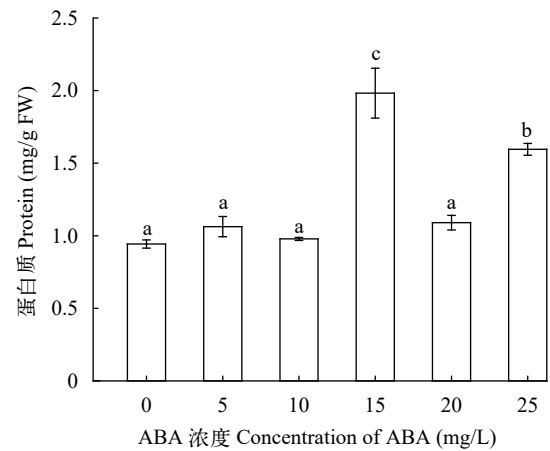


图5 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片蛋白质的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of ABA on soluble protein content in *Canna indica* L. at 0°C

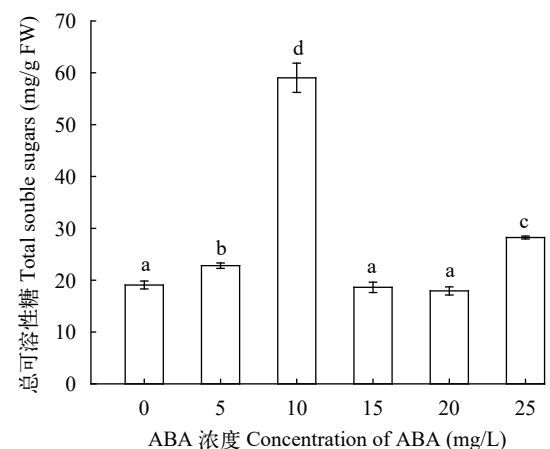


图6 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片总可溶性糖的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of ABA on total soluble sugar content in *Canna indica* L. at 0°C

性提高($P<0.05$), 其中经15 mg/L ABA处理组与对照组相比, 可将植物叶片中的叶绿素提高1.8倍。

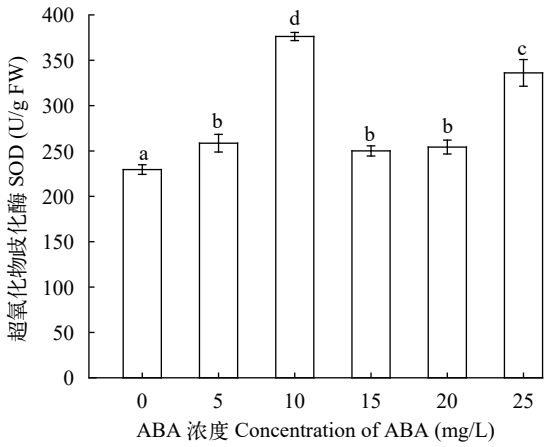


图 7 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片SOD的影响

Fig. 7 Effects of different concentrations of ABA on activities of SOD in *Canna indica* L. at 0°C

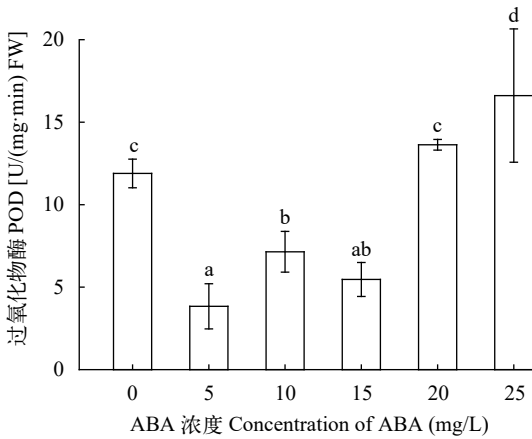


图 8 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片POD的影响

Fig. 8 Effects of different concentrations of ABA on activities of POD in *Canna indica* L. at 0°C

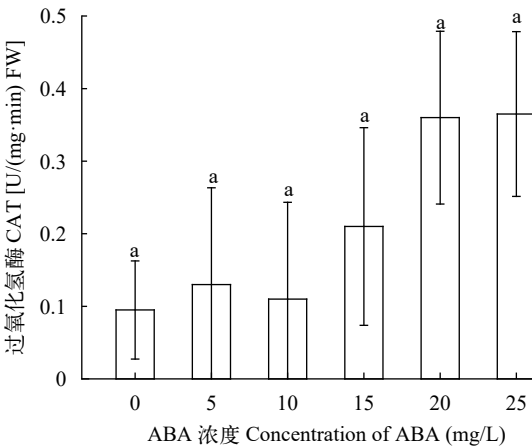


图 9 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶片CAT的影响

Fig. 9 Effects of different concentrations of ABA on activities of CAT in *Canna indica* L. at 0°C

