

高氨氮浓度下湿地植物筛选及脱氮效果研究

郭 鑫^{1,2}, 张列宇², 席北斗², 刘 云^{1*}, 李晓光²

(1.农业应用新技术北京市重点实验室,北京农学院植物科学技术学院,北京 102206; 2.中国环境科学研究院水环境系统研究室,北京 100012)

摘 要:为研究潜流人工湿地处理农村生活污水的脱氮效果,实验采用氨氮浓度为 20、30、40、50 mg·L⁻¹ 的人工配置生活污水,通过实验室盆栽法研究 7 种典型水生植物风车草(*Cyperus alternifolius*)、花叶芦竹(*Arundo donax* var.)、再力花(*Thalia dealbata*)、东方香蒲(*Typha orientalis* Presl.)、千屈菜(*Spiked Loosestrife*)、黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)的生长状况、发育规律以及对污水中氮的同化吸收作用,结合植物本身的形态指标,对处理农村生活污水的高效脱氮型潜流湿地的植被的脱氮效果进行综合评定。结果表明:植物在 20 mg·L⁻¹ 的处理中长势最好,各植物的形态指标随氨氮浓度的增加而递减;黄花鸢尾(*Iris pseudacorus*)在 NH₃-N 浓度 50 mg·L⁻¹ 以上的条件下不能生长,花叶芦竹(*Arundo donax* var.)在 NH₃-N 浓度 30 mg·L⁻¹ 以上的条件下不能生长,梭鱼草(*Pontederia cordata*)在 NH₃-N 浓度 20 mg·L⁻¹ 以上的条件下不能生长;植物脱氮效果随氨氮浓度的增加而递减。综合评定 7 种植物的脱氮效果,比较好的是再力花(*Thalia dealbata*)、东方香蒲(*Typha orientalis* Presl.)、风车草(*Cyperus alternifolius*)这 3 种植物。

关键词:人工湿地;氨氮;植物筛选;脱氮效果

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)05-0993-08

Denitrification and Selection of Wetland Plants Under High Ammonia-nitrogen Concentration Environment

GUO Xin^{1,2}, ZHANG Lie-yu², XI Bei-dou², LIU Yun^{1*}, LI Xiao-guang²

(1.Beijing Key Laboratory for Agricultural Application and New Technique, College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2.Water Environment System Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To study the nitrogen removal efficiency of constructed wetlands for treatment of domestic wastewater, simulated wastewater with different concentration was used in this experiment. Seven plants which were *Cyperus alternifolius*, *Arundo donax* var., *Thalia dealbata*, *Typha orientalis* Presl., *Spiked Loosestrife*, *Iris pseudacorus*, *Pontederia cordata* were studied for the growth, and adsorption under the different concentration gradient. Ammonia was assimilated into amino acids when it was absorbed by plants, but if the ammonia concentration was too high, ammonia would accumulate in plants and inhibit the growth of plants, for the excessive ammonia in plants could inhibit the electron transport system in the process of plant respiration. The results showed that it was the best for plants growing at 20 mg·L⁻¹ concentration. It was showed that higher ammonium concentration resulted in lower morphological indicators. The inhibiting nitrogen concentration for plant growth was different depending on plant species. The inhibiting concentrations of *Iris pseudacorus*, *Arundo donax* and *Pontederia cordata* were 50 mg·L⁻¹, 30 mg·L⁻¹ and 20 mg·L⁻¹ respectively. As increase of ammonia-nitrogen concentration, the effect of plant on nitrogen removal decreased. *Thalia dealbata*, *Typha orientalis* Presl. and *Cyperus alternifolius* were more effective in nitrogen removal in the 7 species of plants.

Keywords: constructed wetland; ammonia-nitrogen; plant selection; denitrification

随着我国利用人工湿地净化农村生活污水研究的逐渐开展^[1-7],如何去除农村生活污水的高氨氮越来越

越受到学者们的关注,研究高氨氮浓度下水生植物的筛选及脱氮效果对于人工湿地去除农村生活污水中的高含量氨氮具有深刻意义。

作为人工湿地组成的重要因素,水生植物的应用和筛选研究^[8-20]也相继出现,马安娜^[21]在研究北京地区人工湿地优势植物筛选时筛选出芦苇、香蒲、慈姑、泽泻,其处理的是地表水或作为二级处理来净化污水,因此氮负荷较低;陈永华^[22]在筛选湿地植物时就植物

收稿日期:2010-11-09

基金项目:国家自然科学基金(40871232);国家科技支撑项目:城乡统筹生活污染控制和生态建设共性技术与综合示范(2009BADCB04)

作者简介:郭 鑫(1985—),男,硕士研究生,研究方向为水环境处理。
E-mail:zibo-888@126.com

* 通讯作者:刘 云 E-mail:housqly@126.com

根系的生理特性进行了深入探讨,并对植物根系特征做出分类;祝宇慧等^[23]在湿地植物对模拟污水的净化效果研究中选出石菖蒲、水芹和香菇具有较好的净化效果,但所配置的污水负荷较低;王磊^[24]在研究北方人工湿地植物筛选时指出,筛选植物应从植物生态适应能力、耐污能力、根系的发达程度和景观效果等;廖新梯^[25]在筛选处理猪场废水的人工湿地植物时,得出风车草、香根草等水生植物的耐氨上限,但未就植物随氨氮浓度增加而体现的规律进行研究和分析。

