

综述

# 人工湿地植物的功能与选择

梁雪<sup>1,2</sup>, 贺锋<sup>1</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, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

## Plant Function and Selection for Constructed Wetlands

LIANG Xue<sup>1,2</sup>, HE Feng<sup>1</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. Science academy of China, Beijing 100049, China)

**摘要:**植物在人工湿地中起着非常重要的作用,其能吸收降解污染物(包括氮磷营养物、有机污染物和重金属等)、维持湿地环境、传输氧气和分泌化感物质,还能美化景观,并具有经济价值。在湿地植物的选择上,应考虑适地适种,选择抗逆性强、净化能力强、根系发达、观赏价值和经济价值高的物种,同时应注意对不同的物种进行合理搭配。对湿地植物的后续研究应注重这几方面:在实际的运用和管理中应注意慎选外来种,防范外来湿地植物的入侵;对湿地植物进行合理收割;深入研究人工湿地植物的后续利用和资源化。

**关键词:**人工湿地;植物功能;植物选择

**中图分类号:**X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2012)01-0131-08

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対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水中的水生植物组成,是一个独特的生态系统(吴振斌,2008;朱洁和陈洪斌,2009)。该技术1987年引入中国,20世纪90年代快速增长,到2006年全国有200多个人工湿地系统在运行,这还不包括专门用于研究的试验系统(Liu & Ge, 2009)。植物是人工湿地的重要组成部分,不但可以去除水体中的污染物,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。本文主要阐述人工湿地中植物的功能和选择植物的原则,为人工湿地地构建提供理论参考。

收稿日期:2011-09-15

基金项目:国家自然科学基金(50808172;51178452);湖北省杰出青年基金(2010CDA093);国家“十一五”水专项(2009ZX07106-002-004)。

通讯作者:贺锋,1973年生,男,博士,研究员,博导。E-mail: hefeng@ihb.ac.cn

作者简介:梁雪,1989年生,女,硕士研究生,研究方向为人工湿地。E-mail: snowfishl@163.com

## 1 湿地植物的功能

### 1.1 吸收净化功能

湿地植物根系能吸附、吸收和利用污水中的营养物质,在去氮除磷方面发挥重要的作用,并能富集重金属和一些有毒有害物质(陈玉成,2003)。

1.1.1 去氮 污水中的氮以有机氮和无机氮2种形式存在,其中无机氮(主要是 $\text{NH}_4^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ )被植物吸收利用,作为生长过程中不可缺少的营养物质;部分有机氮被微生物分解成氨氮后,也能被植物吸收利用,植物将吸收的氮素合成蛋白质等有机氮。有研究表明,与未种植植物的人工湿地相比,种植了植物的人工湿地硝化作用较强,显示出更强的去氮能力(成水平等,1997;Lin et al, 2002;吴振斌等,2002);蒋跃平等(2004)研究发现,在处理轻度富营养化水的人工湿地中,植物吸收对氮的去除起着主要作用;贺锋等(2004)研究表明,氮素积累主要集中在植物的地上部分,所以通过对植物地上部分的收割可有效地将氮从湿地系统中去除。

1.1.2 除磷 无机磷也是植物必需的营养元素,废水中的无机磷被植物吸收及同化,转化成腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)、脱氧核糖核酸(DNA)和核糖核酸

(RNA)等有机成分,然后通过植物的收割而移除。吴振斌等(2001)对有植物和无植物湿地系统进行比较,有植物湿地系统春夏季磷的平均去除率在60%以上,即使在冬季也能达到40%以上,出水水质稳定,而无植物湿地系统磷的去除率仅为28%,且植物的生长状况直接影响去除效果;Cui等(2011)用种植风车草(*Cyperus alternifolius*)的垂直流人工湿地系统处理生活污水,风车草的生物量每增加1 000 g,其地上部分TP积累量增加4.9 g;宋英伟等(2009)针对太湖富营养化进行的人工湿地试验表明,人工湿地种植植物后对TN、TP的去除率比无植物状态时分别提高13.6%和19.5%。

**1.1.3 净化有机污染物** 人工湿地中有机污染物的净化是植物和微生物共同作用完成的,其降解机制主要有3方面:转化、结合和分离。在潜流人工湿地系统中,与未种植植物的系统相比,植物生长越茂盛的系统对COD的去除率越高,且旺盛的植物还消除了由于水深引起的COD去除率变化(Villasenor et al, 2011)。研究表明,水葱(*Schoenoplectus lacustris*)可使食品厂废水的COD降低70%~80%,使BOD降低60%~90%,而茭白(*Zizania latifolia*)和慈菇(*Sagittaria sagittifolia*)对城市污水的BOD去除率可达80%以上,芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha latifolia*)、眼子菜(*Photamogeton distinctus*)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)等对石油废水的有机物去除率可达95%以上(贺锋和吴振斌,2003);蔗草(*Scirpus triquetar*)也能有效处理采油废水,吸附多种难降解的有机污染物(桂召龙等,2011)。