2.2 人工湿地系统冬季运行效果

表 1 所示为人工湿地运行在冬季运行期间的采

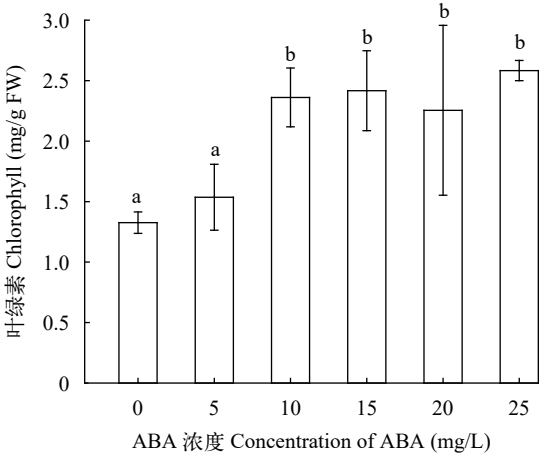


图 10 0℃时不同浓度ABA对美人蕉叶绿素的影响

Fig. 10 Effects of different concentrations of ABA on chlorophyll in *Canna indica* L. at 0°C

表 1 冬季应用试验期间温度实测结果

Tab. 1 Illustration of temperature measurement during winter			
序号 Number	采样日期 Sampling date	最高温度 The hottest temperature (°C)	最低温度 The lowest temperature (°C)
1	12月11日	19	1
2	12月15日	15	9
3	12月19日	10	1
4	12月23日	10	6
5	12月27日	12	0
6	12月31日	6	-1
7	1月4日	10	6
8	1月8日	6	0
9	1月12日	7	-1
10	1月16日	5	0

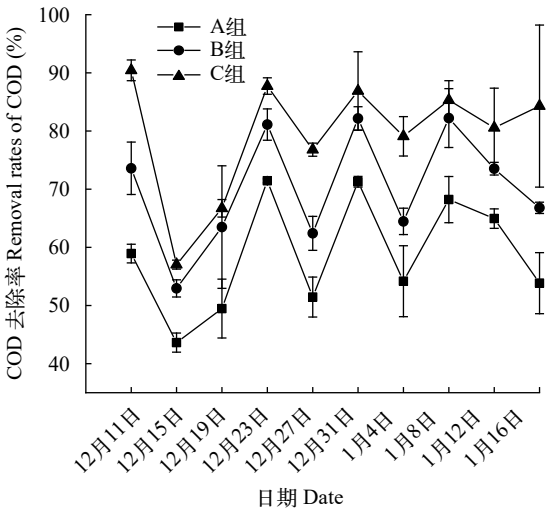


图 11 冬季COD去除率趋势图

Fig. 11 Removal rates of COD in winter

样时间及当日的最低最高温度统计结果,运行期间的COD、TP和TN去除率测定结果如图11—13所示。

由COD去除率结果可知,A组(无植物组)COD去除率为58.73%,B组(植物对照组)去除率为70.27%,C组(ABA喷施组)去除率79.49%,三组间COD去除率有显著性差异($P<0.05$)。对TP去除率分析可知,A组去除率为23.69%,B组去除率为35.34%,C组去除率30.98%,有植物组显著高于无植物组($P<0.05$),但植物对照组与ABA喷施组无显著性差异,这可能与冬季植物未完全枯萎相关。由图13可知,A组去除率为26.67%,B组去除率为32.68%,C组去除率41.16%,在试验前期,三组TN去