综上所述,湿地植物需根据污水湿地类型和污水特点进行筛选。氨被植物吸收后立即被同化为氨基酸,而当氨浓度过高时,在植物体内积累,便会影响植物的生长,植物体内的过量的氨可能会抑制植物呼吸过程中的电子传递系统^[26],不同植物的耐氨能力是不一样的^[27],因此这是我们选择人工湿地植物的重要依据,农村生活污水中的高氨氮含量可能是影响人工湿地正常运行的重要原因,基于以上研究背景,本文将研究不同水生植物对氨的耐受能力并进行脱氮效果的评价,这对于提高湿地脱氮效果和湿地处理农村生活污水时的正常运行具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取 7 种典型挺水植物作为实验材料,植株从苗圃中购得,尽量挑选长势良好大小均匀的植株,详细资料如表 1。

表 1 供试植物资料		
Table 1 Information on the tested plants		
Chinese Name	Latin Name	Habits
风车草	<i>Cyperus alternifolius</i>	Perennial aquatic plant
花叶芦竹	<i>Arundo donax var.</i>	Perennial aquatic plant
再力花	<i>Thalia dealbata</i>	Perennial aquatic plant
东方香蒲	<i>Typha orientalis Presl.</i>	Perennial aquatic plant
梭鱼草	<i>Pontederia cordata</i>	Perennial aquatic plant
黄花鸢尾	<i>Iris pseudacorus</i>	Perennial aquatic plant
千屈菜	<i>Spiked Loosestrife</i>	Perennial aquatic plant

1.2 实验方法

实验采用人工配置生活污水(主要成分为NH₄Cl, KH₂PO₃, Ca(NO₃)₂, NaNO₂ 和蒸馏水等),分别按照 NH₃-N 浓度为 20、30、40、50 mg·L⁻¹ 配制而成(占 TN 浓度的 80%~90%),为研究 NH₃-N 浓度对植物生长及脱氮效果的影响,只改变 NH₄Cl 的加入量,其他药品量不做改变。完成后测定溶液中 TN 和 NH₃-N 的浓度以精确确定初始值(表 2)。

表 2 供试人工配制污水初始浓度		
Table 2 The initial concentrations of wastewater of manual preparation		
Treatment number	TN/mg·L ⁻¹	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹
I	25.33	20.18
II	35.43	30.05
III	45.26	40.13
IV	55.29	50.25

采用容积约为 10.5 L 的黑色广口塑料桶作为容器,植株直接放入桶内,每种植物栽 2 株,桶内污水量为 10 L,不添加任何基质,水生植物穿入打有孔洞的白色泡沫板,并用海绵填堵植物与泡沫板之间的空隙,用来固定植株并确保不透光,泡沫板平放在盛装有配制出的污水的塑料桶上,用塑料夹子固定,并将不放置植物的相同装置,泡沫板同样打两个孔,用海绵直接填堵上这两个孔设为对照。实验在实验室内临窗进行,将购买的植株在自来水中清洗干净,取出风干 20 min 后称重,记录培养前鲜重。实验时长为 14 d,期间实验室气温基本保持在 30 ℃左右,通过临窗培养进行采光,尽可能保持各处理采光和通风条件的一致。期间观察 4 个处理中的植物长势,每 2 d 记录一次植物形态特征变化。14 d 后,取出各处理中的植物,存活的植物取出后,用自来水洗干净,风干 30 min 后称重,然后将实验中植物烘干 48 h 至恒重,植物的茎按照垂直长度三等分,利用凯氏定氮法测定茎和根部的氮含量,另将有植物存活的桶内水样加蒸馏水至 10 L,记录各桶的加水量,测定水样中的 NH₃-N 浓度,采用《水与废水监测分析方法》^[28]中的标准方法:TN 采用碱性过硫酸钾紫外可见分光光度法;NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法。

2 结果与分析

2.1 不同氨氮浓度条件下植物生长变化规律

2.1.1 不同氨氮浓度下植物长势定性分析

每 2 d 所记录的 4 个处理中各植物的 14 d 内的长势如表 3。可以看出,风车草和千屈菜在 4 个处理中均未出现枯萎现象,生长状况是最好的,其次是再力花和东方香蒲,再力花在 NH₃-N 浓度 50 mg·L⁻¹ 处理的后期生长过程中叶片有轻度枯萎现象,东方香蒲在 NH₃-N 浓度 40 mg·L⁻¹ 处理和 50 mg·L⁻¹ 处理中出现轻度枯萎,植物生长相对缓慢,但两种植物均未出现重度枯萎,植物均能够生长。黄花鸢尾次之,在 NH₃-N 浓度 40 mg·L⁻¹ 处理中出现轻度枯萎,而在

表 3 不同氨氮浓度下植物长势定性分析

Table 3 Qualitative analysis of plants growing under different ammonia-nitrogen concentrations

