

人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献

蒋跃平,葛 滢,岳春雷,常 杰*

(浙江大学生命科学学院,杭州 310029)

摘要:研究了处理观赏用轻度富营养化水的人工湿地中植物的生长特性和氮磷去除作用。研究发现,所选用的 21 种植物中,有 17 种植物在人工湿地中生长良好,稳定生长 105 d 以后,其平均总生物量在 155~1 317 g/m² 之间,除了鸭跖草的地上地下生物量比(A/U)为 20.5 外,其余都在 1.18~4.29 之间。植株地上部 N 和 P 的浓度分别在 10.99~34.74 mg/g 和 0.59~3.81 mg/g 之间;地下部 N 和 P 浓度分别在 6.20~29.50 mg/g 及 0.72~3.83 mg/g 之间。大部分植物地上部 N 和 P 的浓度大于地下部($p<0.05$)。植物的 N、P 积累量分别在 2.10~24.48 g/m² 和 0.23~1.95 g/m² 之间。在处理轻度富营养化水的人工湿地中,植物吸收对氮磷的去除起着主要作用——贡献率分别为 46.8%和 51.0%。植物的氮磷积累量与浓度及生物量之间均存在显著相关,所以可以直接以生物量为指标选择人工湿地植物。同时考虑净化和景观效果,可为处理城镇轻度富营养化水的人工湿地的植物选择提供参考。

关键词:人工湿地;植物;富营养化水;生物量;营养吸收;积累量

Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water

JIANG Yue-Ping, GE Ying, YUE Chun-Lei, CHANG Jie* (College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1718~1723.

Abstract: Constructed wetland has been proven efficient technologies for both wastewater treatment and reuse of water resources. Compared with conventional treatment systems, it is inexpensive, and easily operated and maintained. An integrated vertical flow constructed wetland was built in Hangzhou Botanical Garden, Zhejiang Province, China, to purify eutrophic water from Jade fish-seeing pond. The present paper studied the growth characteristics of the plants and their ability to remove nutrient in this constructed wetland. Twenty-one species were introduced in the constructed wetland, including horticultural species and wild species, in which four species of *Fatsia japonica*, *Avena fatua*, *Juncus effuses* and *Rumex japonicus* were not suitable to this constructed wetland. *Fatsia japonica* couldn't live in constructed wetland. *Avena fatua* and *Juncus effusus* grew weakly. *Rumex japonicus* had a much too short life history. Through 105 days, mean total biomass ranged from 155 to 1 317 g/m² for the other 17 plants. Except for *Commelina communis*, above/belowground biomass ratios of plants varied between 1.18 and 4.29. Aboveground concentrations of nitrogen and phosphorus ranged from 10.99 to 34.74 mg/g and from 0.59 to 3.81 mg/g, respectively. Belowground concentrations of nitrogen and phosphorus ranged from 6.20 to 29.50 mg/g and from 0.72 to 3.83 mg/g, respectively. The concentrations of nitrogen and phosphorus between above and belowground biomass differed significantly ($p<0.05$). Plant accumulations of nitrogen and phosphorus ranged from 2.10 to 24.48 g/m² and from 0.23 to 1.95 g/m², respectively. The results showed that plant uptake played a major role in nitrogen and phosphorus removal in this constructed wetland treating low eutrophic water. Its contribution was 46.8% and 51.0%, respectively. Plant accumulations of nitrogen and phosphorus displayed significant positive linear correlation with plant biomass

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30370146);浙江省自然科学基金资助项目(302008)

收稿日期:2003-11-22;**修订日期:**2004-03-30

作者简介:蒋跃平(1979~),男,浙江平湖湖人,硕士,主要研究污水处理的生态技术。

* **通讯作者** Author for correspondence, E-mail: jchang@mail.hz.zj.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30370146) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No. 302008)

Received date: 2003-11-22; **Accepted date:** 2004-03-30

Biography: Jiang Yueping, Master, mainly engaged in ecological technology for wastewater treatment.

万方数据

and concentrations of nitrogen and phosphorus. So plant species for constructed wetland can be selected by biomass. In the present study, horticultural species were applied. The horticultural plants growing well in this wetland can not only purify wastewater, but also beautify environment. This study offered some references for plant species screening of constructed wetland treating low eutrophic water.