**1.1.4 去除重金属** 植物可通过根部直接吸收水溶性重金属,还能通过改变根际环境来改变污染物的化学形态,达到降低或消除重金属污染物化学毒性和生物毒性的作用。Cheng等(2001)通过垂直流人工湿地处理低浓度重金属污水的试验证明,风车草能吸收富集水体中大约1/3的铜和锰,对锌、镉和铅的富集也在5%~15%;陈明利等(2008)研究发现,种植凤眼莲和水薹(*Ipomoea aquatica*)的湿地与对照组相比,对 $Cd^{2+}$ 去除率可以提高65.3%, $Zn^{2+}$ 去除率可提高43.7%,明显提高2种重金属的去除效率。

## 1.2 维持湿地环境

人工湿地系统中的植物在维持湿地环境方面也发挥着重要作用,它降低了水流速度,为悬浮物沉淀创造了良好条件,减少基质侵蚀和污染物再悬浮的风险,增加了水流和植物表面的接触时间(Brix,

1997)。植物能防止湿地被淤塞,由于植物根和根系对介质的穿透作用,增强了介质的疏松度,使得介质的水力传输得到加强和维持(Beven & German, 1982)。根在根区死亡腐烂后,留下的管形孔或沟,在一定程度上增加和稳定了土壤的水力传导性(Kickuth,1981)。植物在表面流人工湿地冬季运行时起支撑冰面的作用(籍国东等,2002),当枯死的植物残体被雪覆盖后,植物则对基质起到很好的保护作用,避免湿地基质结霜、冻结,使湿地系统在冬季仍具有一定的净化能力(Smith et al, 1997),但另一方面,在春季它也使土壤温度相对较低(Liu & Ge,2009)。另外,湿地中植物覆盖使光线比较稀疏,阻碍了植物覆盖下水中藻类的生产,这种特性在浮萍系统中较为常见(Ngo, 1987)。植物的生长能调节湿地周围的小气候,美化生态环境,为鸟类和爬行类动物等提供栖息地(王佳和舒新前,2007)。同时,它还能够阻滞沙尘、清新空气、降低噪声,为人们提供更舒适的生活环境(董金凯等,2009)。

## 1.3 传输氧气和分泌化感物质

湿地植物根系的输氧作用促进了深层基质中微生物的生长和繁殖,有利于扩大净化污水的有效空间,在人工湿地污水净化中起着十分重要的作用(吴振斌等,2000;黄丹萍和贺锋,2009)。人工湿地水生植物的根系常形成一个网状结构,它能传输约90%的氧到根系周围(Reddy et al, 1997),从而在根区形成一种好氧环境,这一环境能刺激有机物质的分解和硝化细菌的生长(梁威和吴振斌,2000);而植物未伸展区域和微生物的呼吸作用形成缺氧环境。这种根区有氧区域和缺氧区域的共同存在为根区各种微生物的吸附和代谢提供了适宜的生存生境,加强了根区微生物的生长和繁殖(Armstrong, 1964;张军等,2004;赵桂瑜等,2005),为人工湿地污水处理系统提供了足够的分解者。有植物的湿地系统,细菌数量显著高于无植物系统,且植物根部的细菌比介质处高1~2个数量级(成水平和夏宜斌,1998)。系统的耗氧和供氧与植物净化水质和降解污染物也密切相关(Wetzel & Howe,1999;徐伟锋和孙力平,2003)。有研究表明,处理床中溶氧量影响着硝酸盐的去除(Gebremariam et al,2008; Li et al, 2008; Wen et al, 2010)。李光辉等(2010)研究表明,不同种类湿地植物系统中,水体溶解氧浓度与植株重金属积累量之间存在显著正相关关系,说明湿地植物对废水及底泥中重金属的吸收积累能力在相当大的程度上取决于其根系的泌氧能力。植物的通