Plants	Treatments	Time/d							Plants	Treatments	Time/d						
		2	4	6	8	10	12	14			2	4	6	8	10	12	14
<i>Thalia dealbata</i>	I	a	a	a	a	a	a	a	<i>Cyperus alternifolius</i>	I	a	a	a	a	a	a	a
	II	a	a	a	a	a	a	a		II	a	a	a	a	a	a	a
	III	a	a	a	a	a	a	a		III	a	a	a	a	a	a	a
	IV	a	a	a	b	b	b	b		IV	a	a	a	a	a	a	a
<i>Arundo donax var.</i>	I	a	a	a	a	a	a	a	<i>Pontederia cordata</i>	I	a	b	c	c	c	c	c
	II	a	c	c	c	c	c	c		II	b	c	c	c	*	*	*
	III	b	*	*	*	*	*	*		III	c	*	*	*	*	*	*
	IV	c	*	*	*	*	*	*		IV	c	*	*	*	*	*	*
<i>Iris pseudacorus</i>	I	a	a	a	a	a	a	a	<i>Spiked Loosestrife</i>	I	a	a	a	a	a	a	a
	II	a	b	a	a	a	a	a		II	a	a	a	a	a	a	a
	III	a	b	b	b	b	b	b		III	a	a	a	a	a	a	a
	IV	a	b	c	c	c	c	c		IV	a	a	a	a	a	a	a
<i>Typha orientalis Presl.</i>	I	a	a	a	a	a	a	a									
	II	a	a	a	a	a	a	a									
	III	a	a	a	b	b	b	b									

注：“a”表示植株长势良好；“b”表示轻度枯萎；“c”表示重度枯萎；“*”代表植株死亡。

NH₃-N 浓度 50 mg·L⁻¹ 处理时已出现重度枯萎,说明黄花鸢尾不适合在氨氮浓度为 50 mg·L⁻¹ 以上的条件下生长。

梭鱼草在 NH₃-N 浓度 20 mg·L⁻¹ 和 30 mg·L⁻¹ 处理中就已出现重度枯萎现象,在 NH₃-N 浓度 40 mg·L⁻¹ 和 50 mg·L⁻¹ 处理中已不能生长,说明梭鱼草在氨氮浓度为 20 mg·L⁻¹ 以上的条件下不适合生长。花叶芦竹除了在 NH₃-N 浓度 20 mg·L⁻¹ 处理中长势良好以外,在后面的 3 个处理中均表现出重度枯萎和死亡现象,因此,花叶芦竹在氨氮浓度为 30 mg·L⁻¹ 以上的条件下不适合生长。

综上分析可对 7 种植物在氨氮浓度范围 20~50 mg·L⁻¹ 时,耐受氨氮能力排序为:风车草≈千屈菜>再力花>东方香蒲>黄花鸢尾>花叶芦竹>梭鱼草。

2.1.2 植物在不同氨氮浓度下水分消耗量分析

植物在不同氨氮浓度下的水分消耗量可反映植物生长受氨氮浓度的影响程度,植物水分消耗量和植物的生命活动有直接关系,植物消耗水分靠根系的吸收和叶片蒸腾,吸收水分靠根系,蒸腾作用和叶片面积以及数量有直接关系^[26],所以分析植物对水分的消耗在一定程度上能够反映该植物的根系特征以及地上生物量的多少的综合水平。

图 1 表明,不同植物所消耗的水分的量的差别较大,各处理中再力花消耗水分最多,其次是香蒲和黄

花鸢尾,风车草和千屈菜所消耗的水分相对较少,变化幅度不明显,千屈菜仅比空白多出 100 mL 左右,原因是千屈菜叶片面积比较小,并且茎的木栓化程度较高,所以该植物的蒸腾速率相对较低。

受氨氮浓度对植物长势的影响,水分消耗量也表现出相似的规律,每种植物均出现随氨氮浓度增加水分消耗量减少的现象,由于风车草的地上生物量较少,千屈菜叶片面积较小,并且二者的耐氮能力较强,所以风车草和千屈菜的水分消耗量变化幅度较小。

2.1.3 不同植物在不同氨氮浓度下的生长量分析

植物生长受氨氮浓度影响还表现为在不同氨氮浓度下生长量的不同,生长量可反映植物长势的好坏,本实验中的生长量具体指植物鲜重的增加量。

由图 2 看出,在 4 个处理中,再力花的鲜重增加量是最高的,其次是东方香蒲,风车草和千屈菜均比较低,明显低于再力花、东方香蒲和黄花鸢尾;花叶芦竹在氨氮浓度为 20 mg·L⁻¹ 左右时鲜重增加量要高于黄花鸢尾,其在后面 3 个处理的数据因为植株重度枯萎而无效;同理,梭鱼草在 4 个处理中的数据均无效;黄花鸢尾在第 4 个处理中出现重度枯萎现象,数据无效,但在前 3 个处理中鲜重增加量均高于风车草和千屈菜。