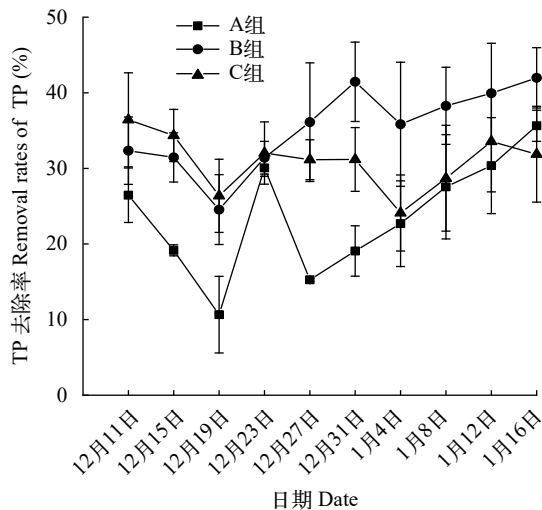


图12 冬季TP去除率趋势图

Fig. 12 Removal rates of TP in winter

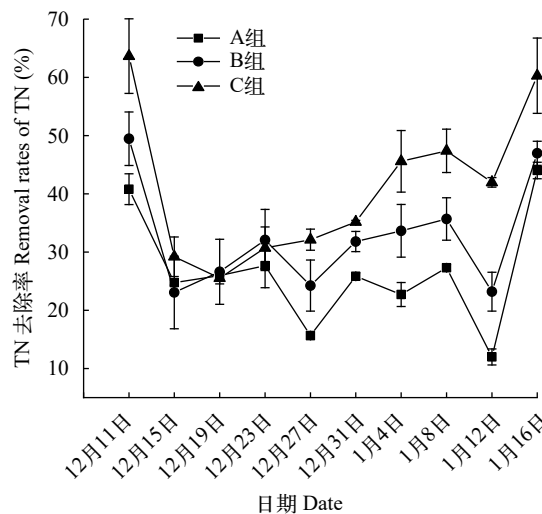


图13 冬季TN去除率趋势图

Fig. 13 Removal rates of TN in winter

除率没有显著性差异且处于较平稳状态,到后期,植物长势较好的组TN的去除率显著高于无植物组。

3 讨论

3.1 各处理组抗寒性比较分析

在高等植物体内,细胞膜系统最容易受到低温迫害。低温会影响膜的通透性,从而使细胞膜受损,根据文献调研,相对电导率也与膜损伤程度呈正比^[21-23]。在逆境胁迫下,植物体内原有的自由基平衡被破坏,多余的自由基会引发或加剧膜脂过氧化作用^[24]。膜脂氧化的主要产物之一丙二醛(MDA),其积累会对植物细胞膜造成一定伤害,因为它会和与蛋白质、核酸结合,抑制相关蛋白质的合成,甚至可以减弱纤维素分子间的桥键连接^[19, 20, 24]。在对水稻^[25]、油棕^[26]和甘蔗^[27]等的研究中发现,在外源ABA处理下,植物体内中的MDA积累量和相对电导率均降低,进而减轻低温对细胞膜的胁迫作用^[28]。在本实验研究中也有相似结论,0℃时外施脱落酸通过降低相对电导率及丙二醛含量减缓低温胁迫给膜结构带来的损伤,维持膜正常生理功能,诱导抗寒基因表达,从而增强植物抗冷性。究其原因,推测是外源ABA可提高水分由根系向叶片输送效率,提高细胞膜透性,从而使膜的稳定性增加以减少电解质的渗漏,此外,ABA还可诱导有关基因表达进而提高植物对寒冷的抵抗能力^[27, 29]。由图2可知,MDA浓度随ABA浓度呈现先增后降再升的趋势,推测低浓度或高浓度的ABA预处理会加重寒害对植物叶片细胞膜的损伤,据图3可知,相对电导率在所选浓度区间呈现相似的效果,据文献^[22, 23]可知,ABA对细胞膜有一定的保护作用,但针对不同植物其对相对电导率的处理敏感度较低,效果一般,而适宜浓度下更能缓解膜脂氧化程度,故需要多个生理生化指标来综合判断。

在低温胁迫下,植物细胞通过积累一些渗透调节物质来缓解低温对植物本身造成的伤害^[30-32]。其中,参与相关过程的渗透调节物质有脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖,一方面可保护蛋白质分子来缓解低温胁迫对细胞伤害,另一方面启动植株体内的抗寒机制,诱导合成相关蛋白质,形成脱落酸等物质^[28, 33-35]。以往的研究结果表明,施加外源ABA可通过提高植物体中可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸等渗透调节物质的含量来增强植物的抗寒性,并使其逐渐适应低温环境^[33, 36]。在本实验中,在0℃时,ABA浓度与可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖含量整体均呈现低促高抑的趋势,这说明在适宜浓度的ABA预处理下,美人蕉幼苗体内通过

调节渗透物质来平衡细胞内外物质, 此外细胞膜的稳定性也会大大增强, 进而提高美人蕉幼苗对低温的抵抗能力^[21]。

低温会降低植物对 O₂ 的利用能力, 打破植物体内的活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)平衡, 过量的ROS会攻击细胞大分子, 引起一系列有害的生化反应, 造成蛋白质损伤、脂质过氧化、DNA 突变和酶失活等, 进而损伤植株^[24, 37-39]。在本研究中, SOD、POD和CAT未见明显的规律性, 这一现象的产生可能与美人蕉响应低温胁迫的不同途径有关, 也可能是ABA预处理对该系统的效果不显著或者是美人蕉物种与其他物种间响应机制的差别, 尚需进一步研究, 但此结果与前人在茶叶叶片^[36]、玉米幼苗^[40]和橡胶树芽^[41]等中的研究结论相符。