气量大小还直接关系到其生长的深度和根系在底泥中的扩展程度(成水平等,2003)。

一些植物的根系分泌物能杀死污水中的大肠杆菌和病原菌等(Seidel,1976;吴振斌等,2002),显著影响湿地中微生物的组成和多样性(陆松柳等,2011)。如灯芯草(*Juncus effusus*)可从根部释放抗生素(Seidel,1964,1966),当污水经过灯芯草植被后,一系列细菌(大肠杆菌、沙门氏菌属和肠球菌)消失。植物根系释放到土壤中的酶等物质可直接降解污染物,且降解速度非常快,某些分泌物还可以促进某些嗜磷、氮细菌的生长,促进氮、磷的释放和转化,从而间接提高净化率。一些植物能释放复合物影响其他物种的生长,如石菖蒲(*Acorus tartarinowii* Schott)具有克藻效应(何池全和叶居新,1999)。人工湿地在水处理过程中对碳源有着较大的需求,植物可通过根系释放很多有机复合物,它们可作为湿地内部的一个重要碳源(Rovira,1965;1969;Barber & Martin,1976;贺锋等,1999;陆松柳等,2009)。在某些类型处理湿地中,由根分泌的这种有机碳可作为反硝化者的碳源,从而增加硝酸盐的去除(Platzer,1996)。

#### 1.4 美化景观

经过多年的研究,人工湿地的内涵有了较大的发展,目前已经集多种功能和价值于一身,其中生态美学价值也成为该技术追求的目标之一,充分体现在湿地的清洁性、独特性、愉悦性和可观赏性等方面,而这些价值主要是通过植物来体现的(崔保山和刘兴土,2001)。在考虑植物的景观功能时,应结合社会、娱乐、美学,按照植物的形态特征,选择人工湿地的构景种(Zhang,2008)。在水平布局上要注意有花植物与无花植物、常绿植物与落叶植物等的搭配,在空间配置上要注意乔灌木的配置和高低植物之间的搭配等,季节配置上要注意四季有花,不同季节有不同的景观生态环境(高辉巧和张俊华,2008)。1998年美国圣保罗市安姆斯湖(Ames Lake)计划中,综合运用了多种原生的沉水、浮水、挺水和旱生植物,为当地居民提供了一片无需远足便可领略的自然风光(王凌和罗述金,2004)。

#### 1.5 具有经济价值

作为一种污水处理系统,人工湿地的重点是去除污染物,所以长期以来被选植物的经济价值常常被忽视。近几年来,人工湿地生态系统中植物的经济价值逐渐得到人们的重视(李志炎等,2004;卢剑波和傅智慧,2006)。在人工湿地系统的实际运行

期间,湿地植被的管理往往成为一个难点,主要的问题是管理费用较高,如果在人工湿地建造初期植物物种的选择方面考虑所选植物有一定的经济价值,这个问题就会变的较为简单。目前,对湿地植物资源化利用主要有:用作切花或切叶;用作药材和蔬菜;制作工艺品;堆制有机肥;作为饲草或饲料(邓辅唐等,2007)以及提供具有观赏价值的绿化苗木和观赏花卉(利锋等,2009)。研究表明,人工湿地植物资源具有与玉米秸秆相似的热值,可作为一种较好的生物质固体成型燃料的原料;其主要成分为纤维素等,还可作为沼气和乙醇发酵的补充原料;由于其较高的纤维素含量和较低的木质素含量,还是一种十分理想的燃料乙醇资源(何明雄等,2011)。

## 2 人工湿地植物的选择原则

### 2.1 适地适种

不同地区具有不同的环境背景,存在地域的差异和特殊性等,这些均是人工湿地生态系统设计中选择植物要考虑的重要因素,必须做到因地制宜、适地适种(王圣瑞和年跃刚,2004)。适地适种原则包括:适应当地的气候条件、地形条件和人文景观条件。所选植物也一定要适合具体湿地设计的要求,例如,根据植物的原生环境分析,原生于实土环境的一些植物如美人蕉(*Canna generalis*)、芦苇、灯芯草、风车草、皇竹草(*Pennisetum sinense*)、芦竹(*Arundo donax*)、薏苡(*Coxi lacryma-jobi*)等,其根系生长有一定的向土性,配置于表面流湿地系统中,生长会更茂盛,但由于它们的根系大都垂直向下生长,净化处理的效果不及应用于潜流式湿地中。对于一些原生于沼泽、腐殖层、草炭湿地、湖泊水面的植物,如水葱、茭白(*Zizania latifolia* Stapf)、山姜(*Hedychium coronarium*)、蘆草、香蒲、菖蒲(*Acorus calamus*)等,由于其已经适应无土环境生长,因此更适宜配置于潜流式人工湿地。对于一些块根块茎类的水生植物,如荷花(*Nelumbo nucifera*)、睡莲(*Nymphaea* spp.)、慈菇、芋头(*Colocasia esculenta*)等则适宜配置于表面流湿地中。

