

# 三种湿地植物抗寒性的初步研究

梁 雪<sup>1,2</sup>, 贺 锋<sup>1\*</sup>, 徐 洪<sup>3</sup>, 肖 蕾<sup>1,2</sup>, 黄福青<sup>1,2</sup>, 徐 栋<sup>1</sup>, 吴振斌<sup>1</sup>

(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.中国科学院研究生院, 北京 100049; 3.中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

**摘 要:**在阶段性降温条件下,研究了三种常用湿地植物黄鸢尾(*Iris pseudacorus* L.)、花蔺蒲(*Iris ensata* Thunb.)及水芹(*Oenanthe javanica*)叶片抗寒性相关生理指标(可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性以及细胞质膜相对透性)的变化。结果表明,冷锻炼使湿地植物通过对抗氧化酶活性及渗透性的调节来提高其机体的抗寒性。低温条件下,黄鸢尾的抗氧化酶活性显著增加,5℃时 SOD 活性是初始值的 5.77 倍;花蔺蒲保持较高的 CAT 活性,5℃时其 CAT 活性是黄鸢尾 CAT 活性的 8.95 倍,是水芹 CAT 活性的 3.77 倍;水芹叶片中脯氨酸含量明显提高,温度和脯氨酸含量呈负相关( $R=-0.755$ ,  $P=0.050$ )。综合比较各项生理指标可以得到这三种湿地植物的耐寒性大小顺序依次为:黄鸢尾>花蔺蒲>水芹。

**关键词:**湿地植物;酶;低温锻炼;抗寒性

**中图分类号:**X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)12-2466-07

## Preliminary Study on Cold Resistance of Three Kinds of Wetland Plants

LIANG Xue<sup>1,2</sup>, HE Feng<sup>1\*</sup>, XU Hong<sup>3</sup>, XIAO Lei<sup>1,2</sup>, HUANG Fu-qing<sup>1,2</sup>, XU Dong<sup>1</sup>, WU Zhen-bin<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3.China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper investigated the effect of temperature grading decrease on cold resistance of three kinds of common wetland plants: *Iris pseudacorus* L., *Iris ensata* Thunb. and *Oenanthe javanica*. Changes in cold resistance of the plants were reflected by some physiological indexes. The physiological indexes included soluble protein, soluble sugar, proline, EL, MDA, SOD, POD and CAT. The results showed that cold resistance of the plants was improved in the process of cold hardening by adjusting antioxidant enzyme activities and permeability. The step by step cooling brought about changes in some cold resistance related enzymes and permeability regulatory substances. In addition, different species showed different change law in physiological indexes. Antioxidant enzyme activity of *Iris pseudacorus* L. increased obviously in low temperature. SOD activity of *Iris pseudacorus* L. at 5℃ was 5.77 times higher than the initial value. CAT activity of *Iris ensata* Thunb. maintained a high level, and it was 8.95 times and 3.77 times more active than that of *Iris pseudacorus* L. and *Oenanthe javanica* respectively at 5℃. Concentration of proline of *Oenanthe javanica* remarkably increased and it was negative related to temperature ( $R=-0.755$ ,  $P=0.050$ ). After a comprehensive comparison of all the indexes, the cold resistant ability could be ranked as follows: *Iris pseudacorus* L. > *Iris ensata* Thunb. > *Oenanthe javanica*.

**Keywords:** wetland plants; enzyme; cold hardening; cold resistance

收稿日期:2012-05-30

基金项目:国家自然科学基金(51178452);湖北省杰出青年基金(2010CDA093);国家科技支撑计划(2012BAJ21B03-04);国家“十二五”水专项(2012ZX07101007-005)

作者简介:梁 雪(1989—),女,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为人工湿地。E-mail:snowfishl@163.com

