

人工湿地植物的抗寒性研究进展

陈金梅^{1,2},周巧红¹,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,湖北 武汉 430072;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:湿地植物是人工湿地的重要组成部分。在寒冷的冬季,植物进入休眠期甚至枯萎死亡,从而使人工湿地净化效率大大降低,故而提高湿地植物的抗寒性对冬季湿地功能发挥具有重要意义。介绍了湿地植物在人工湿地中的作用,主要包括传输氧气、吸收净化污染物质、增强水力输送和化感作用等;分析了目前人工湿地研究的热点,阐述低温对植物膜系统、抗氧化系统、渗透调节和光合系统的损伤机理;梳理了现有的关于提高湿地植物抗寒性的研究方法,包括天然植物的抗寒性筛选、诱变育种、化学法等。建议加强湿地植物抗寒性提高及其机理方面的研究,可尝试采用物理诱导法和化学诱导法联合诱变育种和在分子水平对抗寒功能基因、抗寒功能蛋白进行调控,进一步提高湿地植物抗寒性。

关键词:人工湿地;湿地植物;抗寒性

中图分类号:Q948.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)06-0117-06

湿地植物是人工湿地的重要组成部分。人工湿地一般种植大型草本植物,这些植物抗寒性较差,到了冬季会进入休眠期,甚至枯萎死亡。冬季,微生物活性也大幅度下降。人工湿地主要靠基质吸附、植物吸收、微生物降解 3 大功能及其相互间的协同作用净化水质,基于这一特殊机理,在气温低的冬季,人工湿地系统的污水净化效果大幅度下降。大量研究发现,在水温低于 10℃的情况下,人工湿地净化效果下降明显,且硝化作用在 4℃下逐渐趋于停止(Cookson et al,2002)。除此之外,植物冬季进入休眠期、枯萎死亡或是被收割时,湿地的生态功能也会发生巨大变化,污水净化能力大大下降(Picard et al,2005; Munoz et al,2006)。因此,提高湿地植物的抗寒性对冬季湿地功能发挥具有重要的意义。

目前,提高湿地植物抗寒性主要的研究方法有天然湿地植物的抗寒性筛选、诱变育种和化学诱导法。天然植物筛选是通过对现有的湿地植物进行自然降温,从中优选出抗寒性较强的植物。诱变育种是通过紫外线、离子束、γ射线等方式使湿地植物的幼苗、种子或组织产生不定向突变,从

而筛选出抗寒性较强的品种。化学诱导法则是用脱落酸、氯化钙等化学试剂促使湿地植物的抗寒性得到提高。本文对近年来人工湿地植物的作用及低温损伤进行阐述,并对湿地植物的抗寒性研究进展进行归纳,并对今后的研究方向及发展进行了展望。

1 人工湿地

1.1 人工湿地简介及分类

人工湿地(Constructed Wetland)是由人工建造、可人为控制的,具有生态降解功能的综合污水处理系统(吴振斌,2008),由基质、植物、微生物 3 部分组成,通过物理、化学、生物的 3 重协同作用来对污水实现净化。目前人工湿地主流的分类是根据人工湿地中水流方式来划分,几种典型的人工湿地对比见表 1。

表 1 几种典型人工湿地对比
Tab.1 Comparison of several typical constructed wetlands

项目	表面流人工湿地	水平潜流人工湿地	垂直潜流人工湿地
水流方式	表面漫流	基质间水平流动	基质间垂直纵向流动
占地面积	很大	大	小
构造	简单	较复杂	较复杂
处理效果	一般	较好	好
卫生状况	差	良好	良好
受气候影响	很大	较大	较大
建造费用	低	较高	较高
日常维护	简单	较复杂	较复杂

收稿日期:2020-07-03
基金项目:国家自然科学基金(51709254,51709255);江西省重点研发计划项目(20171BBH80018);江西省水利科技项目(KT201737)。
作者简介:陈金梅,1995年生,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。E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