同时,由于设计的人工湿地系统是周围景观的一部分,因而必须将构建的人工湿地融入其中,而不是独立于景观之外(崔保山和刘兴土,2001)。有些湿地植物种分布广泛,适应多个地区的环境,湿地中的广布种主要属于淡水水生植物、盐生植物和伴生植物。前2大类多属于湿生植物,挺水植物如芦苇、宽叶香蒲(*Typha latifolia*)、窄叶香蒲(*Typha angusti-*

*folia*)、狭叶香蒲 (*Typha angustifolia* L.)、浮生植物如浮萍 (*Lemna minor*)、沉水植物如篦齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*)、菹草 (*Potamogeton crispus*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、轮叶狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum*)、大茨藻 (*Najas marina*)、角茨藻 (*Najas graminea*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、沼生植物如莎草 (*Juncellus serotinus*)、薰草、灯芯草等,均为世界广布种。我国湿地植物种以温带成分为主,这些植物广泛分布在我国东北地区和青藏高原地区。选择湿地植物应优先选用本土植物,慎重引入外来植物,避免引发生物安全性问题。

## 2.2 抗逆性强

选择具有抗逆性的植物,有助于湿地生态系统的健康稳定发展。抗逆性即耐污、耐盐、抗冻、抗热和抗病虫害等能力。①耐污能力。耐污能力是选择人工湿地植物要考虑的重要因素。大多数植物对于污染这种特殊的逆境均有一定的适应性,并且会产生一定的抗性,这种抗性在一定程度上具有遗传性,从而可以进行代间传递(段昌群,1995)。近期有研究表明,刺果泽泻 (*Alisma canaliculatum*) 具有处理含有染料的纺织废水的潜力(Noonpui & Thiravetyan,2011)。②耐盐能力。如果在盐沼地区建立人工湿地,必须考虑选择耐盐能力强的植物物种。③抗冻、抗热能力。由于污水处理系统是全年连续运行的,故要求水生植物即使在恶劣的环境下也能维持正常生长,而那些对自然条件适应性较差或不能适应的植物都将直接影响净化效果。④抗病虫害能力。污水生态处理系统中的植物易滋生病虫害,抗病虫害能力直接关系到植物自身的生长与生存,也直接影响其在处理系统中的净化效果。

## 2.3 净化能力强

净化能力是选择人工湿地植物要考虑的另一重要因素。为了提高人工湿地的去污能力,在选择植物时不但要选择耐污能力强的植物,同时也要求植物的净化能力强,即单位面积的污染物去除率要高,主要从2方面考虑:一方面是植物的生物量较大;另一方面是植物体内污染物的浓度较高。有研究表明芦苇对湿地中氮的吸收能力较强,鸢尾 (*Iris tectorum*) 对湿地中磷的吸收能力较强(陈庆峰等,2001)。具有高生产力的凤眼莲也有较高的吸收潜能(大约每年每1 hm<sup>2</sup>吸收350 kg 磷和2 000 kg 氮),而沉水植物的潜力则相对较小(每年1 hm<sup>2</sup>吸收100 kg 磷和700 kg 氮)(Guntenspergen,1989;Gumbrecht,1993)。用花叶芦竹潜流人工湿地处理

生活污水,在水力停留时间(HRT)=5 d时,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和TP的平均去除率分别可高达93%、88%和98%(谢龙和汪德燿,2009)。陈永华等(2010)对25种冬季湿地植物进行污水净化潜力筛选试验发现,水芹 (*Oenanthe javanica*)、油菜 (*Brassica campestris* L.)、灯芯草、虎耳草 (*Saxifraga stolonifera* Curt.)、德国鸢尾、桂花 (*Osmanthus fragrans*) 和花菖蒲 (*Iris ensata* var. *hortensis*) 的净化能力较强。另外,在去除重金属污染方面应用较多的超累积植物也可以应用到人工湿地中。具体应用时可根据所要处理污水中的主要污染物来选择相应种类的超累积植物,尤其在处理污水中的重金属元素方面,具有非常好的应用前景。有研究表明,当底泥中Cu、Zn含量增加时,凤眼莲、*Ludwigia helminthorrhiza* 和 *Polygonum punctatum* 组织内Cu、Zn的含量也相应增加,因此可以选择这些物种处理富含Cu、Zn的废水(Nunez et al,2011)。