Key words: constructed wetland; plant; eutrophic water; biomass; nutrient uptake; accumulation

文章编号:1000-0933(2004)08-1718-06 中图分类号: Q948 文献标识码:A

人工湿地是一种污水处理的新型技术^[1, 2],与传统方法相比具有投资省、运行费用低、处理效果好等优点,在欧美等发达国家已被广泛地用于处理城镇及农村生活污水^[1, 3]、工农业废水^[4, 5],在水污染控制方面发挥着越来越重要的作用^[2]。目前,水资源短缺(水量不足和水质污染)已经成为制约我国城乡经济和生态环境可持续发展的重大问题。在城镇观赏水的富营养化治理中不适宜使用传统的集中、大规模的污水处理方式,而且污水处理厂排放标准(GB18918-2002)中Ⅰ级 A 标准的出水浓度也高于地面水(GB3838-2002)的Ⅴ类标准,远不能达到地面景观水要求。因此在以水景观为主的环境中,应该寻求分散、小规模、高效、针对低浓度污水的处理方法。人工湿地在这里就具有特别的优势,不仅可以处理低浓度污水,同时可以隐藏于风景区的绿地、花园中,提高城市景观环境的协调性,美化周围环境。

目前国内外人工湿地的研究大多是针对生活污水和工业废水^[1, 3~6],关于城乡景观水的研究较少,对处理这类水的人工湿地中植物的生长特性和作用更是缺少了解。当前,国内外用于人工湿地的植物比较单一^[7],缺少景观功能的考虑。本研究在一些人工湿地常见植物的基础上,基于新一代人工湿地表面无积水的特点,引入乡土植物种类和一些园艺栽培种(特别是中生植物),研究它们在人工湿地轻度富营养化水处理系统中的生长特性和氮磷去除作用,并综合考察景观功能效果。

1 材料与方法

1.1 人工湿地结构及效果

以欧盟项目研究成果为基础,2001 年 5~8 月在杭州植物园园内建造了一个复合垂直流人工湿地(图 1),用于循环处理观鱼池内的养鱼用水。该系统总面积 600 m²,其中 A 池 500 m²,B 池 100 m²,底部和四周以水泥墙封闭防渗。以沙(厚 40 cm)和砾石(厚 10 cm)为基质。鱼池水通过布水管均匀流入系统各处。总注水量为 160 m³/d,自动间歇式注水。这种新型人工湿地地表无积水,大部分面积接近中生环境,适合更多植物种类的生长,从而有更好的处理效果和景观功能。每月 1 次取自然水塘(作参照)和人工湿地进、出水的水样,并参照国标地面水标准(GB3838-2002)规定的方法分析水质。结果表明(表 1),自然水塘中氮的指标高于Ⅴ类水,磷高于Ⅳ类水,人工湿地进水的氮磷指标分别为Ⅴ类和Ⅳ类水,出水分别为Ⅲ类和Ⅰ类水。

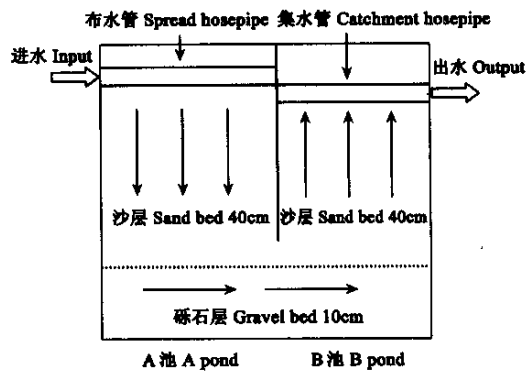


图 1 杭州植物园中复合垂直流人工湿地示意图
Fig. 1 The diagram of integrated vertical flow constructed wetland in Hangzhou Botanical Garden