\* 通信作者:贺 锋 E-mail:hefeng@ihb.ac.cn

人工湿地 (Constructed Wetland) 是指人工建造的、可控制的和工程化的湿地系统,其设计和建造是通过湿地生态系统中的物理、化学和生物作用等优化组合来进行污水处理。它一般由人工基质和生长在其中的水生植物组成,是一个独特的生态系统<sup>[1-2]</sup>。植物是人工湿地的重要组成部分,不但可以去除水体中污染物,加速营养物质的循环和再利用,还能维持及美化湿地环境,改善区域气候,促进生态环境的良性循环<sup>[3]</sup>。然而多数湿地植物在冬季都会进入休眠状态或者枯萎死亡,对湿地系统中的污染物质去除效果产生明显的影响,植物残体的营养释放等可能还会造成二次污染<sup>[4]</sup>。因此,如何提高湿地植物的抗寒性,使植物在冬季仍能发挥相应的功能,进而在寒冷气候条件下推广湿地技术的应用受到越来越多的关注<sup>[5-6]</sup>。黄鸢尾、花菖蒲和水芹都是常用的湿地植物,许多研究表明,这三种湿地植物具有较高的净化效果且有一定的耐寒性<sup>[7-11]</sup>。本研究对以上三种湿地植物的耐寒性进行了比较与评价,探讨了各自的抗寒机理,为冬季湿地植物的筛选与评价提供一定的理论基础和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料为自然条件下生长的黄鸢尾、花菖蒲及水芹植株,取自湖北省武汉市中国科学院水生生物研究所官桥试验基地。

### 1.2 方法

每种植物各取株高 15 cm 左右幼苗期的盆栽植株 3 盆,以普通养殖塘底泥为培养基(主要指标:TP 约  $490 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TN 约  $767 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),放入光照培养箱(每日光照 12 h)中进行阶段性低温胁迫处理,设 25、20、15、10、5、0 °C 共 6 组处理,在每个处理温度条件下培养 3 d 后阶段性降温,并在每阶段第 3 d 早上 9:00 左右取同种植物三盆植株的新生叶片混合样进行生理生化指标测定。主要的生理生化指标有:可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性以及细胞质膜相对透性(EL)。每样重复测定 3 次。每日早上观测记录各植物的外部形态变化。

### 1.3 测定指标及方法

提取粗提液时用预冷的研钵冰浴研磨,并在低温离心机内离心。制备好的粗提液迅速转入低温冷藏,

以减小酶的失活。各指标当日迅速测定,以保证数据的可靠性。

用蒽酮法测定可溶性糖含量<sup>[12]</sup>;用酸性茚三酮测定游离脯氨酸含量<sup>[13]</sup>;参照李合生<sup>[14]</sup>的方法测定 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性;用巴比妥酸(TBA)显色法测定 MDA 含量;用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白质含量。细胞质膜相对透性的测定参考王永红等的方法<sup>[15]</sup>。

主要仪器:BECKMAN 低温离心机,岛津 UV-1800 分光光度计,METTLER TOLEDO DELTA 320pH 计,Thermo 便携式多功能水质分析仪。