此外,图 2 还可以得出一个规律,即不同植物随着氨氮浓度的增加而鲜重增加量均减少,其中再力

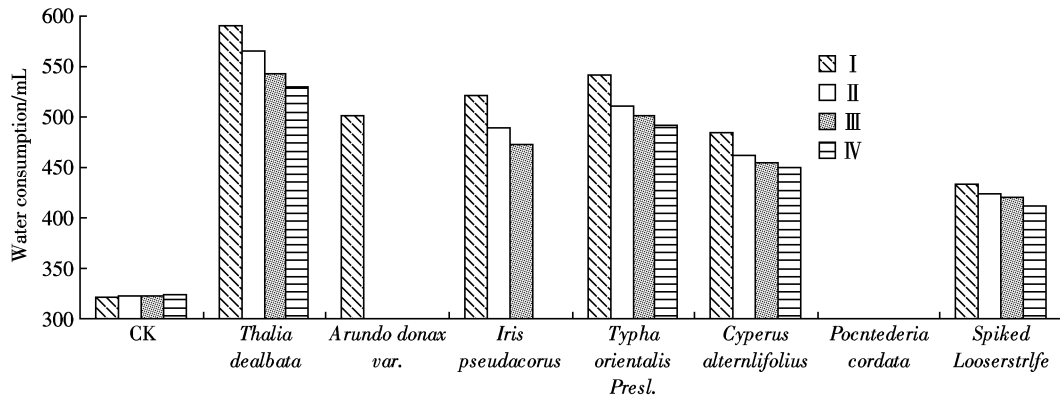


图 1 不同氨氮浓度下植物水分消耗量

Figure 1 Plant water consumption in different treatments

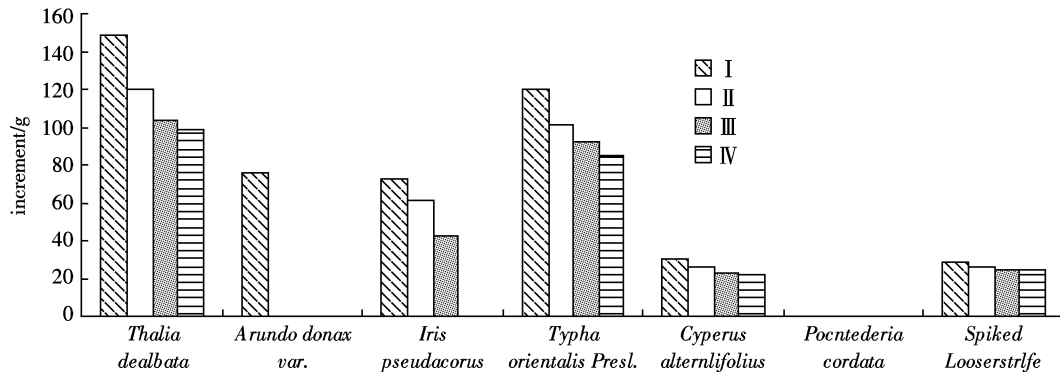


图 2 各处理不同植物鲜重增加量(取两株植物平均值)

Figure 2 Increment of weight of different plants in each treatment(average of two plants taken)

花、东方香蒲和黄花鸢尾的降低幅度比较大,而风车草和千屈菜的变化不明显,这说明在氨氮浓度 $20\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的范围内,氨对风车草和千屈菜生长的影响较前 3 种植物要小得多。

2.1.4 不同氨氮浓度下植物体内氮分配规律分析

从图 3~图 7 中可以看出,植株 4 个部位的单位质量含氮量均随着氨氮浓度的增加而增加(黄花鸢尾在 IV 处理中出现严重枯萎现象,故数据无效,同理,梭鱼草和花叶芦竹数据均为无效数据),这说明在一定的氨氮浓度范围内,氨氮浓度的提高能够增加植物体内的含氮量。在 4 个处理中,此 5 种植物体内均有茎上部的单位质量含氮量高于其他部位,东方香蒲和黄花鸢尾的单位质量含氮量相对较少;各植物在茎中部的单位质量含氮量在 4 个部位的对比中相对较低,这可能是由于根部吸收氮素向茎部供应,而茎部则优先为茎上部供应氮素,根部直接接触氮素环境,茎下部接近根部,所以茎中部的含氮量应最少。

2.1.5 不同植物在不同氨氮浓度下的脱氮效果分析

由图 8 可以得出,在不同的氨氮浓度下,植物去

除氨氮的能力有很大的差别。氨氮浓度为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时再力花和东方香蒲的去除率最高,分别高达 98.9% 和 96.7%,其次是风车草和千屈菜,去除率由大到小依次为再力花>香蒲>风车草>千屈菜>黄花鸢尾>花叶芦竹>梭鱼草;当氨氮浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,去除率最高的依然是再力花和香蒲,但香蒲要略高于再力花,这和不同植物的耐受氨氮能力有关,排序由大到小为香蒲>再力花>风车草>千屈菜>黄花鸢尾(花叶芦竹因只在 I 处理生长良好,其他 3 个处理下植株已严重枯萎和死亡,有效数据只有 I 处理;同理,黄花鸢尾在 IV 处理中严重枯萎,数据无效,而梭鱼草在 4 个处理中均不能生长,无有效数据);氨氮浓度为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,去除率最高是再力花和风车草,再力花去除率高于风车草,香蒲去除率低于风车草,但仍高于千屈菜,则排序为再力花>风车草>香蒲>千屈菜>黄花鸢尾;当氨氮浓度增加到 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,去除率最高的仍然是再力花和风车草,但香蒲的去除率低于千屈菜,排序为再力花>风车草>千屈菜>香蒲>黄花鸢尾。