表 1 杭州植物园自然水塘与人工湿地水质状况

Table 1 Characteristics of the water in the natural pond and constructed wetland(CW)of Hangzhou Botanical Garden								
项目 Items	硝态氮 NO ₃ -N (mg/L)	氨态氮 NH ₄ -N (mg/L)	凯氏氮 KN (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	化学需氧量 COD _{Mn} (mg/L)	五日生化需氧量 BOD ₅ (mg/L)	浊度 TURB (NTU)
自然水塘 Natural pond	1.83	0.10	1.44	3.27	0.14	3.66	7.33	15
人工湿地循环进水 CW input	1.38	0.05	0.33	1.71	0.08	2.80	4.82	15
人工湿地循环出水 CW output	0.85	0.01	0.10	0.95	0.02	1.09	1.19	6
人工湿地去除率(%) CW removal percent	38.4	80.0	69.7	44.4	75.2	61.1	75.2	—

1.2 材料和方法

2002 年 4 月,收集本地野生的植物和一些园艺栽培植物,共 21 种,分别栽种到人工湿地中,观察它们的存活情况。2003 年 3 月中旬,从上述植物中选择生长好的 17 种作为实验物种,分别从中选取大小较均匀的植株,每个物种移栽到 2 m² 的 A 池试验区中,3 个重复。由于水流通过布水管均匀流入 A 池,因此整个 A 池具有相似的水力负荷,从而保证植物具有相似的生长环境。

经过 105 d 的生长以后,统计每个物种试验区中间 $0.5\times0.5\text{ m}^2$ 样方中植株数目、株高等生长性状,并随机取 3 株。将每株样品分为地上和地下部,在 80°C 烘箱中烘至恒重后称重。计算单株平均生物量和单位面积的生物量。植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮制备成溶液,总氮含量用过硫酸钾氧化吸光光度法测定^[8];总磷用钼钒蓝法测定^[9]。植物氮磷积累量(PA)的计算公式为:

$$PA = PC \times PB$$

(1)

式中, PC 为植物氮磷浓度, PB 为植物生物量。人工湿地 A 池氮磷负荷(L)和人工湿地氮磷总去除量(R)的计算公式分别为:

表 2 杭州植物园人工湿地中植物的生活力

Table 2 The growth vitality of plants in constructed wetland of Hangzhou Botanical Garden

序号 No.	物种 Species	在人工湿地中的生活力 Growth vitality in constructed wetland
1	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	强 Vigorous
2	斑茅 <i>Saccharum arundinaceum</i>	强 Vigorous
3	美人蕉 <i>Canna indica</i>	强 Vigorous
4	菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	强 Vigorous
5	线穗苔草 <i>Carex nemostachys</i>	强 Vigorous
6	紫露草 <i>Tradescantia reflexa</i>	强 Vigorous
7	吉祥草 <i>Reineckia carnea</i>	强 Vigorous
8	芦竹 <i>Arundo donax</i>	强 Vigorous
9	芋 <i>Colocasia esculenta</i>	强 Vigorous
10	花叶芦竹 <i>Arundo donax</i> var. <i>versicolor</i>	强 Vigorous
11	香蒲 <i>Typha augustifolia</i>	强 Vigorous
12	荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	强 Vigorous
13	菩提子 <i>Coix lacryma-jobi</i>	强 Vigorous
14	菰 <i>Zizania caduciflora</i>	一般 Medium
15	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	强 Vigorous
16	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	一般 Medium
17	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	强 Vigorous
18	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i>	强 Vigorous
19	灯心草 <i>Juncus effusus</i>	弱 Weak
20	野燕麦 <i>Avena fatua</i>	弱 Weak
21	八角金盘 <i>Fatsia japonica</i>	死亡 Dead

$$L = \sum_{i=1}^i (IC_i \times Q_i)$$

(2)

$$R = \sum_{i=1}^i ((IC_i - OC_i) \times Q_i)$$

(3)

式中, IC_i 为第 i 月进水的氮磷浓度, OC_i 为第 i 月出水的氮磷浓度, Q_i 为第 i 月的累计进水量。

实验数据用 SPSS 程序进行分析。

2 结果与分析

2.1 人工湿地中不同植物的生活力

从 2002 年 4 月开始,对栽种到人工湿地 A 池的 21 种植物进行观察,了解它们的存活情况(表 2)。一段时间后,八角金盘(*Fatsia japonica*)不能在该人工湿地中生长;另外 20 种能够在人工湿地中生长,但其中野燕麦(*Avena fatua*)和灯心草(*Juncus effusus*)生长很差,羊蹄(*Rumex japonicus*)在人工湿地中的生活史较短,因此这 3 种也不适宜采用。其余 17 种植物中,除了菰(*Zizania caduciflora*)和鸢尾(*Iris tectorum*)生活力一般以外,剩下 15 种都生长旺盛。