1.2 人工湿地的研究现状

人工湿地因其特有的低成本、高效率、易维护等优势以及特殊的生态功能,在国内外备受研究者的关注。以关键词“constructed wetland”在 Web of science 中检索 2016 – 2020 年已发表的文献,并用 CiteSpace 软件对其关键词进行分析(图 1),可以看出,人工湿地的研究主要集中在氮磷去除率、不同废水的去除以及湿地性能的优化上,而对于冬季人工湿地运行效果研究较少,尤其对于湿地植物抗寒性的研究更是鲜少报道。

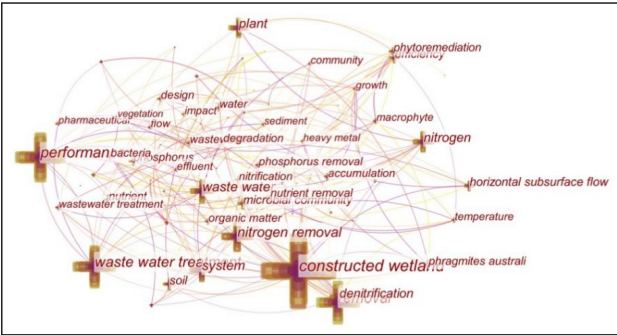


图 1 近 5 年来人工湿地研究关键词分析

Fig.1 Keyword analysis of research on constructed wetlands in the past five years

1.3 植物在人工湿地中的作用

基质、高等植物、微生物是人工湿地发挥净化作用的 3 个主要因素,而植被组成依赖于人工湿地所在区域的气候及设计特征。根据人工湿地用途的不同,选择的植物组成也不同。湿地中通常会种植一些处理性能好、成活率高、生长周期长、根系发达、净化效果好的植物,例如挺水植物芦苇、菖蒲、宽叶香蒲、灯心草、水葱等;漂浮植物凤眼莲、三叉浮萍、满江红常用于氧化塘,也可应用于表面流湿地中;沉水植物如龙须眼子菜、穗花狐尾藻、金鱼藻等可应用于表面潜流湿地中(侯婷婷, 2013; 吴振斌, 2008)。目前应用最广泛的人工湿地系统是挺水植物系统,其主要功能归结为以下 4 个方面。

1.3.1 传输氧气 Kickuth(1970)在 20 世纪 70 年代首次提出了根区法理论,揭开了植物对加强污水处理中根际富氧及根际微生物的神秘面纱。植物可将光合作用产生的氧气或大气中的氧气通过枝条传输到根部区域,改善根系环境,使还原性的湿地基质中具有氧化态,有氧区-兼氧区-无氧区的微环境有利于根区微生物群落的生长繁殖,从而增强了微生物对污水的降解净化作用。有实验表明含植物的湿地系统溶解氧高于无植物种植系统(Armstrong, 1978),且有植物系统基质的氧化还原电位也高于无植物系统(吴建强等, 2005)。植物的种植对根区微生物群落结

构的丰富性和多样性有显著性的正向作用(Wu et al, 2017; Liu et al, 2016),对不同植物类型研究发现,物种丰富度指数(H')、均匀度指数(E')和碳源利用丰富度指数(S')表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾,而优势度指数(D_s)则表现为鸢尾>茭白>菖蒲>芦苇(赖巧晖等, 2019)。由此可认为,植物的光合作用和根系的泌氧输送作用可正向调控人工湿地内的氧化还原情况,为微生物生长繁殖提供适宜的环境,且不同植物群落对微生物群落、碳源的利用有不同的影响。