## 2.4 根系发达

植物具有发达的根系是被选为人工湿地植物的重要因素之一(成水平等,2002)。发达的植物根系可以分泌较多的根分泌物,为微生物的生存创造良好的条件,促进根际的生物降解,提高人工湿地净化能力(张锡辉,2002)。陈文音等(2007)的研究表明,根茎型植物的耐污能力较强,而根须植物的根须较发达。污水中的BOD<sub>5</sub>、COD、TN和TP主要是靠附着生长在水生植物根区表面及附近的微生物去除的,植物根系生物量与反硝化菌、脲酶、酸、碱性磷酸酶的活性都正相关,因此应选择根系比较发达的物种,如芦苇、五节芒 (*Miscanthus floridulu*)、菖蒲和吉祥草 (*Reineckia carnea*) 等(李贵宝等,2003;Ge et al,2011)。长苞香蒲 (*Typha angustata*) 和水烛 (*Typha angustifolia*) 等大型种类具有粗壮的根系和许多发达的不定根,也是较佳的净水植物(王磊等,2007),而香蒲根系对外泌氧速率较大(吴振斌等,2000)。植物各器官对N和P的积累与根系表面积显著相关,通过比较15种湿地植物的生长与氮磷吸附的关系表明:大花美人蕉 (*Canna generalis*)、宽叶香蒲、再力花 (*Thalia dealbata*) 及千屈菜 (*Lythrum salicaria*) 有较大根系表面积,并且它们对营养物的吸收和存储率也高于其他种,表明根系表面积可以作为植物选择的标准之一(Fu et al,2011)。

## 2.5 观赏价值和经济价值高

园林设计的理念被引入人工湿地污水处理系统,从而实现治理污染与美化环境的统一。结合景

观生态学理论,巧妙运用具有较高观赏价值的水生植物、湿生植物,营造环境优雅的人工湿地植物景观,在相关水生植物去污研究报告中,所涉及的植物包括挺水植物(茭白、芦苇、水葱和慈姑等)、漂浮植物(凤眼莲、浮萍等)及沉水植物(金鱼藻等)(李晶等,2005)。例如,在郑东新区湿地公园的景观配置中,中心游园水池沿岸选用了姿态优美的耐水湿植物,如柳树(*Willow*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、三角枫(*Acer buergerianum* Miq.)等乔木进行种植设计,并配以低矮的灌木如海桐(*Pittosporum tobira*)、木槿(*Hibiscus syriacus*)和结香(*Daphne odorata* Thunb)等,丰富了水岸空间,同时又营造出一种别样的倒影美(秦佩和田国行,2009)。中关村科技园湿地位于北京中关村环保科技示范园中心区,在其植物选配上,不仅通过大面积的芦苇群与园区景观相结合,还模拟当地原有植物群落并适当增加观赏品种,栽植多种水生植物如:荷花、千屈菜、水葱、泽泻(*Alisma plantago-aquatica*)、香蒲、菖蒲等,设置了2个景观型湿生花园,并配套一些休息设施、雾化喷泉等,让人感觉仿佛置身于自然郊野之中(俞孔坚等,2001;张初夏和张庆,2008)。

在经济价值方面,可以考虑推广种植生产生物质能源的植物。生产生物质能源的植物通常指具有合成较高还原性烃的能力,可产生接近石油成分和可替代石油使用的产品的植物,以及富含油脂的植物,包括速生薪炭林、含糖或淀粉植物、可榨油或产油植物以及其他可提供能源的植物。目前,多数能源植物的研究尚处于试验和示范阶段,而我国把能源植物作为湿地植物种植的研究工作几乎空白(肖波等,2006),今后可以加强这方面的研究。由文辉等(2000)用水蓴菜和水芹处理富营养化水体,不仅获得了很好的去氮除磷效果,而且可以通过收获其茎叶部分取得一定的经济效益。千屈菜、水葱不但景观效果好,而且可以入药;香蒲常用于花卉观赏,花粉、叶、茎均有较高经济价值(熊缨等,2011)。

## 2.6 物种间搭配合理

多物种的生态系统较稳定,不仅保证了物种多样性,而且病虫害生物防治有非常好的效果(邓辅唐等,2007)。多种植物的搭配不仅在视觉上相互衬托,形成丰富又错落有致的景致,对水体污染物处理的功能也能够加以补充,有利于实现生态系统的完全或半完全自我循环(王凌和罗述金,2004)。在选择植物时应根据环境条件和植物群落的特征,按一定比例在空间分布和时间分布上进行安排,使整

个生态系统高效运转,最终形成稳定可持续利用的生态系统(吴振斌,2008)。夏汉平(2002)的研究结果证明,与单一芦苇系统相比,混合种不仅使湿地净化效率提高,而且净化效果变得更稳定,并且混合种还有可能解决 $\text{NO}_3^-$ -N的净化问题。Philip等(2002)也指出,混栽植物系统对硝态氮的去除效果好于单一植物系统。但也要考虑到不同种类的植物生长一起,不仅污染物净化能力和景观效果差异较大,而且存在相互作用,包括2方面:其一是对光、水、营养等资源的竞争;其二是植物之间通过释放化学物质,影响周围植物的生长(孙文浩和余叔文,1992)。另外,一些植物的枯枝落叶经雨水淋溶或微生物的作用也会释放出化感物质,抑制其他植株的生长(贺锋等,1999)。