2.2 人工湿地中不同植物的生物量及其分配

17 种植物(表 3)在人工湿地中生长 105d 以后,各种植物的总生物量在 $155\sim1\,317\text{ g/m}^2$ 之间,其中黄菖蒲最高($1\,317\text{ g/m}^2$),鸭跖草最低(155 g/m^2),种间差异显著($p<0.05$)。除了鸭跖草的地上地下生物量比(A/U)达到 20.55 外,其它的比值在 1.18~4.29 之间。大部分植物的地下生物量占总生物量的 20%~30%,但鸭跖草只有 5%,黄菖蒲则高达 46%。植株高度在 0.25~2.15 m 之间。

2.3 人工湿地中不同植物的氮磷浓度

6 月底,实验植物地上部 N 和 P 浓度分别在 $10.99\sim34.74\text{ mg/g}$ 及 $0.59\sim3.81\text{ mg/g}$ 之间(图 2)。鸭跖草具有最高的地上部 N 浓度,达 34.74 mg/g ,荻最低,只有 10.99 mg/g ,且各植物之间的差异显著($p<0.05$);地上部 P 浓度以鸭跖草最高(3.81 mg/g),菰最低(0.59 mg/g),各植物之间的差异也显著($p<0.05$)。所有实验植物地下部 N 和 P 浓度在 $6.20\sim29.50\text{ mg/g}$ 及 $0.72\sim3.83\text{ mg/g}$ 之间,差异显著($p<0.05$)。大多数植物地上部和地下部之间 N 和 P 的浓度差异显著($p<0.05$),分别有 4 种植物的地下部 N 浓度和 6 种植物的地下部 P 浓度高于地上部分,其余都是地上部高于地下部(图 2)。

2.4 人工湿地中不同植物氮磷积累量

美人蕉和菖蒲分别具有最高的 N、P 积累量(24.48 g/m^2 和 1.95 g/m^2),鸢尾的 N 积累量最低(2.10 g/m^2),菰的 P 积累量最低(0.23 g/m^2)(图 3)。17 种植物平均的氮磷积累量为 11.95 g/m^2 和 1.03 g/m^2 ,其中地上部平均的氮磷积累量为 9.84 g/m^2 和 0.82 g/m^2 ,分别占 82.3%和 79.5%,可见,实验植物的氮磷主要积累在地上部。各植物的氮磷积累量分别与生物量和氮磷浓度显示了显著的线性关系($p<0.05$,图 4),其中氮磷积累量与生物量的相关系数分别为 0.86 和 0.84,氮磷积累量与氮磷浓度的相关系数分别为 0.55 和 0.44,说明氮磷积累量与生物量的相关性更好。

2.5 人工湿地中植物氮磷积累量与系统总去除量的关系

实验期间(共 105 d)人工湿地 A 池的氮磷总负荷为 28.73 kg 和 1.34 kg ,即单位氮磷负荷为 57.46 g/m^2 和 2.69 g/m^2 ,因此 17 种植物的氮磷积累量占湿地氮磷负荷分别在 3.7%~42.6%和 8.5%~72.5%之间。17 种植物的平均氮磷积累量分别为 11.95 g/m^2 和 1.03 g/m^2 ,占湿地氮磷负荷的 20.8%和 38.3%,其中地上部的平均氮磷积累量分别为 9.84 g/m^2 和 0.82 g/m^2 ,占地上部氮磷负荷的 17.1%和 30.5%。

表3 杭州植物园人工湿地中植物的生物量和高度

Table 3 Biomass and height of plants in the constructed wetland of Hangzhou Botanical Garden