1.3.2 吸收净化污染物质 湿地植物具有净化水质的特殊功能。有研究发现,种植了灯芯草和香蒲的人工湿地的氮含量比未种植植物的人工湿地氮含量降低了 18%~28%(成水平和况琪军, 1997; Lin et al, 2002; 吴振斌等, 2002)。黄余春等(2012)对云南高原常见湖滨湿地的不同植物群落研究发现:各植物全株氮质量分数在 12.37~19.55 mg/g,各群落植物氮累积量为 229~269 mg/m²,对生活污水脱氮贡献率为 10.11%~11.21%;各群落对生活污水 TN 的去除率都在 75%以上,均显著高于无植物对照组,其中水葱+睡菜+苻菜群落对生活污水 TN 去除效果显著优于其他 3 种群落。此外,湿地植物也可吸收无机磷使其转化成自身所需要的 ATP、DNA 和 RNA 等。研究表明,种植植物的人工湿地 TP(吴振斌等, 2001; Cui et al, 2011)、NH₄⁺-N(张雨葵等, 2006)的去除率均有所提高。而人工湿地对有机污染物的去除是由植物和微生物协同作用完成的,植物在根际形成好氧区-兼氧区-厌氧区,这种微环境有利于有机物的降解或开环、断键成简单分子、小分子,从而使人工湿地对生物难降解有机物的去除效果提高。且有研究认为,有植物系统对 COD 的去除率更高(Villasenor et al, 2011)。此外 Matamoros & Bayona (2006)在研究芦苇型水平潜流人工湿地中发现,其对咖啡因、水杨酸、布洛芬等的去除率大于 80%,对萘普生等药品的去除率为 50%~80%。除此之外,湿地植物还可吸附和富集污水中的砷、铅、汞、镉等重金属(董小霞等, 2014; 周桑扬等, 2016)。综上所述,人工湿地中的植物与微生物的协同作用在各类难处理污染物的去除中发挥着不可忽视的作用。

1.3.3 增强水力输送 Brix(1997)认为,人工湿地中的植物可以降低水流速度,减少基质侵蚀和污染物悬浮的问题。植物根系有较强穿透能力,可以穿透基质并进行横向及纵向扩张,进而在介质中形成了许多微小的气室或间隙,减小了介质的封闭性,增强了介质的疏松度,从而使得介质的水力传输得到加强和维持,透水性得以增强,也增强了介质的水力联

系(Kivaisi, 2001)。成水平和况琪军(1997)研究发现,种植植物的人工湿地系统可以有效防止土壤结块、堵塞的状况,有利于湿地系统的正常运行。

1.3.4 其他作用 除上述主要功能外,湿地植物还有以下 2 个作用。(1)化感作用。有些植物能分泌有毒物质从而杀死污水中的大肠杆菌和病原菌等(吴振斌等, 2002),这也影响了湿地中微生物的组成和多样性(陆松柳等, 2011),同时由于种间竞争等原因,种植植物的湿地系统可以防止湿地内杂草丛生。(2)美化景观作用。人工湿地中植物的种植,为湿地这一单一的污水处理系统增添了美学价值。

2 低温对植物的影响

低温胁迫对植物的伤害,按照低温程度和植物受害情况,可分为冷害(零上低温)和冻害(零下低温)(潘瑞炽, 2012)。冷害分级标准(王孝宣等, 1996)可分为 0~4 级:0 级叶片正常、未受伤害,1 级仅少数叶片边缘有轻度的皱缩萎蔫,2 级半数以下的叶片萎蔫死亡但主茎未死、恢复常温后能长出新叶,3 级半数以上的叶片萎蔫死亡,4 级植株全部死亡。由此可见,低温主要是通过影响植物的生理状况来对植物产生危害,主要包括对膜系统、抗氧化系统、渗透调节系统、光合系统等的影响。

2.1 低温引起的膜伤害

生物膜是细胞的基本结构,各个细胞器都是由生物膜构建而成的。按照生物膜的流动镶嵌学说,在温度正常时膜脂双分子层为液晶相,而低温会引起膜脂相变,使其从液晶相变成凝胶相,导致膜结构破坏,透性增大,水溶性物质外渗,破坏原有的离子平衡,即“膜相变假说”(王孝宣等, 1996;潘瑞炽, 2012;Sonoike, 1996)。同时,低温还会发生膜脂过氧化反应,使膜脂中的不饱和脂肪酸过氧化产生丙二醛(MDA)(陈辉蓉等, 2001)。对橡胶树(王纪坤等, 2016)、玉米幼苗(石如意等, 2018)、杏花(魏安智等, 2008)的研究表明,低温均可导致其细胞膜的相对电导率升高,丙二醛含量升高。

2.2 低温对活性氧及抗氧化系统的影响

植物组织中产生的超氧物阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)、羟基自由基($\cdot OH$)、过氧化氢(H_2O_2)、单线态氧(1O_2)具有很强的氧化能力,故也被称为活性氧(ROS)。ROS 浓度较高时会攻击许多生物功能分子造成膜的过氧化,但植物系统中也有相应的防御系统,例如超氧化物歧化酶(SOD)(Liau et al, 2007)、过氧化物酶(CAT)(鲁振强, 2007)、抗坏血酸过氧化酶(POD)等可将多余