测定结果用 SPSS 统计软件进行多因素方差分析及各指标之间的相关性分析。图中的字母代表各天中不同植物种对各指标的单因素方差分析的 S-N-K 分类结果。

## 2 结果与分析

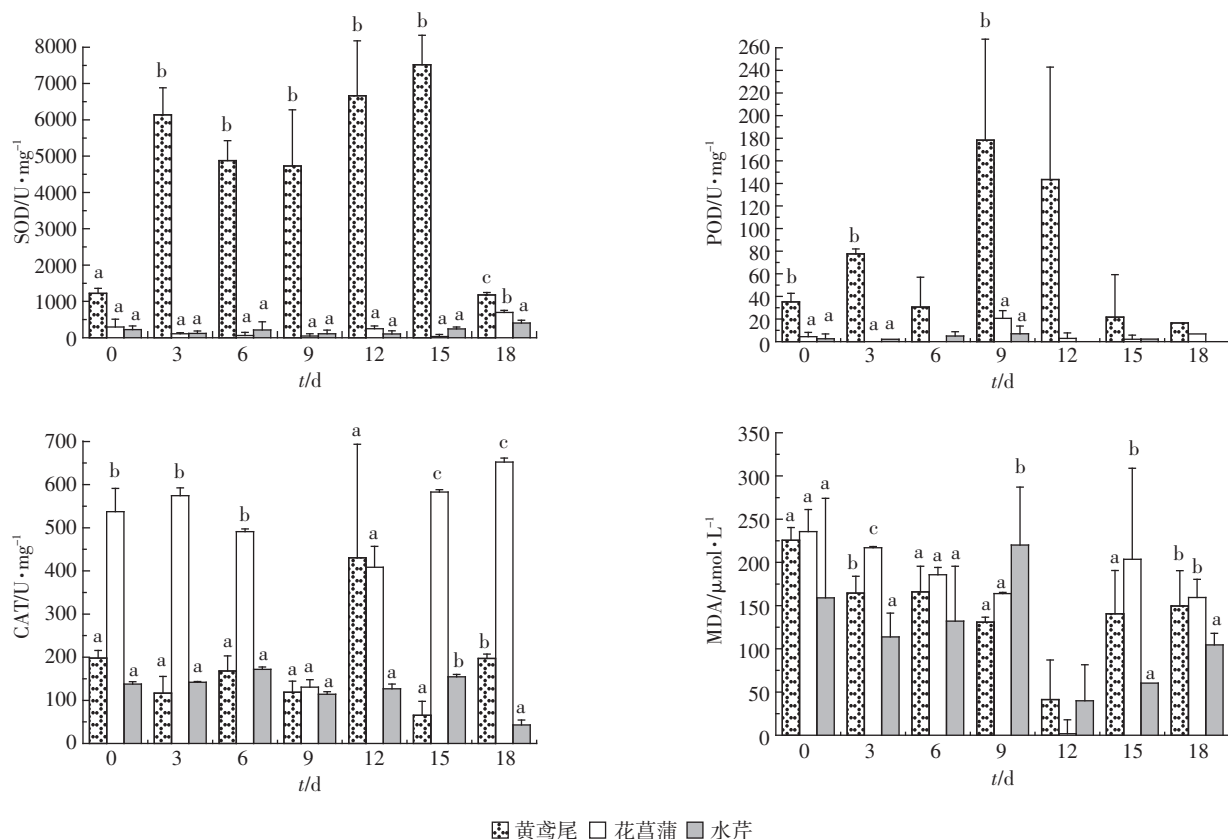
### 2.1 低温胁迫下三种湿地植物外部形态的变化

在阶段性降温过程中,黄鸢尾一直保持良好的长势,即使在 0 °C 条件下仍能正常生长。花菖蒲长势较缓,0 °C 时叶片出现卷曲萎焉状况。而水芹在 15 °C 时便出现黄叶,10 °C 时叶片大量变黄,0 °C 时叶片大部分叶片枯黄烂死,茎干萎焉。说明黄鸢尾的耐寒性最强,其次为花菖蒲,耐寒性最差的是水芹。

### 2.2 低温胁迫下三种湿地植物抗氧化酶活性及 MDA 含量的变化

细胞抗氧化途径也是细胞抗寒生理生化重要途径之一<sup>[15]</sup>。SOD、POD 和 CAT 都是植物抗氧化系统中重要的保护性酶,能清除体内过多的活性氧,使机体免遭氧化损伤<sup>[16]</sup>。SOD 普遍存在于植物的各个器官,是一种清除超氧阴离子自由基的酶,它催化超氧阴离子自由基与氢离子反应生产  $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{O}_2$ ,反应产物  $\text{H}_2\text{O}_2$  可由过氧化氢酶进一步分解或被过氧化物酶利用;CAT 主要存在于植物的微体中,CAT 可将  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ ,它和 POD 一起为  $\text{H}_2\text{O}_2$  的解毒剂。

由图 1 可知,在到达 0 °C 之前黄鸢尾的 SOD 活性整体呈上升趋势且明显高于花菖蒲和水芹叶片中 SOD 活性,在 5 °C 时达到峰值,此时其 SOD 活性是初始值的 5.77 倍,15 °C 时出现一个小低谷。0 °C 时黄鸢尾 SOD 活性高于花菖蒲的 SOD 活性,而水芹的 SOD 活性最低。黄鸢尾叶片中 POD 活性也明显高于花菖蒲和水芹叶片中 POD 活性,且三种湿地植物在 15 °C 时均达到峰值,总体上呈现先升高后下降的单峰曲



■ 黄鸢尾 □ 花菖蒲 ■ 水芹

图中字母 a, b, c 表示在该指标下以植物种为变量进行单因素方差分析的结果 ( $P < 0.05$ )。下同

The alphabet a, b, c represents the results of ANOVA analysis taking species as variables ( $P < 0.05$ ). The same below

图1 三种湿地植物叶片中 SOD、POD、CAT 活性及 MDA 含量的变化

Figure 1 SOD, POD, CAT activity and MDA content change in leaves of the three wetland plants

线,这与彭丽等<sup>[17]</sup>得到的趋势类似。花菖蒲叶片中 CAT 活性明显高于黄鸢尾和水芹叶片中 CAT 活性,但在 15 °C 时出现一个最低值,随后逐渐上升。而黄鸢尾叶片 CAT 活性在波动中基本维持初始水平,水芹叶片 CAT 活性在 0 °C 时明显低于初始水平。