## 3 研究展望

虽然人工湿地在我国已得到比较广泛的运用,但仍存在一些问题,许多研究工作仍有待深入,笔者认为以下研究方向可进行进一步探讨。

### 3.1 防范外来湿地植物入侵

湿地植物具有高度的入侵性(李洪远和孟伟庆,2006),可能会对原有的生态环境造成严重的威胁(徐正浩和王一平,2004)。随着人们对高效湿地植物的探索,越来越多的外来种被引入人工湿地,如何防范外来湿地植物的入侵成为一个值得关注的问题。建议在湿地的运行管理中加强预警监测,防止其扩散,同时加强对外来湿地植物的基础研究,以便更好的利用和管理。

### 3.2 合理收获湿地植物

多数湿地植物在冬季都会进入休眠状态或者枯萎死亡,若对其进行合理收割,不仅可以防止植物腐烂分解造成的二次污染,而且能够有效去除湿地系统中的氮磷等营养物(鲁静等,2011)。湿地植物对氮磷等营养物的吸收积累受植物类型、pH、养分负荷等多种因素的影响(章文龙等,2009)。在实际运行管理中,何时收割和如何收割等问题有待进一步研究。

### 3.3 深入研究湿地植物资源化

为解决资源浪费和二次污染等问题,已从手工制作、堆肥、饲料生产、新燃料开发等方面对湿地植物的后续利用开展研究,但今后应继续开展人工湿地植物资源化的相关研究,增加人工湿地的经济价值。

## 参考文献

- 陈明利,张艳丽,吴晓芙,等. 2008. 人工湿地植物处理含重金属生活废水的实验研究[J]. 环境科学与技术, 12(31): 164 - 168.
- 陈庆峰,单宝庆,马君健,等. 2001. 不同水生植物在暴雨湿地中的水质净化作用[J]. 环境科学与技术, 33(4): 24 - 28.
- 陈文音,陈章和,何其凡,等. 2007. 人工湿地植物的选择[J]. 生态学报, 27(2): 450 - 458.
- 陈永华,吴晓芙,陈明利,等. 2010. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选[J]. 环境科学, 31(8): 1789 - 1794.
- 陈玉成. 2003. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 成水平,况琪军,夏宜斌. 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.
- 成水平,吴振斌,况琪军. 2002. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2(14): 179 - 184.
- 成水平,吴振斌,夏宜琮. 2003. 水生植物的气体交换与输导代谢[J]. 水生生物学报, 27(4): 413 - 417.
- 成水平,夏宜斌. 1998. 香蒲、灯心草人工湿地的研究(II): 净化污水的空间[J]. 湖泊科学, 10(1): 62 - 66.
- 崔保山,刘兴土. 2001. 湿地生态系统设计的一些基本问题探讨[J]. 应用生态学报, 12(1): 145 - 150.
- 邓辅唐,李强,卿小燕,等. 2007. 湿地植物及其工程应用[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 董金凯,贺锋,吴振斌. 2009. 人工湿地生态系统服务价值评价研究[J]. 环境科学与技术, 32(8): 190 - 196.
- 段昌群. 1995. 植物对环境污染的适应与植物的微进化[J]. 生态学杂志, 14(5): 43 - 50.
- 高辉巧,张俊华. 2008. 城市人工湿地景观设计与生物多样性保护研究——以郑州市郑东新区龙子湖湿地景观规划为例[J]. 中国水土保持, (7): 46 - 48.
- 桂召龙,李毅,沈捷,等. 2011. 采油废水人工湿地处理效果及植物作用分析[J]. 环境工程, 29(2): 5 - 9.
- 何池全,叶居新. 1999. 石菖蒲克藻效应的研究[J]. 生态学报, 1(5): 754 - 758.
- 何明雄,胡启春,罗安靖,等. 2011. 人工湿地植物生物质资源能源化利用潜力评估[J]. 应用与环境生物学报, 17(4): 527 - 531.
- 贺锋,陈辉蓉,吴振斌. 1999. 植物间的相生相克效应[J]. 植物学通报, 16(1): 19 - 27.
- 贺锋,吴振斌,成水平,等. 2004. 复合垂直流人工湿地对氮的净化效果[J]. 中国给水排水, 20(10): 18 - 21.
- 贺锋,吴振斌. 2003. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用[J]. 植物学通报, 20(6): 645 - 647.
- 黄丹萍,贺锋. 2009. 湿地植物根系泌氧研究[J]. 环境科学与技术, 32(B12): 171 - 176.
- 籍国东,孙铁珩,李顺. 2002. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报, 13(2): 224 - 228.
- 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等. 2004. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 24(8): 1718 - 1723.
- 李光辉,何长欢,刘建国. 2010. 不同湿地植物的根系泌氧作用与重金属吸收[J]. 水资源保护, 26(1): 17 - 19.
- 李贵宝,周怀东,刘芳. 2003. 水陆交错带芦苇根际及其净化污水的初步研究[J]. 中国水利, (6): 66 - 68.
- 李洪远,孟伟庆. 2006. 湿地中的植物入侵及湿地植物的入侵性[J]. 生态学杂志, 25(5): 577 - 580.
- 李晶,于泽源,耿美云. 2005. 人工湿地植物景观营造的研究[J]. 科技资讯, (24): 116 - 117.
- 李志炎,唐宇力,杨在娟,等. 2004. 人工湿地植物研究现状[J]. 浙江林业科技, 24(4): 56 - 62.
- 利锋,何江,张学先. 2009. 水培经济植物净化养殖废水研究现状[J]. 安徽农业科学, 37(22): 10656 - 10658.
- 梁威,吴振斌. 2000. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 12(3): 32 - 37.
- 卢剑波,傅智慧. 2006. 水生植物在人工湿地废水净化中的应用研究[J]. 技术与市场, (8): 25 - 27.
- 鲁静,周虹霞,田广宇,等. 2011. 洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征[J]. 生态学报, 31(3): 709 - 715.
- 陆松柳,胡洪营,孙迎雪,等. 2009. 种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究[J]. 环境科学, 30(7): 1901 - 1905.
- 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究[J]. 生态环境学报, 20(4): 676 - 680.
- 秦佩,田国行. 2009. 浅议城市湿地公园建设——以郑东新区湿地公园为例[J]. 西北林学院学报, 24(5): 213 - 216.
- 宋英伟,年跃刚,黄民生,等. 2009. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响[J]. 环境工程学报, 7(3): 1213 - 1217.
- 孙文浩,余叔文. 1992. 相生相克效应及其应用[J]. 植物生理学通讯, (2).
- 王佳,舒新前. 2007. 人工湿地植物的作用和选择[J]. 环境与可持续发展, (4): 62 - 64.
- 王凌,罗述金. 2004. 城市湿地景观的生态设计[J]. 中国园林, (1): 39 - 41.
- 王圣瑞,年跃刚. 2004. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学, 16(1): 91 - 96.
- 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,等. 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.
- 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,贺锋,程旺元,等. 2000. 极谱法测定无氧介质中根系氧气输导[J]. 植物生理学报, 26(3): 177 - 180.
- 吴振斌. 2008. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京: 科学出版社.