自由基清除,减少植物损伤(Moller et al, 2007)。细胞内的自由基在正常情况下处于动态平衡,但当植物受到低温胁迫时,平衡会被打破,从而使细胞受到伤害。

2.3 低温对渗透调节系统的影响

植物渗透调节的方式主要有 2 种:一些耐盐性很强的植物在盐胁迫下主要通过从外界吸收和积累无机盐离子进行渗透调节,降低细胞渗透势,避免脱水,防止盐胁迫伤害;对于大多数植物而言是通过合成和积累有机物质进行渗透调节(武维华等, 2008)。一般认为,可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等是与植物抗寒性密切相关的渗透调节物质。

2.4 低温对光合系统的影响

低温对植物光合作用胁迫主要有 2 个方面(何洁等, 1986)。第一,低温可直接影响叶绿素的合成、光合机构的结构和活性。如叶绿体类囊体膜组分、流动性、透性变化,含量降低,比值变化,限制无机磷再生从而抑制了循环相关酶的活性。第二,低温通过影响植物体内的其他生理过程间接影响光合进程。如影响淀粉等光合产物运输受阻使其在叶片中积累,叶片气孔收缩使得扩散阻力增加等。

3 湿地植物抗寒性的研究方法

季节因素对湿地植物的净化能力有很大影响。在亚热带和温带地区,不同季节内环境温度及植物的生长时期也不同,两者相互影响对植物的净化效果产生巨大影响(李锋平等, 2017)。Kuschik 等(2003)研究表明,在春、秋两季,植物对氮的去除率与氮浓度成正比,而在夏、冬两季,去除率几乎为定值,分别是 53%和 11%。Stein & Hook(2014)认为,温度和输氧对植物的净化有着不可或缺的作用,且二者都与季节的周期变化相关,从而进一步推测季节变化对植物净化能力的影响是通过不同季节温度和植物活性对植物净化污水能力不同实现的。

3.1 天然植物的抗寒性筛选

湿地耐寒植物主要指在冬季或者气温低下时可生存的植物。通过筛选耐寒性植物或通过不同植物组合来提高湿地植物抗寒性是近年来的研究热点之一。赵峰和张建旗(2016)以花叶芦苇、花叶水葱、慈姑和泽泻为试验材料,测定植物叶片细胞膜透性、脯氨酸(Pro)和可溶性糖(WSC)含量、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的变化,由此得出 4 种湿地植物的抗寒性强弱顺序依次为:花叶芦苇>花叶水葱>慈姑>泽泻。张欣(2017)利用塑料水培箱模拟人工湿地,选择了 5 种水生植物进行抗寒性研

究,得到的抗寒性结果如下:三棱水葱>水麦冬>芦苇>香蒲>石菖蒲。为研究重庆人工湿地冬季植物越冬问题,汤红花(2016)对 8 种本地植物进行低温水培筛选实验,揭示植物的耐寒能力和净化潜力以及净化能力与植物生理生化指标间的相关关系。

3.2 诱变育种

种植筛选出的耐寒性植物虽然可以延长人工湿地在冬季或者气温低下时的正常运行时间,但并未在根本上解决湿地植物的越冬问题,运用物理法诱导促使植株或种子改性可能成为克服该问题的另一突破口。梁雪(2013)用 632 nm 的 He-Ne 激光对黄鸢尾进行诱导处理,结果发现适宜时间的激光处理能使黄鸢尾植株体内保护性酶的活性得到一定程度的增强,植株受外界胁迫作用的影响减轻,间接表明其抗性得到一定程度的提高。Xu 等(2014)利用紫外线对湿地植物美人蕉进行低温改性,并发现紫外辐射可提高植物的各类酶活性,使美人蕉抗寒性增加。除此之外,郑文萍等(2019)将辐射育种运用到湿地植物中,结果发现,在气温达到零下的试验期间,45 Gy 种子辐照组和 25 Gy 幼苗辐照组的总氮(TN)去除率和化学需氧量(COD)去除率均高于对照组。