黄鸢尾较高的 SOD 及 POD 活性有助于其清理机体内产生的自由基。第 9 d 及温度降到 15 °C 时, SOD 出现一个低谷,而 POD 出现一个峰值,可能是由于开始时较高活性的 SOD 催化产生过多的  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,过剩的  $\text{H}_2\text{O}_2$  抑制了 SOD 活性,随着 POD 活性的增加  $\text{H}_2\text{O}_2$  被降解, SOD 活性又逐渐升高, 0 °C 时机体受胁迫过大,产生过量自由基,使氧化代谢失调,所以导致 SOD 及 POD 活性急剧下降。花菖蒲也表现出类似的变化规律,且其叶片 CAT 活性一直保持较高活性,有利于自由基的清除。5 °C 时花菖蒲叶片 CAT 活性是黄鸢尾叶片 CAT 活性的 8.95 倍,是水芹叶片 CAT 活性的 3.77 倍。15 °C 时花菖蒲 CAT 活性出现最低值,可能是过剩的  $\text{H}_2\text{O}_2$  抑制了 CAT 活性,随

着 POD 活性的升高  $\text{H}_2\text{O}_2$  被分解, CAT 的抑制被解除,其活性随之升高。而水芹叶片中三种抗氧化酶活性均较低,低温使其体内抗氧化系统受干扰,氧化代谢失调。

MDA 是膜脂过氧化的终产物,它会攻击质膜内蛋白质、核酸、不饱和脂肪酸等生物大分子,阻止新脂类的合成,导致质膜的损伤和破坏<sup>[18]</sup>。从图 1 可以看出,花菖蒲在整个低温处理中一直保持着较高的 MDA 含量。黄鸢尾保持中等水平,水芹的 MDA 含量处于较低水平。处理后 12 d 即 10 °C 时出现一个明显的拐点,在这之前黄鸢尾和花菖蒲的 MDA 含量都有所降低,而水芹的 MDA 含量呈上升趋势。在 12 d 后水芹的 MDA 含量仍呈现上升趋势,花菖蒲 MDA 含量在上升后又出现下降的趋势。黄鸢尾和花菖蒲的 MDA 含量表现出相似的变化趋势,这可能是因为在 15 °C 之前由于抗氧化酶系的调节作用,其叶片的 MDA 含量逐渐降低, 10 °C 时其调节机制受到破坏, MDA 含量显著增加。水芹在第 12 d 时也出现一个拐

点,但是其 MDA 一直保持上升的变化趋势,说明其质膜所受损伤和破坏较严重。

2.3 低温胁迫下三种湿地植物可溶性糖和游离脯氨酸含量的变化

可溶性糖在低温胁迫时的积累可提高细胞渗透压,从而增强保水能力。糖还具有冰冻保护剂作用,防止蛋白质在结冰和解冻时发生凝固变性<sup>[19]</sup>。由图 2 可知,黄鸢尾和花菖蒲叶片中可溶性糖含量的变化趋势相似,在温度降到 0℃之前呈现一个先降低后升高的变化,黄鸢尾及花菖蒲叶片可溶性糖含量的最低值均出现在第 9 d 及温度为 15℃条件下,而当温度降到 0℃时,两者的叶片可溶性糖含量均有所降低。低温冷锻炼使黄鸢尾和花菖蒲的可溶性糖含量有所升高,增加其对冷害的抵抗力,0℃低温超出植物所能忍耐的阈值,可溶性糖含量均有所下降。降温过程中水芹的叶片可溶性糖含量一直较低,说明其在低温胁迫条件下渗透调节能力较弱,耐寒性较差。

脯氨酸的增加除了能降低细胞渗透势外,还可使蛋白质束缚更多的水分子,增加蛋白质的可溶性<sup>[20]</sup>。黄鸢尾和水芹叶片中脯氨酸含量的变化相似,都在 10℃时出现一个小高峰随着温度的降低,其含量有所下降。这可能因为胁迫初期植物体内脯氨酸含量增加以增加其渗透调节的能力,随着温度的进一步降低,超过渗透调节的阈值,脯氨酸的合成受阻;而花菖蒲叶片中脯氨酸含量基本保持稳定。

2.4 低温胁迫下三种湿地植物可溶性蛋白含量及质膜相对透性的变化

关于低温胁迫与可溶性蛋白含量关系的研究,目前存在 2 种观点:一种观点支持低温导致植物细胞中可溶性蛋白含量变化的一般趋势是增加<sup>[21]</sup>;另一种观点认为可溶性蛋白含量在抗冷锻炼中并没有实质性