叶绿素是作物进行光合作用的主要物质, 是植物所有生命活动的基础。低温胁迫会使叶绿素合成受阻, 且低温胁迫时间越长, 叶绿素含量越少, 伴随着叶绿素含量的降低, 叶片光合作用也随之衰退^[42]。研究表明, 造成叶绿素含量减少的原因有很多, 一部分学者^[35, 43-45]认为, 低温使原有叶绿素受到破坏是叶绿素含量减少的主要原因; 另一部分学者^[46]则认为叶绿素含量的下降主要是因为低温限制了叶绿素的合成。而逮明辉等^[47]认为在低温下叶片的叶绿素降解加剧, 合成能力降低, 才是导致叶绿素总含量下降的主要原因。本研究发现, 适宜浓度的脱落酸应用可以提高低温胁迫下美人蕉叶片中叶绿素含量, Wang 等^[48]认为被植物色素A(phyA)和phyB感知到的远红光(FR)和红光(R)分别正向和负向调节番茄的耐寒性, 这种调节有关脱落酸(ABA)和茉莉酸(JA)等植物激素及ABA和JA相关基因相关, 而此种响应在水稻^[49]和Bermudagrass^[50]中也有发现。

3.2 人工湿地低温状态下净化效果比较分析

有研究认为, 人工湿地即使在冬季低温下仍对COD有较好的去除率^[51]。本研究证明, 植物确实可显著提高湿地对COD的去除, 且植物在冬季长势越好, 存活时间越久, COD的去除效率就越高, 这与华昇等^[52]研究结果相符。湿地植物在生长过程中的营养来源是污水中的无机氮^[53], 已有研究表明, 不同湿地植物对TN的吸收量仅占人工湿地TN去除量的0.6%—17.3%^[54], 本实验也可看出在寒冷的冬季, 人工湿地的TN的去除率偏低, 植物的对N的同化吸收确实可以在一定程度上提高冬季湿地的运行效果。众多学者认为, TN的去除率因季节原因波动较大^[55], 夏季TP的去除率比冬季高6.1%—

34.0%^[56]。而本实验结果表明, 植物耐寒性的提高对人工湿地中TN的去除率影响较小, 推测是因为植物对磷的去除起小部分作用, 主要还是靠基质的吸附和微生物的作用。

4 结论

在低温胁迫下, 一定浓度的外源脱落酸预处理使美人蕉叶片中的叶绿素、脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量升高, 丙二醛含量和相对电导率降低, 但SOD、POD和CAT未见明显的规律性, 综合各项生理生化指标及表现现象, 适宜的ABA处理浓度为15 mg/L。用15 mg/L的脱落酸对美人蕉幼苗进行预处理时可显著提高人工湿地冬季TN、COD和TP去除率。

参考文献:

- [1] Wu Z B. Integrated Vertical-flow Constructed Wetland [M]. Beijing: Science Press: 2008: 394 [吴振斌. 复合垂直流人工湿地 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 394.]
- [2] Tang H H. Status of constructed wetland wastewater treatment in chongqing villages and selection of cold-resistant wetland plants [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 3. [汤红花. 重庆乡镇污水人工湿地处理现状及耐寒植物筛选研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 3.]
- [3] Zhang Xin. Cold resistance study on 5 species of constructed wetland plants in Shanxi Province [J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*. 2017, 46(3): 10-13. [张欣, 5种人工湿地植物在山西省的抗寒性研究 [J]. 山西林业科技, 2017, 46(3): 10-13.]
- [4] Zheng W P, Tong W J, Ma L, et al. Study on increase of the cold resistance and overwintering effect of *Canna indica* Linn in constructed wetland by irradiation [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(1): 173-180. [郑文萍, 童伟军, 马琳, 等. 辐照提高人工湿地美人蕉抗寒性及其越冬效果研究 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(1): 173-180.]
- [5] D. Xu, Y. Wu, Y. Li, et al. Influence of UV radiation on chlorophyll, and antioxidant enzymes of wetland plants in different types of constructed wetland [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014(21): 10108-10119.
- [6] Liang X. Improvement on the cold resistance of wetland plants with exogenous induced treatment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 6. [梁雪. 外源诱导提高湿地植物抗寒性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 6.]
- [7] Liu J J, Wang H L. Research progress on the tolerance of abscisic acid in plants to abiotic stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(16): 11-12. [刘娟娟, 汪惠丽. 植物中脱落酸对非生物胁迫的耐受性研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(16): 11-12.]
- [8] Yang T W, Wang H X, Liu T X. Isolation and expression of a novel cold-regulated cDNA from *Brassica pekinensis* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(2): 215-222.
- [9] Liu N, Exogenous ABA Regulates the Expression of