3.3 化学法

与物理诱导处理相比,化学诱导所需的诱导剂方便易得,不会受诱导材料的限制,且可进行多次持续处理,处理方式更灵活,成本更低。梁雪(2013)在对比激光物理诱导与氯化钙化学诱导时发现,氯化钙处理能更好地提高黄鸢尾植株的抗寒性。

4 展望

植物抗寒性的研究对人工湿地的重要性是显而易见的,尽管前人已经进行了一定的研究,但研究的角度以及范围还不够深入。今后可从分子生物学的角度,运用遗传工程的方法,达到人为控制植物抗寒性的目的,从而解决湿地植物的越冬问题。

4.1 联合诱变育种

鉴于物理诱导法和化学诱导法各有优缺点,建议在接下来的研究里考虑将两者结合。这种协同作用的方法在园艺、蔬菜等方面早有先例。虞龙等(2017)通过联合紫外线辐射诱变选育高产酿酒酵母菌株,当电荷 18 keV、剂量 $400 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 、紫外线辐射 60 s 时诱变效果最好且遗传性状稳定。番木瓜在 10 ~ 40 Co- γ 射线诱变处理后,幼苗根尖细胞的微核细胞率、染色体畸变率、叶片畸变频率与剂量呈正相关,花粉育性下降,但 0 ~ 50 mg/L 的 GA_3 协同处理

可有效减轻辐射对植物机体的损伤(黄建昌和肖艳,2003)。史越伟等(2009)研究表明, γ 射线与 EMS 协同作用对种子活力指数有极显著影响。此外,Zhang 等(2019)利用 ABA 联合 NO 也发现其对果实的冷藏具有良好效果,Wang 等(2018)研究结果也显示 ABA 联合 H_2O_2 可以提高小麦的抗冻性。

4.2 基因分子生物学调控

联合诱变育种具有见效快等优点,但是也存在诱变育种具有不定性、后代可遗传性差等缺点,所以若能在分子水平对抗寒功能基因、抗寒功能蛋白进行调控会取得更可观的效果。

4.2.1 抗寒调控基因 植物的抗寒性是由多个基因共同调控的,植物感受到寒冷信号之后进行传导,在此过程中有多种调控基因参与编码产生信号传递因子和调控蛋白,包括各种转录因子和蛋白激酶,如脱水反应元件结合蛋白(DREB)转录因子、14-3-3 蛋白、 Ca^{2+} 依赖性蛋白激酶、细胞分裂蛋白激活激酶等(Hughes & Dunn, 1996)。刘志薇等(2014)从茶树品种迎霜的基因组中克隆获得 CsDREB - A1 转录因子和拟南芥等植物的 DREB 类转录因子都具有较高的相似性,这说明 DREB 转录因子是植物逆境适应中重要的转录因子,但有关其在提高植物抗寒性的作用机理方面尚有待研究。

4.2.2 抗寒功能基因 抗冻蛋白(AFPs)最早是从鱼的血清中发现的,而 Griffith 等(1992)首次证实植物中存在植物内源性 AFPs,从此引起了研究者对植物抗冻蛋白的关注。植物在低温胁迫所导致的渗透胁迫过程中会产生一系列的生理生化适应性应激反应,这些反应与很多应激基因有关,例如 COR 家族蛋白基因、LEA 蛋白基因等(李文明等,2017)。郭新勇等(2012)通过 PCR 技术完成天山雪莲的冷调节蛋白基因 siCOR 的克隆,采用农杆菌介导法将其转化到烟草中,得到的转基因烟草与野生型植株相比具有较强的抗寒性。

参考文献

- 陈辉蓉,吴振斌,贺锋,2001. 植物抗逆性研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2(3): 7-13.
- 成水平,况琪军,1997. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: I. 净化污水的效果[J]. 湖泊科学,9(4): 351-358.
- 董小霞,颜昌宙,王灶生,等,2014. 组合式水生植物净化系统对 Cu、Pb 和 Cd 的去除与生物富集特征[J]. 环境工程学报,8(4): 1447-1453.
- 郭新勇,程晨,王重,等,2012. 转天山雪莲冷调节蛋白基因烟草的获得及其抗寒性鉴定[J]. 西北植物学报,32(1): 1-10.