以上分析以及观察图标表明,再力花在 4 个处理

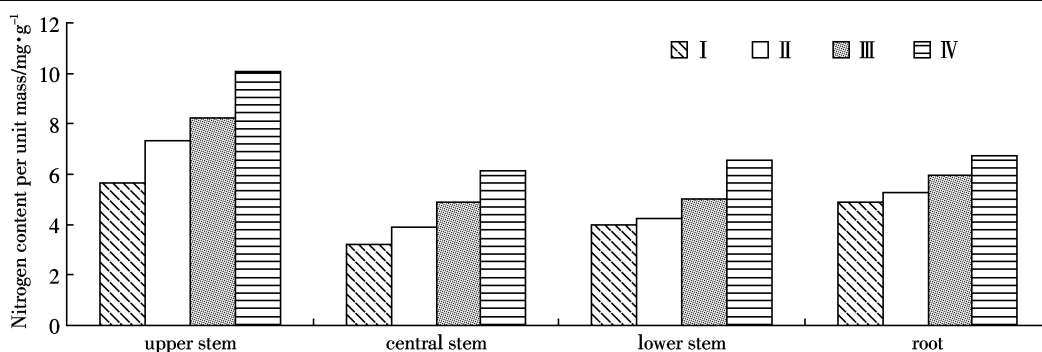


图3 再力花单位质量含氮量

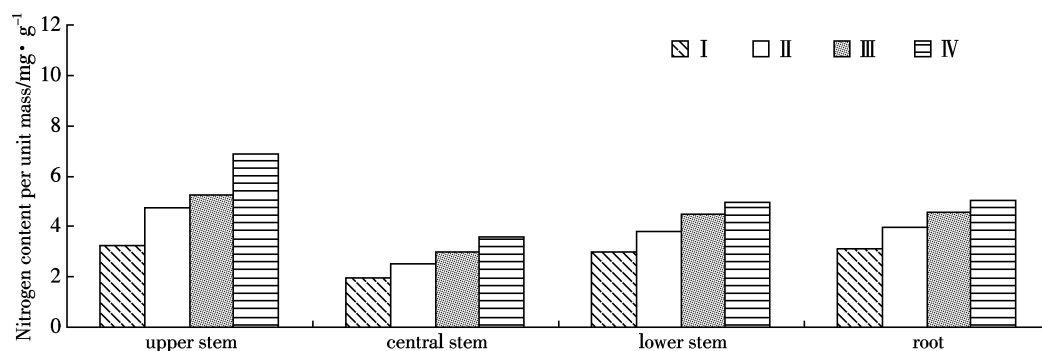
Figure 3 Nitrogen content per unit mass of *Thalia dealbata*

图4 东方香蒲单位质量含氮量

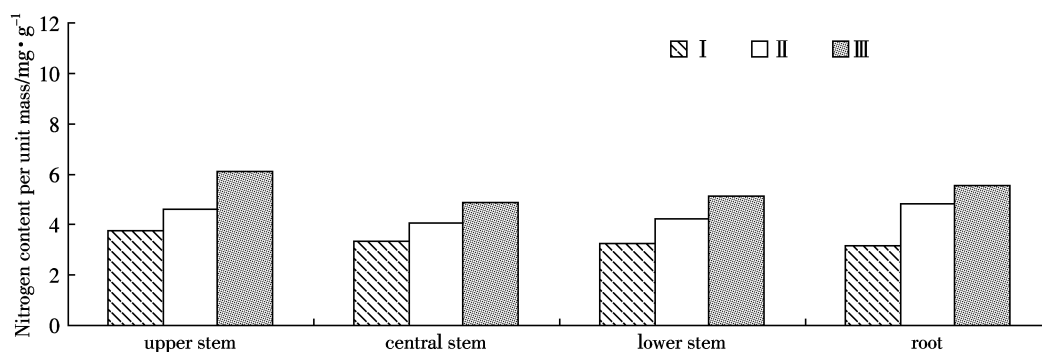
Figure 4 Nitrogen content per unit mass of *Typha orientalis Presl.*

图5 黄花鸢尾单位质量含氮量

Figure 5 Nitrogen content per unit mass of *Iris pseudacorus*

中去氮效果是最好的,风车草和千屈菜的去氮效果随氨氮浓度增加而降低的幅度不明显,空白的氨氮去除率随氨氮浓度的增加而略有提高,空白去除氨氮主要靠氨氮自身挥发和氧化,这和氨氮浓度增加推动氨氮挥发有关;此外,其他有植物的处理(花叶芦竹、梭鱼草除外)均不同程度地表现出随氨氮浓度增加而去除率降低的现象。笔者认为,随着氨氮浓度的增加,植物呼吸受到不同程度的阻碍,从而影响植物生长发育,进而影响植物对氨氮的同化吸收能力,所以表现出去除率随氨氮浓度增加而降低的现象。

2.2 7种植物作为处理农村生活污水的高效脱氮型潜流湿地植物的适应性评定

评定方法参考廖新伟^[25]和庞金华等^[29]的评定湿地植物适应性的方法,但评定因素根据实验目的而有所不同,每种植物从耐氨能力、生物量、根系、脱氮能力、景观等5个指标进行评价,根据人工湿地处理农村生活污水的实际需要,上述5个指标的重要性不同,赋予它们不同的权重,依次记作 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 q_5 ,其权重值分别为35%、20%、20%、15%、10%,给予耐氨能力最高的权重,是由于植株能够生长是植物发挥作用