序号 No.	物种 Species	总生物量 Total biomass (g/m ²)	地上生物量 Aboveground biomass (g/m ²)	地下生物量 Underground biomass (g/m ²)	A/U	高度 Height (m)
1	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	1317±49a	713±30b	604±19a	1.18	1.08
2	斑茅 <i>Saccharum arundinaceum</i>	1158±112b	917±72a	240±40b	3.82	1.95
3	美人蕉 <i>Canna indica</i>	923±83c	749±72b	174±11c	4.29	1.70
4	菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	776±53d	579±37c	197±16c	2.94	0.95
5	线穗苔草 <i>Carex nemostachys</i>	734±51de	591±35c	143±17d	4.15	0.55
6	紫露草 <i>Tradescantia reflexa</i>	674±109def	541±87cd	132±22d	4.09	0.50
7	吉祥草 <i>Reineckia carnea</i>	651±54ef	519±36cde	132±17d	3.92	0.35
8	芦竹 <i>Arundo donax</i>	583±22fg	454±14efg	129±9d	3.52	2.00
9	芋 <i>Colocasia esculenta</i>	574±73fg	464±47def	111±25de	4.19	0.95
10	花叶芦竹 <i>Arundo donax</i> var. <i>versicolor</i>	534±45g	405±35fg	129±9d	3.13	1.85
11	香蒲 <i>Typha augustifolia</i>	494±66gh	373±55gh	121±11d	3.10	1.55
12	荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	422±95hi	300±82hi	122±13d	2.46	1.45
13	菩提子 <i>Coix lacryma-jobi</i>	338±46ij	248±27ij	90±19e	2.75	1.20
14	菰 <i>Zizania caduciflora</i>	305±8jk	246±4ij	59±4f	4.17	1.35
15	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	212±24kl	165±20jk	48±3f	3.47	0.65
16	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	189±7l	131±4k	58.3f	2.26	0.35
17	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	155±14l	148±12k	7±1g	20.55	0.25

* 平均值±标准差;邓肯氏新复极差检验,同列中有相同字母的表示未达到 $P=0.05$ 水平的显著差异;A/U:地上生物量/地下生物量 The data in table were expressed as means±SD; The same letters within one column mean no significant difference at 5% level by Duncan's new multiple range test ; A/U Aboveground biomass/Underground biomass

占湿地氮磷负荷的17.1%和30.4%。同时,实验期间人工湿地的氮磷总去除量分别为12.77 kg和1.01 kg,因此人工湿地对氮磷的去除率分别为44.4%和75.2%。根据上述结果,可以计算植物平均的氮磷积累量对人工湿地氮磷去除的贡献率分别为46.8%和51.0%,其中地上部的平均贡献率为38.5%和40.5%。通过图3和平均的植物氮磷积累量可以看到,17种植物中,有8种植物(黄菖蒲、斑茅、美人蕉、菖蒲、线穗苔草、紫露草、吉祥草和芦竹)的氮磷积累量超过平均的植物氮磷积累量,即超过平均的贡献率46.8%和51.0%;2种植物(芋和花叶芦竹)的贡献率接近平均的贡献率;剩下7种植物(香蒲、荻、菩提子、菰、黑麦草、鸢尾和鸭跖草)的贡献率基本上只有平均贡献率的一半。

3 讨论

3.1 人工湿地中植物对氮磷去除的不同功能群

植物体内的氮磷浓度能够反映出该种植物对氮磷的吸收能力。在本研究的轻度富营养化水中(总氮总磷分别为1.71 mg/L和0.08 mg/L),17种植物的氮磷浓度分别在10.68~32.66 mg/g和0.73~3.36 mg/g之间,平均值分别为20.60 mg/g和1.81 mg/g,其中有8种植物(美人蕉、菖蒲、紫露草、吉祥草、芦竹、花叶芦竹、黑麦草和鸭跖草)的氮浓度高于平均值,有8种植物(菖蒲、紫露草、吉祥草、芦竹、菩提子、黑麦草、鸢尾和鸭跖草)磷浓度高于平均值,分别属于对氮和磷具有高吸收功能的物种。DeBusk的研究^[10]显示,在重度富营养化(总氮总磷分别为62.9 mg/L和13.7 mg/L)和中度富营养化(总氮总磷分别为11.4