- bZIPs Transcription Factors in Winter Wheat at Low Temperature [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 6. [刘楠. 外源ABA对低温下冬小麦bZIPs转录因子的表达调控 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 6.]
- [10] Schweighofer A, Hirt H, Meskiene I. Plant PP2C Phosphatases: Emerging Functions in Stress Signaling [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(5): 236-243.
- [11] Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K. Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross-talk between two stress signaling pathways [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3(3): 217-223.
- [12] Li X L, Pang H Y, Niu D W, *et al.* Effect of different exogenous hormones on cold-resistant ability and related physiological indicators of plum flower [J]. *Northern Horticulture*, 2017(11): 17-22. [李学玲, 庞海颖, 牛东伟, 等. 不同外源激素对李花抗寒性及相关生理指标的影响 [J]. 北方园艺, 2017(11): 17-22.]
- [13] Chen Q, Yuan J H, Sun W C, *et al.* Leaf photosynthetic and endogenous hormones of spring and winter rapa (*Brassica rapa* L.) under low temperature [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(1): 37-46. [陈奇, 袁金海, 孙万仓, 等. 低温胁迫下白菜型冬油菜与春油菜叶片光合特性及内源激素变化 [J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(1): 37-46.]
- [14] Xu L, Wang Y Y, Ye K W, *et al.* Effect of ABA and NO on improving drought tolerance of *Zea mays* L. at seedling stage by *Piriformospora indica* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(9): 2939-2947. [徐乐, 汪媛媛, 叶开温, 等. ABA和NO在印度梨形孢提高玉米苗期抗旱性的作用 [J]. 分子植物育种, 2018, 16(9): 2939-2947.]
- [15] Zhu C L, Liu Z G, Shi B, *et al.* Effect of exogenous abscisic acid on drought resistance of acer rubrum seedlings [J]. *Forestry Science & Technology*, 2019, 44(3): 18-21. [祝长龙, 刘占国, 施冰, 等. 外源脱落酸对干旱胁迫下美国红枫抗旱性的影响 [J]. 林业科技, 2019, 44(3): 18-21.]
- [16] Zhang H Y. Effects of exogenous hormone on physiological characteristics of cucumber seedling under salt stress [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018, 285(3): 38-41. [张环宇. 盐胁迫下外源激素对黄瓜幼苗生理特性的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2018, 285(3): 38-41.]
- [17] Zhang H. Alleviating effects of abscisic acid on heavy metal stress of several aquatic plants [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008: 12-38. [张慧. 脱落酸对几种水生植物重金属胁迫的缓解效应 [D]. 南京师范大学, 2008: 12-38.]
- [18] Li H S. Plant Physiological and Biochemical Principles and Techniques [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 278. [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: 278.]
- [19] Ma L T, Chen S L, Li Y C. The Influence of Low Temperature Stress on the Cold-resistance Physiological Indexes of *Guadua amplexifolia* [J]. *Forest Research*, 2008, 21(2): 235-238. [马兰涛, 陈双林, 李迎春. 低温胁迫对 *Guadua amplexifolia* 抗寒性生理指标的影响 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 235-238.]
- [20] Wei A Z, Yang T X, Zhang R, *et al.* Cold-resistant Ability of Kernel Apricot Induced by Cold-resistant Agents during Flower Period [J]. *Acta Bot Boreal*, 2008, 28(3): 535-541. [魏安智, 杨途熙, 张睿, 等. 抗寒剂诱导仁用杏花期抗寒力研究 [J]. 西北植物学报, 2008, 28(3): 535-541.]
- [21] Guo N N, Chen X L, Zhang J, *et al.* Effects of different exogenous compounds on cold resistance of maize seedlings [J]. *Guihaia*, 2017, 37(4): 504-510. [郭楠楠, 陈学林, 张继, 等. 复合外源物质对玉米幼苗抗寒性的影响 [J]. 广西植物, 2017, 37(4): 504-510.]
- [22] Liu J X, Ding H Q, Ding X H. The cold-resistant physiology of red torch turmeric bulbs and the low-temperature protection effect of plant growth regulators [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 149-153. [刘建新, 丁华桥, 徐笑寒. 红火炬郁金种球的抗寒生理及植物生长调节剂的低温保护效果 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 149-153.]
- [23] Liu J X, Ding H Q, Ding X H. Physiological and biochemical characteristics of *Curcuma alismatifolia* bulbs and effects of some chemicals on its cold resistance [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(4): 575-582. [刘建新, 徐笑寒, 丁华桥. 姜荷花种球抗寒生理生化特征及促抗寒药剂效果 [J]. 浙江农业学报, 2017, 29(4): 575-582.]
- [24] Wang L R, Xue Y Z, Chang M H, *et al.* Effects of exogenous hormones on cold resistant physiological index of kernel Apricot [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(2): 396-403. [王连荣, 薛拥志, 常美花, 等. 外源激素对杏扁抗寒生理指标的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30(2): 396-403.]
- [25] XIANG H T, WANG T T, ZHENG D F, *et al.* ABA pretreatment enhances the chilling tolerance of a chilling-sensitive rice cultivar [J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2017, 40(4): 853-860.
- [26] Liu Y J, Zhou L X, Cao H X. Effects of exogenous ABA on physiology of 4 oil palm new varieties under cold stress [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(6): 1-14. [刘艳菊, 周丽霞, 曹红星. 低温胁迫下不同浓度ABA对4个油棕新品种幼苗生理特性的影响 [J]. 热带作物学报, 2020, 41(6): 1-14.]
- [27] Huang X, Chen M H, Yang L T, *et al.* Effects of exogenous abscisic acid on cell membrane and endogenous hormones contents in leaves of sugarcane seedling under cold stress [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013(4): 6-11. [黄杏, 陈明辉, 杨丽涛, 等. 低温胁迫下外源ABA对甘蔗幼苗抗寒性及内源激素的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2013(4): 6-11.]
- [28] Zhou L, Shen J Z, Duan Y, *et al.* Effects of Exogenous Abscisic Acid on Physiological Indexes of *Camellia Sinensis* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(12): 102-108. [周琳, 申加枝, 段玉, 等. 外源脱落酸对茶树生理指标的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 102-108.]
- [29] Shi C J, Liu Y, Jing T. Review on Stress-resistance of phytohormone [J]. *World Forestry Research*, 2006, 19(5): 21-26. [师晨娟, 刘勇, 荆涛. 植物激素抗逆性研究进展 [J]. 世界林业研究, 2006, 19(5): 21-26.]
- [30] Huang Y H, Luo H L, Chen X F. Effect of brassinosteroid on improving chilling resistance of bitter melon seedlings [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, 42(5): 488-491. [黄玉辉, 罗海玲, 陈小凤. 油菜素内酯对苦瓜幼苗抗冷性的影响 [J]. 南方农业学报, 2011, 42(5): 488-491.]
- [31] Kang Y Y, Yang X, Guo S R, *et al.* Effects of 24-Epi-brassinolide on carbohydrate metabolism and enhancement of tolerance to root-zone hypoxia in cucumber (*Cu-*