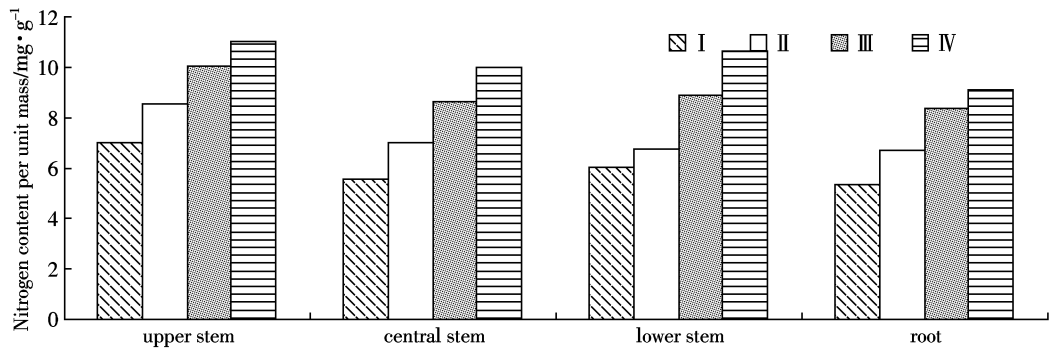


图 6 风车草单位质量含氮量
Figure 6 Nitrogen content per unit mass of *Iris Cyperus alternifolius*

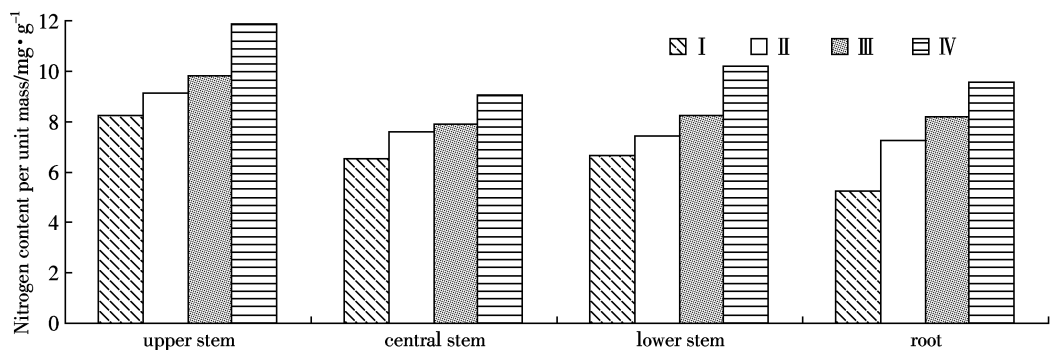


图 7 千屈菜单位质量含氮量
Figure 7 Nitrogen content per unit mass of *Iris Spiked Loosetrife*

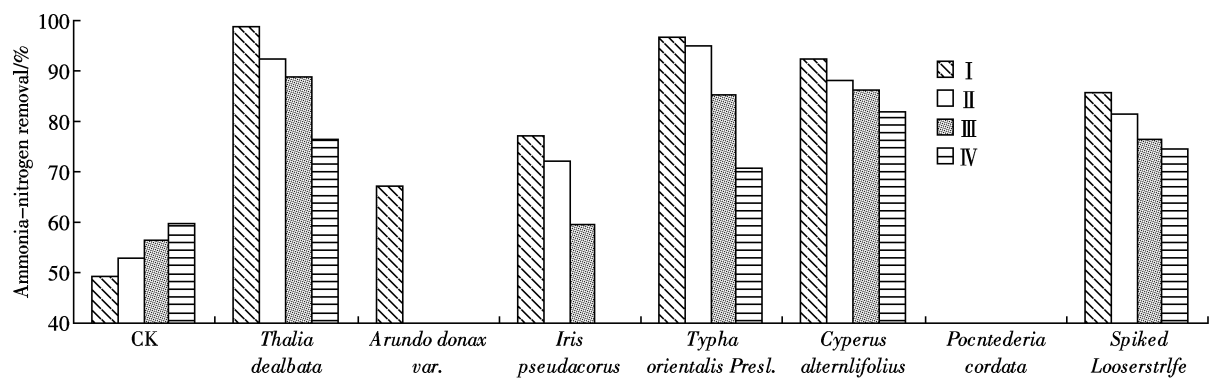


图 8 植物在不同氨氮浓度下的脱氮效率
Figure 8 Ammonia-nitrogen removal efficiency of different plants in each treatment

的前提;给予脱氮能力 15%的权重是为了体现脱氮型湿地的功能,植物的吸收是湿地脱氮量中的重要部分;根系权重 20%是为了体现潜流湿地的主要净化作用在于植物根系-微生物-基质系统。根据每种植物在各指标中的表现分别给出相应分数,分别为 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 ,每个指标以百分制给予相应分数(满分 100,按照排序每低一个级别减 10 分), M 为每种植物的综合评定值, $M=c_1q_1+c_2q_2+c_3q_3+c_4q_4+c_5q_5$,即每个指标得分与该指标所占权重乘积之和,评定结果如表 4。

从表 4 可以看出,综合评定结果排序和任何一个

指标的单独排序是不同的。因此,在筛选水生植物时必须结合实验目的进行综合考虑,不可以偏概全。从耐氨能力、生物量、根系、脱氮能力、景观这 5 种因素综合来看,这 7 种植物中适合作为处理农村生活污水的高效脱氮型潜流湿地植被的前 3 种植物包括再力花、东方香蒲和风车草。