- 何洁,刘鸿先,王以柔,等,1986. 低温与植物的光合作用[J]. 植物生理学通讯, 2:1-6.
- 侯婷婷,2013. 人工湿地系统中溶解性有机物分子量分布变化及去除特性[D]. 北京:中国科学院大学.
- 黄建昌,肖艳,2003. $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线与 GA_3 复合处理对番木瓜的遗传诱变效应研究[J]. 核农学报, 17(5): 332-335.
- 黄余春,田昆,岳海涛,等,2012. 云南高原常见湖滨湿地植物群落对生活污水氮的净化研究[J]. 生态环境学报, 21(2): 359-363.
- 李文明,辛建攀,魏驰宇,等,2017. 植物抗寒性研究进展[J]. 江苏农业科学, 45(12):6-11.
- 梁雪,2013. 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.
- 刘志薇,吴致君,黎星辉,等,2014. 茶树 CsDREB-A1 转录因子基因的克隆及其特性分析[J]. 植物资源与环境学报, 23(4): 8-16.
- 鲁振强,2007. 植物活性氧解毒机理及其应用 [M]. 哈尔滨:黑龙江大学出版社:62-63.
- 陆松柳,张辰,徐俊伟,2011. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研[J]. 生态环境学报, 20(4): 676-680.
- 赖巧晖,张浩,刘治鹏,2019. 不同植物配置下人工湿地微生物群落特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 26(5):89-94.
- 潘瑞炽,2012. 植物生理学 [M]. 北京:高等教育出版社.
- 石如意,王腾飞,李军,等,2018. 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, 33(3): 136-143.
- 汤红花,2016. 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.
- 王纪坤,张盈盈,王立丰,等,2016. 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, 40(3): 16-20.
- 王孝宣,李树德,东惠茹,1996. 低温胁迫对番茄苗期和花期若干性状的影响[J]. 园艺学报, 23(4): 349-354.
- 魏安智,杨途熙,张睿,等,2008. 抗寒剂诱导仁用杏花期抗寒力研究[J]. 西北植物学报, 28(3): 535-541.
- 吴建强,阮晓红,王雪,2005. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. 水资源保护, 21(1): 1-6.
- 吴振斌,2008. 复合垂直流人工湿地 [M]. 北京:科学出版社: 1-10.
- 吴振斌,成水平,贺锋,等,2002. 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J]. 应用生态学报, 13(6): 715-718.
- 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,2001. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, 25(1): 28-35.
- 武维华,张蜀秋,袁明,2008. 植物生理学[M]. 2版. 北京:科学出版社.
- 虞龙,姚驰亚,吴晓菲,等,2017. 低能氮离子注入和紫外线复合诱变选育高产酿酒酵母[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 35(2): 1-6.
- 赵峰,张建旗,2016. 4种湿地植物的抗寒性比较[J]. 草原与草坪, 36(4):92-96.
- 张欣,2017. 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, 46(3):11-13
- 张雨葵,杨扬,刘涛,2006. 人工湿地植物的选择及湿地植物对污染河水的净化能[J]. 农业环境科学学报, 25(5): 232-237.
- 郑文萍,童伟军,马琳,等,2019. 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, 43(1): 173-180.
- 周桑扬,杨凯,吴晓英,等,2016. 人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J]. 湿地科学, 14(5): 717-724.
- Armstrong W, 1978. Root aeration in the wetland condition[A]. Hook D D, Crawford R M M. Plant Life in Anaerobic Environments[M]. Michigan: Ann Arbor Science Publishers: 269-296.
- Brix H, 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Water Science And Technology, 35 (5): 11-17.
- Cookson W, Cornforth I, Rowarth J, 2002. Winter soil temperature (2-15 degrees C) effects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils; a laboratory and field study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 34(10): 1401-1415.
- Cui L H, Zhu X Z, Ouyang Y, et al, 2011. Total phosphorus removal from domestic wastewater with cyperus alternifolius in vertical-flow constructed wetlands at the microcosm level [J]. International Journal of Phytoremediation, 13(7): 692-701.
- Griffith M, Ala P, Yang D S C, et al, 1992. Antifreeze protein produced endogenously in winter rye leaves[J]. Plant Physiology, 100(2) : 593-596
- Hughes M A, Dunn M A, 1996. The molecular biology of plant acclimation to low temperature[J]. Journal Of Experimental Botany, 47(3): 291-305.
- Kickuth R, 1970. Ecochemical performance of higher plants[J]. Naturwissenschaften, 57: 55-61.
- Kivaisi A K, 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. Ecological Engineering, 16(4): 545-560.
- Kuschik P, Wiessner A, Kappelmeyer U, et al, 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate[J]. Water Research, 37(17): 4236-4242.
- Liau Y J, Wen L, Shaw J F, et al, 2007. A highly stable cambialistic-superoxide dismutase from *Antrodia camphorata*: Expression in yeast and enzyme properties[J]. Journal of Biotechnology, 131(1): 84-91.
- Lin Y F, Jing S R, Wang T W, et al, 2002. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. Environ-