- cumis sativus* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(12): 2495-503. [康云艳, 杨暹, 郭世荣, 等. 24-表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗碳水化合物代谢的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(12): 2495-503.]
- [32] Zhao W, Hui Z M, Lin G, *et al.* Effect of selenium on physiological and biochemical indexes of vitis vinifera cv. cabernet sauvignon leaves under water stress [J]. *Journal of Fruit Scienc*, 2011, **28**(6): 984-990. [赵薇, 惠竹梅, 林刚, 等. 硒对水分胁迫下赤霞珠葡萄幼苗叶片生理生化指标的影响 [J]. *果树学报*, 2011, **28**(6): 984-990.]
- [33] He H Y, Tian L P, Xue L. Research progress on physiology and biochemistry of plant cold hardiness [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2007, **13**(2): 10-13. [和红军, 田丽萍, 薛琳. 植物抗寒性生理生化研究进展 [J]. *天津农业科学*, 2007, **13**(2): 10-13.]
- [34] Zhang L F, Regulation of β -ABA on Cold-resistant of Maize Seedling Root under Low Temperature Stress [D]. Harbing: Northeast Agricultural University, 2016: 6. [张丽芳. 低温下 β -ABA调控玉米幼苗根系抗冷性研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 6.]
- [35] Lei Y W, The Regulating Mechanism of Exogenous Nitric Oxide on Cold-resistance of wild Poa [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014: 5. [雷娅伟, 外源NO对野生早熟禾耐寒性的调控机制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 5.]
- [36] Li L, Zhou L, Li Q H, *et al.* Effects of ABA and sodium tungstate on osmoregulation substance content and antioxidant enzyme activity in leaf of *Camellia sinensis* under low temperature [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2016, **25**(4): 18-24. [李磊, 周琳, 李庆会, 等. 低温条件下ABA和钨酸钠对茶树叶片中渗透调节物质含量及抗氧化酶活性的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2016, **25**(4): 18-24.]
- [37] Breusegem F V, Slooten L, Stassart J M, *et al.* Effects of over production of tobacco MnSOD in maize chloroplasts on foliar tolerance to cold and oxidative stress [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, **50**(330): 71-78.
- [38] Li X X, Li G, He Y F, *et al.* Advances in Polymer Antioxidants [J]. *Chemistry Bulletin*, 2011, **74**(4): 316-324. [李晓晓, 李刚, 何玉凤, 等. 高分子抗氧化剂研究进展 [J]. *化学通报*, 2011, **74**(4): 316-324.]
- [39] Dong L, He Y Z, Wang Y L, *et al.* Research Progress on Application of Superoxide Dismutase (SOD) [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, **15**(5): 53-58. [董亮, 何永志, 王远亮, 等. 超氧化物歧化酶(SOD)的应用研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2013, **15**(5): 53-58.]
- [40] Shi R Y, Wang T F, Li J, *et al.* Influences of exogenous ABA on cold resistance of maize seedlings under low temperature stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, **33**(3): 136-143. [石如意, 王腾飞, 李军, 等. 低温胁迫下外源ABA对玉米幼苗抗寒性的影响 [J]. *华北农学报*, 2018, **33**(3): 136-143.]
- [41] Wang J K, Zhang Y Y, Wang L F, *et al.* Improvement of cold resistance of grafted rubber budmng seedlings by ABA pretreatment [J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2016, **40**(3): 16-20. [王纪坤, 张盈盈, 王立丰, 等. 脱落酸预处理提高橡胶树芽接苗期抗寒性的研究 [J]. *热带农业工程*, 2016, **40**(3): 16-20.]
- [42] He J, Liu H X, Wang Y R, *et al.* Low Temperature and Photosynthesis of Plants [J]. *Plant Physiology Communication*, 1986(2): 3-8. [何洁, 刘鸿先, 王以柔, 等. 低温与植物的光合作用 [J]. *植物生理学通讯*, 1986(2): 3-8.]