的改变<sup>[22]</sup>,或者可溶性蛋白含量的增加与植物抗冷性的增强并不存在因果关系<sup>[23]</sup>。由图 3 可知,花菖蒲和水芹叶片中可溶性蛋白的含量显著高于黄鸢尾叶片中可溶性蛋白质含量,并且其蛋白质含量随着阶段性降温基本保持稳定。黄鸢尾从 25℃到 5℃叶片蛋白质基本保持稳定,但当温度降到 0℃时其叶片蛋白质含量是 5℃时的 8.50 倍,叶片蛋白质含量出现陡增现象。可能可溶性蛋白的变化情况更能反映植物的抗寒性,0℃时黄鸢尾可溶性蛋白含量大量增加,从而提高其抗寒力。脯氨酸具有溶解度高、在细胞内积累无毒性、水溶液水势较高等特点。

从 20℃开始,随温度的降低,花菖蒲的质膜相对透性逐渐增加,在 5℃时,其质膜相对透性是初始值的 1.67 倍,水芹的质膜相对透性是初始值的 4.83 倍,而此时黄鸢尾的质膜相对透性不但没有增加,反而有所降低。当温度降到 0℃时,由于叶片萎焉,无法测定花菖蒲和水芹叶片的质膜相对透性,此时黄鸢尾叶片的质膜相对透性显著升高,是初始值的 3.36 倍。

3 讨论

在低温胁迫下,黄鸢尾的 SOD 和 POD 活性较高,有助于清除体内的自由基,使机体免受低温引起的过氧化伤害,且黄鸢尾叶片中可溶性糖含量及脯氨酸含量也较高,而这两种指标都和植物体渗透调节相关<sup>[24]</sup>,说明黄鸢尾在低温胁迫下也能通过渗透调节,减轻低温对机体的伤害。黄鸢尾在 10℃时开始感受到低温胁迫,反应为 MDA 含量的升高,当温度降至 0℃时质膜相对透性显著增加,机体开始表现出受害现象<sup>[25]</sup>。黄鸢尾叶片的 SOD 活性和可溶性蛋白质含量表现出显著的负相关,相关性系数为-0.887( $P=0.008$ ),其质膜相对透性和可溶性蛋白质含量表现出一定的正相关

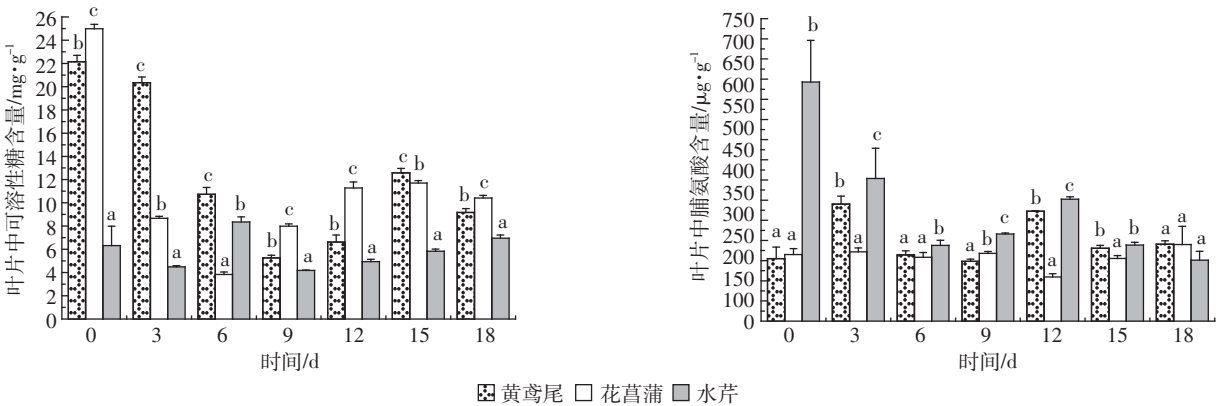


图 2 三种湿地植物叶片中可溶性糖及脯氨酸含量的变化

Figure 2 Soluble sugar and proline content change in leaves of the three wetland plants