- mental Pollution, 11(9): 413–420.
- Liu J, Yi N–K, Wang S, et al, 2016. Impact of plant species on spatial distribution of metabolic potential and functional diversity of microbial communities in a constructed wetland treating aquaculture wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 94: 564–573.
- Matamoros V, Bayona J M, 2006. Elimination of pharmaceuticals and personal care products in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 40(18): 5811–5816.
- Moller I M, Jensen P E, Hansson A, 2007. Oxidative modifications to cellular components in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 58: 459–481.
- Munoz P, Drizo A, Hession W C, 2006. Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate[J]. *Water Research*, 40(17): 3209–3218.
- Picard C R, Fraser L H, Steer D, 2005. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms[J]. *Bioresource Technology*, 96(9): 1039–1047.
- Sonoike K, 1996. Photoinhibition of photosystem I: Its physiological significance in the chilling sensitivity of plants [J]. *Plant And Cell Physiology*, 37(3): 239–247.
- Stein O R, Hook P B, 2005. Temperature, plants, and oxygen: how does season affect constructed wetland performance? [J]. *Journal of Environmental Science & Health Part A Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering*, 40(6/7): 1331–1342.
- Villasenor J, Mena J, Fernandez F J, et al, 2011. Kinetics of domestic wastewater COD removal by subsurface flow constructed wetlands using different plant species in temperate period [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 91(7/8): 693–707.
- Wang W, Wang X, Zhang J, et al, 2018. Hydrogen Peroxide and Absciscic Acid Mediate Salicylic Acid–Induced Freezing Tolerance in Wheat [J]. *Front Plant Sci.* 9: 1137. doi: 10.3389/fpls.2018.01137. eCollection 2018.
- Wu H, Wang X, He X, et al, 2017. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 598: 697–703.
- Xu D, Wu Y, Li Y, et al, 2014. Influence of UV radiation on chlorophyll, and antioxidant enzymes of wetland plants in different types of constructed wetland [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(17): 10108–10119.
- Zhang Q, Zhang L, Geng B, et al, 2019. Interactive effects of abscisic acid and nitric oxide on chilling resistance and active oxygen metabolism in peach fruit during cold storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(77): 3367–3380.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Research Advances on Plant Cold Resistance in Constructed Wetlands

CHEN Jin-mei^{1,2}, ZHOU Qiao-hong¹, WU Zhen-bin¹, HE Feng¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Wetland plants are an important component of constructed wetlands. However, in winter, plants go dormant or wither and die, consequently affecting the ecological role and purification efficiency of constructed wetlands. Therefore, it is important to increase the cold resistance of plants in constructed wetlands. In this paper, we first introduce the role of wetland plants in constructed wetlands, serving important functions such as absorbing and degrading pollutants, producing oxygen, enhancing hydraulic transmission capacity and beautifying the environment. We also present the mechanisms of plant damage, including the plant membrane, antioxidant system, osmotic balance and photosynthesis. Current research directions on plant cold resistance in constructed wetlands are then summarized using software analysis. Finally, we recommend that future research focus on improving plant resistance to cold at the molecular level, including the regulation of cold-resistance genes and production of proteins that counteract cold stress, such as antifreeze proteins (AFP).

Key words: constructed wetland; wetland plant; cold resistance