- [43] Hasselt P R V. Photoinhibition at low temperature in chilling-sensitive and resistant plant [J]. *Acta Bot Neerl*, 1972(21): 539-548.
- [44] Zhang Z W, Hu N J, Gu Z H, *et al.* Effects of fertilizer application patterns on the seedling rape freezing resistance [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, **38**(1): 1-7. [张政文, 胡乃娟, 顾泽海, 等. 肥料运筹对苗期油菜抗冻性的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2015, **38**(1): 1-7.]
- [45] Zhang Y J, Study on the Effect of Various Stress on Brassica chinensis [J]. *Northern Horticulture*, 2009(6): 30-33. [张渝洁. 不同胁迫条件对青菜生理生化指标的影响 [J]. *北方园艺*, 2009(6): 30-33.]
- [46] Friend D J C. The control by state transition of the distribution of excitation energy in photosynthesis [J]. *Physiologia Plantarum*, 1960(13): 776-785.
- [47] Lu M H, Lou Q F, Chen J F. A review on chilling injury and cold tolerance in *Cucumis sativus* L. [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, **21**(5): 575-586. [逮明辉, 娄群峰, 陈尽枫. 黄瓜的冷害及耐冷性 [J]. *植物学通报*, 2004, **21**(5): 575-586.]
- [48] Wang F, Guo Z X, Li H Z, *et al.* Phytochrome A and B function antagonistically to regulate cold tolerance via abscisic Acid-dependent jasmonate signaling [J]. *Plant Physiology*, 2016, **170**(1): 459-471.
- [49] Yang W F, Du Y L, Gu D L, *et al.* Effects of four kinds of regulatory agents on cold-tolerance of rice [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2017, **33**(4): 739-746. [杨文飞, 杜永林, 顾大路, 等. 4种调节物质对水稻耐低温能力的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2017, **33**(4): 739-746.]
- [50] Huang X B, Shi H Y, Hu Z R, *et al.* ABA is involved in regulation of cold stress response in bermudagrass [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**(10): 276-288.
- [51] Huang X F, Xie L L, Lu L J, *et al.* Literature review of winter performance of the constructed wetlands located in low-temperate areas [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, **30**(11): 84-89. [黄翔峰, 谢良林, 陆丽君, 等. 人工湿地在冬季低温地区的应用研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(11): 84-89.]
- [52] Hua S, Chen H, Liu Y G, *et al.* Effects of constructed wetland on the wastewater treatment in different seasons [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(19): 68-72. [华昇, 陈浩, 刘云国, 等. 不同季节人工湿地处理污水效果 [J]. *安徽农业科学*, 2019, **47**(19): 68-72.]
- [53] Wang H Y, Zhao Y Z, Wang W F, *et al.* A review of influencing factors and enhanced measures for nitrogen removal of constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(4): 585-597. [王海燕, 赵远哲, 王文富, 等. 人工湿地脱氮影响因素及强化措施研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(4): 585-597.]
- [54] Li L F, Nian Y G, Jiang G M. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorous removal [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(3): 337-342. [李林峰, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献 [J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(3): 337-342.]
- [55] Gao C, Yang X ER, Xiang L C, *et al.* The effects of pH and temperature on removal of nitrogen and phosphorus