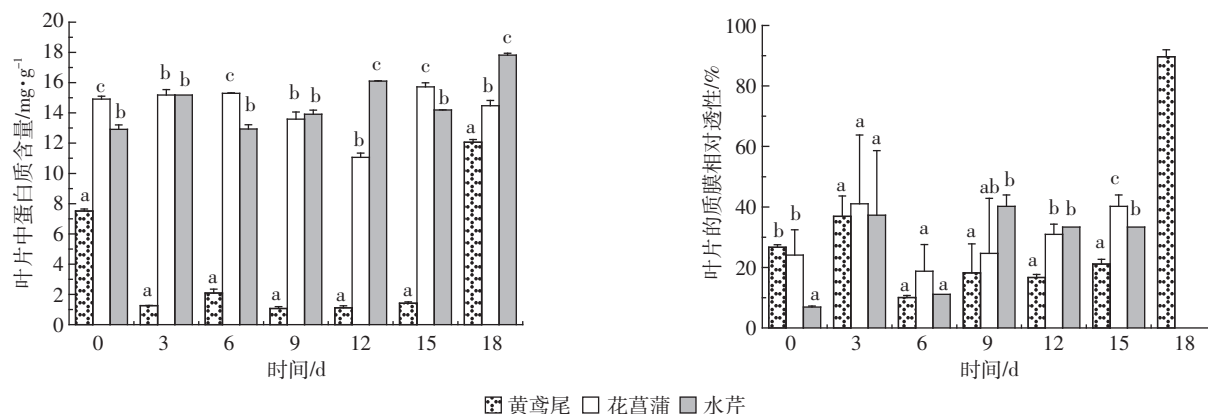


图3 三种湿地植物叶片中蛋白质含量及质膜相对透性的变化

Figure 3 Soluble proteind and cytomembrane permeability change in leaves of the three wetland plants

性,相关性系数为0.836( $P=0.019$ )。由此可推测,黄鸢尾是通过抗氧化酶及可溶性蛋白的相互作用来抵御低温的伤害。

在整个降温过程中,花菖蒲的CAT活性一直保持着较高的水平,加速 $H_2O_2$ 的分解。且其抗氧化酶活性的变化趋势和黄鸢尾的相似,说明其可以通过对抗氧化酶活性的调节,减轻机体因低温引起的过氧化伤害。低温引起其可溶性糖含量的增加,从而调节体内渗透压,提高其耐寒性。花菖蒲的可溶性蛋白含量一直保持着较高水平,且其可溶性蛋白含量和MDA含量呈正相关( $R=0.818, P=0.025$ ),其叶片中脯氨酸含量也和MDA呈正相关( $R=0.799, P=0.031$ )。可见花菖蒲在受到低温胁迫时会通过脯氨酸及可溶性蛋白等的共同作用,主要通过对渗透性的调节来提高其抗寒性。

水芹的抗氧化酶活性及可溶性糖一直较低,但其可溶性蛋白及脯氨酸含量较高。各指标的相关性分析表明,温度和脯氨酸呈负相关( $R=-0.755, P=0.050$ ),说明温度的降低引起水芹叶片中脯氨酸的升高,有助于降低细胞的渗透势<sup>[20]</sup>。其叶片中POD含量和MDA也有一定的正相关性( $R=0.795, P=0.033$ )。说明水芹通过抗氧化酶活性及渗透的调节,也能在一定程度上提高其抗寒性。

通过多因素方差分析可知,温度及植物种类对各指标均产生显著性影响, $P$ 值均小于0.005。抗寒性是一个受多种因素控制的复杂性状,从实验所得结果可以看出,不同植物的抗寒机制有所不同。各指标在抗寒性中所起的作用也不尽相同,所以直接利用某个单一指标进行抗寒性评价具有片面性<sup>[26]</sup>。综合比较各指标可以得到这三种湿地植物的耐寒性大小顺序依次

为:黄鸢尾>花菖蒲>水芹。这与实际观察外部形态所得出的结论一致。

对各指标的变化情况进行分析可以看出,三种植物基本是从15~10℃时开始感受到低温的胁迫,并通过各种途径对低温胁迫进行调控,增加机体的耐寒性。这与前人的研究结果相符<sup>[27-28]</sup>。抗寒性的调节存在一定的阈值,超过此阈值后,机体的调节能力会丧失,表现出低温伤害。抗寒性最强的黄鸢尾,其在0℃时表现出一定的低温伤害,但仍可以正常生存。说明植物抗寒性相关生理指标比外部形态变化更能准确灵敏地反映受冷害情况。