- 夏汉平. 2002. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 21(4): 51-59.
- 肖波, 周英彪, 李建芬. 2006. 生物质能循环经济技术[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 谢龙, 汪德耀. 2009. 花叶芦竹潜流人工湿地处理生活污水的研究[J]. 中国给水排水, 5(25): 89-91.
- 熊纛, 苏志刚, 高举明. 2011. 不同挺水植物在生活污水中生长量及去污能力比较研究[J]. 环境科学与管理, 36(1): 63-66.
- 徐伟锋, 孙力平. 2003. DO对同步硝化反硝化影响及动力学[J]. 城市环境与城市生态, 16(1): 8-10.
- 徐正浩, 王一平. 2004. 外来入侵植物成灾的机制及防除对策[J]. 生态学杂志, 23(3): 124-127.
- 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 2000. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, (1): 99-102.
- 俞孔坚, 李迪华, 孟亚凡. 2001. 湿地及其在高科技园区中营造[J]. 中国园林, (2): 26-28.
- 张军, 周琪, 何蓉. 2004. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理[J]. 生态环境, 13(1): 98-101.
- 张锡辉. 2002. 水环境修复工程学原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 张初夏, 张庆. 2008. 中关村环保科技示范园中心区湿地水系可持续设计[J]. 中国园林, 24(5): 35-39.
- 章文龙, 曾从盛, 张林海, 等. 2009. 闽江河口湿地植物氮磷吸收效率的季节变化[J]. 应用生态学报, 20(6): 1317-1322.
- 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明. 2005. 人工湿地污水处理系统脱氮机理研究进展[J]. 四川环境, 24(5): 64-67.
- 朱洁, 陈洪斌. 2009. 人工湿地堵塞问题的探讨[J]. 中国给水排水, 6(25): 24-33.
- Armstrong W. 1964. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants [J]. Nature, 204(11): 801-802.
- Barber D A, Martin J K. 1976. The release of organic substances by cereal roots into soil [J]. New Phytol, 76: 69-80.
- Beven K, German P. 1982. Macro pores and water flow in soils [J]. Wat. Resour. Res., 18(5): 1311-1325.
- Brix H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed wetlands [J]. Wat. Sci. Tech., 35(5): 11-17.
- Cheng S, Grosse W, Karren brock F, et al. 2001. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals [J]. Ecol. Eng., 18(3): 317-325.
- 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.
- Fu Y J, Chen X, Luo A C. 2011. A comparative study on the growth and nitrogen and phosphorus uptake characteristics of 15 wetland species [J]. Chemistry and Ecology, 27(3): 263-272.
- Ge Y, Zhang C B, Jiang Y P, et al. 2011. Soil microbial abundances and enzyme activities in different rhizospheres in an Integrated Vertical Flow Constructed Wetland [J]. Clean-Soil Air Water, 39(3): 206-211.
- Gebremariam S T, Beutel M W. 2008. Nitrate removal and DO levels in batch wetland mesocosms: cattail (*Typha* spp.) versus bulrush (*Scirpus* spp.) [J]. Ecological Engineering, 34: 1-6.
- Guntenspergen G R. 1989. Wetland vegetation [M]//Hammer D A. Wetland for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural. Lewis Publishers.
- Gumbricht T. 1993. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte system [J]. Ecological Engineering, 3(8): 4-7.
- Kickuth R. 1981. Abwasserreinigung in mosaikmatrizen aus aeroben und anaeroben teilzirkeln [M]// Moser F. Grundlagen der Abwasserreinigung: 639-665.
- Li J B, Wen Y, Zhou Q, et al. 2008. Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 99: 4990-4996.
- 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]. Environmental Pollution, 11(9): 413-420.
- Liu D, Ge Y. 2009. Constructed wetland in China: recent developments and future challenges [J]. Reviews, 7(5): 261-268.
- Ngo V. 1987. Boosting pond performance with aquaculture [J]. Operations Forum, 4: 20-23.
- Noonpui S, Thiravetyan P. 2011. Treatment of reactive azo dye from textile wastewater by burhead (*Echinodorus cordifolius* L.) in constructed wetland: effect of molecular size [J]. Environmental science and health, 46(7): 79-714.
- Nunez S E R, Negrete J L M, Rios J E A, et al. 2011. Hg, Cu, Pb, Cd and Zn accumulation in microphytes growing in tropical wetlands [J]. Water Air and Soil Pollution, 216(1/4): 361-373.
- Philip A M B, Alexander J H. 2000. Denitrification in constructed free water surface wetlands: II Effects of vegetation and temperature [J]. Ecological Engineering, 14: 17-32.
- Platzer C. 1996. Enhanced nitrogen elimination in subsurface flow artificial wetlands-a multi stage concept [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Wetland Sys-