from eutrophicated water by coix lachryma-jobi. L [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(4): 233-238. [高冲, 杨肖娥, 向律成, 等. pH和温度对薏苡植物床去除富营养化水中氮磷的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 233-238.]

[56] Shen H, Hu H Y, Pan Y B. Study on enhanced measures for operation of subsurface flow constructed wetlands in winter [J]. *China Water & Waste Water*, 2007, **23**(5): 44-46. [申欢, 胡洪营, 潘永宝. 潜流式人工湿地冬季运行的强化措施研究 [J]. 中国给水排水, 2007, **23**(5): 44-46.]

STUDY ON INCREASE OF THE COLD RESISTANCE AND OVERWINTERING EFFECT OF *CANNA INDICA* LINN IN CONSTRUCTED WETLAND BY ABSCISIC ACID

CHEN Jin-Mei^{1,2}, CHU Yi-Fan^{1,2}, TAN Qi-Yang^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, YANG Lin-Li^{1,2}, HUANG Tao^{1,2}, WU Zhen-Bin¹ and HE Feng¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Plants are an important part of constructed wetlands, but most wetland plants cannot survive in low temperature environments, and their microbial activity is inhibited, thus limiting the application of constructed wetlands at low temperature. This study explored the role of abscisic acid at 0, 5, 10, 15, 20 and 25 mg/L to improve wetland plants in cold resistance. The results showed that under low temperature conditions, exogenous abscisic acid significantly reduced malondialdehyde (MDA) and relative conductivity, increased the contents of proline, soluble sugar and protein in seedlings, and enhanced SOD, POD and CAT activities with the best effects at 15 mg/L abscisic acid group. Then 15 mg/L abscisic acid was applied to constructed wetlands to evaluate its winter purification effect. 15 mg/L abscisic acid significantly increased the removal rate of TP, TN and COD in constructed wetlands in winter ($P < 0.05$). Thus, abscisic acid can effectively improve the cold resistance of *Canna indica* and improve the purification effect of constructed wetland in winter. This research provides new ideas and solutions for breaking through the bottleneck of low-temperature operation of wetland systems.

Key words: *Canna indica* L.; Cold resistance; Constructed wetlands; Absciscic acid

新期刊 *Water Biology and Security* 上线

由中国科学院水生生物研究所主办, 由Elsevier出版, 聚焦水生生物多样性与保护、水环境与生态安全、渔业与水产品安全等领域的英文期刊 *Water Biology and Security* (简称 *WBS*, ISSN 2772-7351) 于2021年8月顺利上线。在主编桂建芳院士和Robert M. Hughes教授的带领下, *WBS* 期刊旨在打造一个水生生物学相关领域的国际交流平台, 加速国内外科研成果的传播及技术的创新和进步。

WBS 期刊为开放获取期刊, 所有通过同行评审的稿件将在KeAi和Elsevier平台同步上线。期刊计划在2022年第一季度上线第一期, 现开放投稿, 截止2022年12月31日前所有投稿免费发表, 欢迎广大专家学者踊跃投稿。

更多信息: www.keaipublishing.com/watbs/

投稿链接: <https://www.editorialmanager.com/watbs/Default.aspx>

编辑部联系方式:

E-mail: wbs@ihb.ac.cn

电话: 027-67870502

地址: 湖北省武汉市武昌区东湖南路7号中国科学院水生生物研究所综合楼320室