3 讨论

植物体内的过量的氨可能会抑制植物呼吸过程中的电子传递系统^[26],实验设想高氨氮浓度会影响植

表 4 7 种植物处理农村生活污水综合评定

Table 4 Comprehensive assessment of seven plants for rural sewage treatment

Plants	Ammonia-resistant capacity (35%)	Biomass (20%)	Root (20%)	Denitrification (15%)	Landscape (10%)	General comments (100%)	Sort
<i>Thalia dealbata</i>	90(31.5)	100(20)	100(20)	100(15)	100(10)	96.5	1
<i>Arundo donax var.</i>	70(24.5)	70(14)	70(14)	60(9)	80(8)	69.5	6
<i>Iris pseudacorus</i>	80(28)	80(16)	70(14)	70(10.5)	90(9)	77.5	5
<i>Typha orientalis Presl.</i>	90(31.5)	90(18)	80(16)	90(13.5)	90(9)	88	2
<i>Cyperus alternifolius</i>	100(35)	60(12)	90(18)	90(13.5)	90(9)	87.5	3
<i>Pontederia cordata</i>	60(21)	70(14)	80(16)	50(7.5)	90(9)	67.5	7
<i>Spiked Loosestrife</i>	100(35)	60(12)	90(18)	80(12)	80(8)	85	4

注:括弧前为该指标百分制得分,括弧中为得分与该指标权重乘积。

物的生长发育和脱氮效果。实验数据所揭示的规律显示,水生植物生长环境中氨氮浓度较高,则会影响水生植物的生长发育以及脱氮效果,氨氮浓度越高,对植物的影响越大,实验数据显示出明显规律。

在传统的植物筛选研究基础上,此次高氨氮浓度下植物筛选的研究具普遍性,从筛选出的应用较为广泛的植物中再次深入筛选,农村生活污水水质的波动性和植物的耐氮能力决定了需设置氨氮浓度梯度来进行植物筛选。实验得知,在设置的氨氮浓度范围内,黄花鸢尾、花叶芦竹和梭鱼草等已达氨氮耐受极限,说明在为处理农村生活污水的人工湿地选取植物时需选择耐氮能力相对较高的植物。

实验是实验室内静态水培实验,实验周期相对较短,实验室气温相对恒定及其他条件均为可控条件,考虑到在实际应用中的诸多不稳定因素,以后实验可选取人工湿地或小型模拟装置来研究植物在高氨氮浓度下生长的季节变化规律等。

4 结论

(1)高氨氮浓度会影响湿地挺水植物的生长,具体表现为影响植物长势;植物对水分的消耗量随氨氮浓度增加而减少;植物的鲜重增加量随氨氮浓度的增加而减少;植物体内单位质量氮含量随氨氮浓度的增加而增加;植物对氨氮的同化吸收作用随着氨氮浓度的增加而减弱。

(2)不同植物的耐氨氮能力不同:黄花鸢尾在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的条件下不能生长;花叶芦竹在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的条件下不能生长;梭鱼草在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的条件下不能生长。

(3)供试的 7 种典型挺水植物中,再力花、东方香蒲和风车草是最适合选用作为处理农村生活污水的

脱氮型潜流人工湿地的 3 种植物。

参考文献:

- [1] 何成达, 谈 玲, 葛丽英, 等. 波式潜流人工湿地处理生活污水的实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 766-769.
HE Cheng-da, TAN Ling, GE Li-ying, et al. Wave subsurface constructed wetland treatment of domestic sewage study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 766-769.
- [2] 李长源, 汤大伟. 关于农村生活污水处理技术的研究 [J]. 西南给排水, 2009(2): 15-18.
LI Chang-yuan, TANG Da-wei. Research on rural sewage treatment[J]. *Southwest Water & Wastewater*, 2009(2): 15-18.
- [3] 莫建红. 人工湿地工艺处理农村生活污水[J]. 广东化工, 2009(7): 166-167.
MO Jian-hong. Application of artificial wetland process in village life sewage treatment[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2009(7): 166-167.
- [4] 许春华. 人工湿地在农业面源污染控制方面的应用[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(3): 70-72.
XU Chun-hua. Application of constructed wetlands in the agricultural nonpoint source pollution control[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2001, 23(3): 70-72.
- [5] 丁疆华, 舒 强. 人工湿地在处理污水中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 320-321.
DING Jiang-hua, SHU Qiang. Application of constructed wetlands in wastewater treatment[J]. *Agricultural Environmental Protection*, 2000, 19(5): 320-321.
- [6] 张兵之, 吴振斌, 徐光来. 人工湿地的发展概况和面临的问题[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(增刊): 87-90.
ZHANG Bin-zhi, WU Zhen-bin, XU Guang-lai. General development and problem for constructed wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 26(Suppl): 87-90.
- [7] 宋志文, 郭本华, 韩潇源, 等. 潜流型人工湿地污水处理系统及其应用[J]. 工业用水与废水, 2003, 34(6): 5-8.
SONG Zhi-wen, GUO Ben-hua, HAN Xiao-yuan, et al. A Subsurface-flow, constructed wetland for wastewater treatment and application thereof[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2003, 34(6): 5-8.
- [8] 成水平, 夏宜铮. 香蒲、灯心草人工湿地的研究—Ⅲ. 净化污水的机理[J]. 湖泊科学, 1998(2): 66-67.