#### 4 结论

(1)低温胁迫下,黄鸢尾的抗氧化酶活性增加,SOD活性和可溶性蛋白质含量表现出显著的负相关,机体通过氧化酶及可溶性蛋白的相互作用来抵御低温的伤害。

(2)花菖蒲在低温条件下,CAT活性较高,叶片可溶性蛋白含量及脯氨酸含量均和MDA成正相关,其主要通过对渗透性的调节来提高抗寒性。

(3)温度的降低使水芹叶片中脯氨酸含量有所提高,其主要是通过通过对可溶性蛋白及脯氨酸含量的调节,提高机体的抗寒性。

(4)不同植物的抗寒机制有所不同。通过综合比较各指标,可以得到这三种湿地植物的耐寒性大小顺序依次为:黄鸢尾>花菖蒲>水芹。

(5)三种湿地植物基本是从15~10℃时开始感受到低温的胁迫的,黄鸢尾从0℃开始表现出低温伤害。植物抗寒性相关生理指标能较准确灵敏地反映受冷害情况。

## 参考文献:

- [1] 吴振斌, 等. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 10–18.  
WU Zhen-bin, et al. Integrated vertical-flow constructed wetland[M]. Beijing: Science Press, 2008: 10–18.
- [2] 朱洁, 陈洪斌. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 24–33.  
ZHU Jie, CHEN Hong-bin. Discussion on constructed wetlands clogging[J]. *China Water and Waste Water*, 2009, 25(6): 24–33.
- [3] 梁雪, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地植物的功能与选择[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(1): 131–138.  
LIANG Xue, HE Feng, XU Dong, et al. Plant function and selection for constructed wetlands[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(1): 131–138.
- [4] 鲁静, 周虹霞, 田广宇, 等. 洱海流域44种湿地植物的氮磷含量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 709–715.  
LU Jing, ZHOU Hong-xia, TIAN Guang-yu, et al. Nitrogen and phosphorus contents in 44 wetland species from the Lake Erhai Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 709–715.
- [5] Jenssen P D, Mahlum T, Krogstad T. Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments[J]. *Water Science and Technology*, 1993, 28(10): 149–157.
- [6] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 19: 1–11.
- [7] 丛海兵, 吴黎明. 2种耐寒性生态浮床植物的水质改善性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 51–56.  
CONG Hai-bing, WU Li-ming. Study on water quality improvement capacity of two cold-resistant floating bed plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(1): 51–56.
- [8] 芦建国, 韩冠苒. 3种鸢尾属植物对富营养化水体的净化作用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 194–196.  
LU Jian-guo, HAN Guan-ran. Purification efficiency of 3 species of genus *Iris* for eutrophic water [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12): 194–196.
- [9] 周金波, 金树权. 4种水生植物生长特性及氮磷吸收能力研究[J]. 宁波农业科技, 2012(4): 4–5.  
ZHOU Jin-bo, JIN Shu-quan. Study on growth characteristics and N, P absorptive ability of 4 aquatic plants [J]. *Ninbo Agricultural Science and Technology*, 2012(4): 4–5.
- [10] 朱静平, 程凯, 孙丽. 水培植物净化系统不同氮磷去除作用的贡献[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 175–178.  
ZHU Jing-ping, CHENG Kai, SUN Li. Contribution of different roles on total nitrogen and total phosphorus removal in aquatic plants purification system[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(5): 175–178.
- [11] 陈永华, 吴晓芙, 陈明利, 等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1789–1794.  
CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, CHEN Ming-li, et al. Selection of water plant species for wetlands constructed as sewage treatment systems and evaluation of their wastewater purification potentials[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1789–1794.
- [12] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 134–137.  
KONG Xiang-sheng, YI Xian-feng. Plant physiology experiment and technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 134–137.
- [13] 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, 2005: 117–118.  
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Plant physiology experiment guide [M]. Guangzhou: South China University Technology Press, 2005: 117–118.
- [14] 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: 165–167.  
LI He-sheng. Plant physiology and biochemistry experimental principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 165–167.
- [15] 王永红, 李纪元, 田敏, 等. 低温胁迫对山茶物种2个抗寒性生理指标的影响[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 121–124.  
WANG Yong-hong, LI Ji-yuan, TIAN Min, et al. Influences of low temperature stress on *Camellia* species' two physiological index related to resistance to coldness[J]. *Forest Research*, 2006, 19(1): 121–124.
- [16] 王红星, 纪秀娥, 陈晓君, 等. 水杨酸对废电池胁迫下绿豆幼苗抗氧化酶活性及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 429–434.  
WANG Hong-xing, JI Xiu-e, CHEN Xiao-jun, et al. Effect of salicylic acid on antioxidant system of Mungbean (*Vigna radiata*) seedling under used batteries stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 429–434.
- [17] 彭丽, 翟学昌, 万劲, 等. 5种地被植物抗寒性初步研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(13): 5952–5953.  
PENG Li, ZHAI Xue-chang, WAN Jing, et al. Preliminary study on the cold resistance of 5 cover plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(13): 5952–5953.
- [18] 唐咏, 王萍萍, 张宁. 植物重金属毒害作用机理研究现状[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 551–555.  
TANG Yong, WANG Ping-ping, ZHANG Ning. Researches in heavy metal toxicity mechanism in plant[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(4): 551–555.
- [19] 艾琳, 张萍, 胡成志. 低温胁迫对葡萄根系膜系统和可溶性糖及脯氨酸含量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(4): 47–50.  
AI Lin, ZHANG Ping, HU Cheng-zhi. Effects of low temperatures tolerance on the electrolyte osmotic rate and the content of soluble sugar, proline of grape roots[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2004, 27(4): 47–50.
- [20] 高媛, 齐晓花, 杨景华, 等. 高等植物对低温胁迫的响应研究[J]. 北方园艺, 2007(10): 58–61.  
GAO Yuan, QI Xiao-hua, YANG Jing-hua, et al. The response mechanism of cold stress in higher plants[J]. *North Horticulture*, 2007(10): 58–61.
- [21] 姚蕊蕊, 曾骧, 简令成. 桃花芽越冬期间蛋白质、核糖核酸动态与抗寒性的关系[J]. 园艺学报, 1991, 18(1): 16–20.