- tems for Water Pollution Control. Vienna, Austria; Universität für Bodenkultur Wien; 1-9.
- Reddy K R, Angelo E M, Debusk T A. 1989. Oxygen transport through aquatic macrophytes: The role in waste water treatment [J]. *Journal of Environ. Qual.*, 19(2): 261-270.
- Rovira A D. 1965. Interactions between plant roots and soil microorganisms [J]. *Ann. Rev. Microbial.*, 19: 241-266.
- Seidel K. 1964. Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen [J]. *Naturwiss.*, 51: 395.
- Seidel K. 1966. Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen [J]. *Naturwiss.*, 53: 289-297.
- Seidel K. 1976. Macrophytes and water purification [C]//Tourbier J. *Biological Control of Water pollution*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press: 109-120.
- Smith I D, Bis G N, Lemon E R, et al. 1997. A thermal analysis of a sub-surface, vertical flow constructed wetland [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 35 (5): 55-62.
- Villasenor J, Mena J, Fernandez F J, et al. 2011. Kinetic of domestic wastewater COD removal by subsurface constructed wetlands using different plant species in temperate period [J]. *Environmental Analytical Chemistry*, 91(7/8): 693-707.
- Wen Y, Chen Y, Zheng N, et al. 2010. Effects of plant biomass on nitrate removal and transformation of carbon sources in subsurface-flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 101: 7286-7292.
- Wetzel R G, Howe M J. 1999. High production in a herbaceous perennial plant achieved by continuous growth and synchronized population dynamics [J]. *Aquat. Bot.*, 64(2): 111-129.
- Zhang Z Y. 2008. The Application of Energy-saving and Environmental-protection Materials in Landscape Design [J]. *Journal of Sustainable Development*, 1(2): 129-132.

(责任编辑 杨春艳)