- CHENG Shui-ping, XIA Yi-zheng. Cattails, rushes of wetlands—Ⅲ. The mechanism of purification of sewage[J]. *Journal of Lake Science*, 1998(2):66-67.
- [9] 李志炎,唐宇力,杨在娟,等. 人工湿地植物研究现状[J]. 浙江林业科技, 2004, 24(4):56-59.
- LI Zhi-yan, TANG Yu-li, YANG Zai-juan, et al. Status of research on wetland plants[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2004, 24(4):56-59.
- [10] 钟云霄,胡洪营,钱 易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2):36-40.
- ZHONG Yun-xiao, HU Hong-ying, QIAN Yi. Macrophytes in water pollution control application progress[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2):36-40.
- [11] 尹 炜,李培军,裘巧俊. 植物吸收在人工湿地去除氮磷中的贡献[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2):218-221.
- YIN Wei, LI Pei-jun, QIU Qiao-jun. Contribution of macrophyte assimilation in constructed wetland to nitrogen and phosphorous removal [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2):218-221.
- [12] 胡勇有,王 鑫,张太平,等. 用低浓度生活污水筛选适用于华南人工湿地的植物[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(9):111-116.
- HU Yong-you, WANG Xin, ZHANG Tai-ping, et al. Screening of plants in constructed wetland with low-concentration domestic wastewater in South China[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(9):111-116.
- [13] 肖龙山. 湿地植物的选择和应用[J]. 林业建设, 2009(4):52-56.
- XIAO Long-shan. Selection and application of wetland plants [J]. *Forestry Construction*, 2009(4):52-56.
- [14] 陈长太,阮晓红. 人工湿地植物的选择原则[J]. 中国给水排水, 2003(3):19.
- CHEN Chang-tai, RUAN Xiao-hong. Selection principle of constructed wetland plants[J]. *China Water & Wastewater*, 2003(3):19.
- [15] 王永秀,杨立君,彭立新,等. 垂直流人工湿地植物品种净化效果分析[J]. 环境科学与技术, 2009(2):64-69.
- WANG Yong-xiu, YANG Li-jun, PENG Li-xin, et al. Vertical-flow constructed wetland purifying effect of plant species[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009(2):64-69.
- [16] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究 [J]. 湖泊科学, 2002(2):179-182.
- CHENG Shui-ping, WU Zhen-bin, KUANG Qi-jun. Macrophytes in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Science*, 2002(2):179-182.
- [17] 吴振斌,梁 威,成水平,等. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析[J]. 环境科学学报, 2001(5):622-624.
- WU Zhen-bin, LIANG Wei, CHENG Shui-ping, et al. Studies on correlation between the enzymatic activities in the rhizosphere and purification of wastewater in the constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001(5):622-624.
- [18] 刘松岩,何 涛,周本翔. 水生植物净化受污染水体研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006(19):5019-5021.
- LIU Song-yan, HE Tao, ZHOU Ben-xiang. Decontaminating polluted water research[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006(19):5019-5021.
- [19] 杨 苛. 人工湿地植物的筛选及试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- YANG ke. Screening of wetland plants and experimental research[D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [20] 王玉彬. 四种湿地植物生长特性与污水净化效果研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007.
- WANG Yu-bin. Plant growth characteristics of four and the purification of sewage[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007.
- [21] 马安娜. 北京地区人工湿地优势植物筛选及净化效果研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2007.
- MA An-na. Advantages of artificial wetlands in Beijing screening and purification of plant[D]. Beijing: Capital Normal University, 2007.
- [22] 陈永华,吴晓芙,蒋丽鹃. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1549-1554.
- CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, JIANG Li-juan. Screening and evaluation of plant purification potential for phytoremediation of sanitary sewage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8):1549-1554.
- [23] 祝宇慧,赵国智,李灵香玉,等. 湿地植物对模拟污水的净化能力研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):166-172.
- ZHU Yu-hui, ZHAO Guo-zhi, LI Ling-xiang-yu, et al. Purification ability of wetland plants for simulated wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):166-172.
- [24] 王 磊,陈晓东,刘 智,等. 北方人工湿地植物的筛选与配置技术研究[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2007, 20(2):16-17.
- WANG Lei, CHEN Xiao-dong, LIU Zhi, et al. Wetland plants in the north and the allocation on screening[J]. *Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering*, 2007, 20(2):16-17.
- [25] 廖新伟,骆世明,吴银宝,等. 人工湿地植物筛选的研究[J]. 草业学报, 2004, 13(5):39-45.
- LIAO Xin-di, LUO Shi-ming, WU Yin-bao, et al. Plant selection for constructed wetlands[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2004, 13(5):39-45.
- [26] 潘瑞焜,董愚得. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- PAN Rui-zhi, DONG Yu-de. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [27] Cronk J, Campbell K L. Wetlands as a best management practice on a dairy farm[C]//Versatility of Wetlands in the Agricultural Landscape. Florida, USA: American Society of Agricultural Engineers, 1995:263-271.
- [28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Agency. Monitoring and analysis methods for water and waste water[M]. 4th Edition. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002.
- [29] 庞金华,沈瑞芝,程平宏. 三种植物对 COD 的耐受极限与净化效果[J]. 农业环境保护, 1997, 16(5):209-213.
- PANG Jin-hua, SHEN Rui-zhi, CHENG Ping-hong. Three plant tolerance to the limit of COD and purification[J]. *Agro-environmental Protection*, 1997, 16(5):209-213.