- YAO Sheng-ru, ZENG Xiang, JIAN Ling-cheng. The changes of total protein during the overwintering period of peach flower buds and its relation to cold hardiness [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1991, 18(1): 16-20.
- [22] 柴团耀, 张玉秀. 菜豆富含脯氨酸、蛋白质基因在生物和非生物胁迫下的表达[J]. 植物学报, 1999, 41(1): 111-113.
- CHAI Tuan-yao, ZHANG Yu-xiu. Gene expression analysis of a proline-rich protein from bean under biotic and abiotic stress [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1999, 41(1): 111-113.
- [23] 刘西平. 低温胁迫下栎树幼苗衰老与膜脂质过氧化关系[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(4): 72-75.
- LIU Xi-ping. Relationship between senescence and membrane lipid peroxidation of Koelreuteria tree under low temperature[J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 1995, 10(4): 72-75.
- [24] 王会良, 何华平, 龚林忠, 等. 植物抗寒性研究进展 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50(6): 1091-1095.
- WANG Hui-liang, HE Hua-ping, GONG Lin-zhong, et al. Research progress on cold resistance of plant [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(6): 1091-1095.
- [25] 邱乾栋, 吕晓贞, 臧德奎, 等. 植物抗旱生理研究进展 [J]. 山东农业科学, 2009(8): 53-57.
- QIU Qian-dong, LÜ Xiao-zhen, ZANG De-kui, et al. Research progress on plant physiology of cold resistance [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2009(8): 53-57.
- [26] 许桂芳, 张朝阳, 向佐湘, 等. 利用隶属函数法对 4 种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 24-26.
- XU Gui-fang, ZHANG Zhao-yang, XIANG Zuo-xiang, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance on four *lysimachia* plants by subordinate function values analysis[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(3): 24-26.
- [27] 马文月. 植物冷害和抗冷性的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(5): 1003-1006.
- MA Wen-yue. Studies on chilling injury and cold hardiness of plants [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2004, 32(5): 1003-1006.
- [28] 王 毅, 杨宏福, 李树德. 园艺植物冷害和抗冷性的研究[J]. 园艺学报, 1994, 21(3): 293-244.
- WANG Yi, YANG Hong-fu, LI Shu-de. Studies on chilling injury and cold hardiness of horticultural crops: A little review[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1994, 21(3): 293-244.

## 欢迎订阅 2013 年《农业环境与发展》

《农业环境与发展》创刊于 1984 年,农业部主管、是由农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的综合指导类科技期刊,为中国科技核心期刊。传播农业可持续发展新思想、新观点、新方略,倡导农业生产、农民生活、农村生态协调发展理念,多视角、多层次、多学科地反映食品安全与健康、资源开发与利用、环境污染与防治、农业清洁生产与农村循环经济等热点问题,直接面向农业、环保、食品、能源、卫生等领域的科研、教学、生产、管理、技术推广人员与大众读者。同时,《农业环境与发展》将在重要版面上宣传各地农业环境保护成就。欢迎大家踊跃投稿,欢迎刊登广告。

《农业环境与发展》为双月刊,大 16 开,96 页,逢双月 25 日出版,刊号 ISSN 1005-4944, CN 12-1233/S, 国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号 6-40,2013 年每册定价 12.00 元,全年 72.00 元。有漏订者可直接与编辑部联系订订。本刊现有过刊合订本,需订购者请与本刊编辑部联系。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮政编码:300191

电话:022-23611149

传真:022-23674336

电子信箱:caed@vip.163.com

网址:www.aed.org.cn