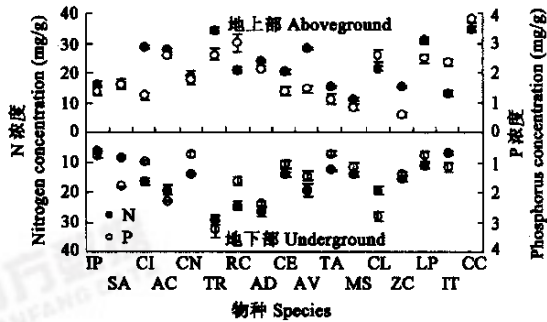


图2 杭州植物园人工湿地中植物地上和地下部的氮磷浓度(平均值及标准差)

Fig. 2 Aboveground and underground concentrations of nitrogen (N) and phosphorus (P) in plants in constructed wetland of Hangzhou Botanical Garden (Mean and SD)

IP:黄菖蒲;SA:斑茅;CI:美人蕉;AC:菖蒲;CN:线穗苔草;TR:紫露草;RC:吉祥草;AD:芦竹;CE:芋;AV:花叶芦竹;TA:香蒲;MS:荻;CL:菩提子;ZC:菰;LP:黑麦草;IT:鸢尾;CC:鸭跖草
IP: *Iris pseudacorus*; SA: *Saccharum arundinaceum*; CI: *Canna indica*; AC: *Acorus calamus*; CN: *Carex nemostachys*; TR: *Tradescantia reflexa*; RC: *Reineckia carnea*; AD: *Arundo donax*; CE: *Colocasia esculenta*; AV: *Arundo donax* var. *versicolor*; TA: *Typha augustifolia*; MS: *Miscanthus sacchariflorus*; CL: *Coix lacryma-jobi*; ZC: *Zizania caduciflora*; LP: *Lolium perenne*; IT: *Iris tectorum*; CC: *Commelina communis*

mg/L 和 3.0 mg/L) 水中, 10 种挺水植物的氮浓度分别在 13.4 ~ 39.3 mg/g 和 10.2 ~ 25.5 mg/g 之间; 磷浓度分别在 1.6 ~ 5.6 mg/g 和 1.3 ~ 3.7 mg/g 之间, 证明植物的氮磷浓度在一定范围内会随着水中氮磷浓度的增加而上升。通过比较可以发现, 本研究的 17 种植物中, 已经有植物(例如, 菖蒲、紫露草、黑麦草和鸭跖草等)表现了很强的氮磷吸收能力, 但大部分的植物还有很大的氮磷吸收空间, 特别是对于磷的吸收。

生长在人工湿地相似条件下的实验植物, 其生物量差异显著 ($p < 0.05$), 这应是植物内在的生长特性, 也表现了物种对这种环境的适应能力^[11]。本研究显示, 生物量与植物体内氮磷积累量的相关性好于体内浓度, 因而可以直接通过生物量来评价它们对氮磷去除的作用。黄菖蒲、斑茅、美人蕉、菖蒲、线穗苔草、紫露草、吉祥草和芦竹的能力最强, 其氮磷积累量超过 17 种平均氮磷积累量, 属于高积累功能群; 芋和花叶芦竹的氮磷积累量接近平均值, 属中积累功能群; 香蒲、荻、菩提子、菰、黑麦草、鸢尾和鸭跖草的氮磷积累量基本上只有平均值的一半, 属于低积累功能群。

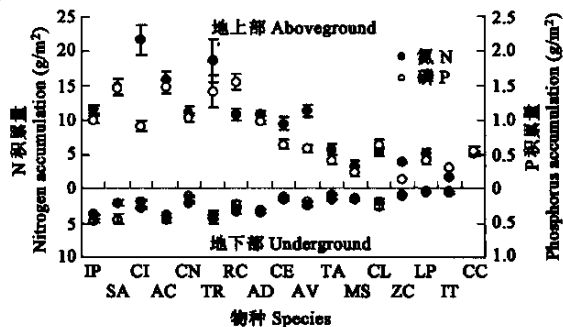


图3 杭州植物园人工湿地中植物地上和地下部的氮磷积累量(平均值及标准差); 缩写同图2

Fig. 3 Aboveground and Underground accumulation of nitrogen (N) and phosphorus (P) in plants in constructed wetland of Hangzhou Botanical Garden (Mean and SD); Abbreviations as Fig. 2

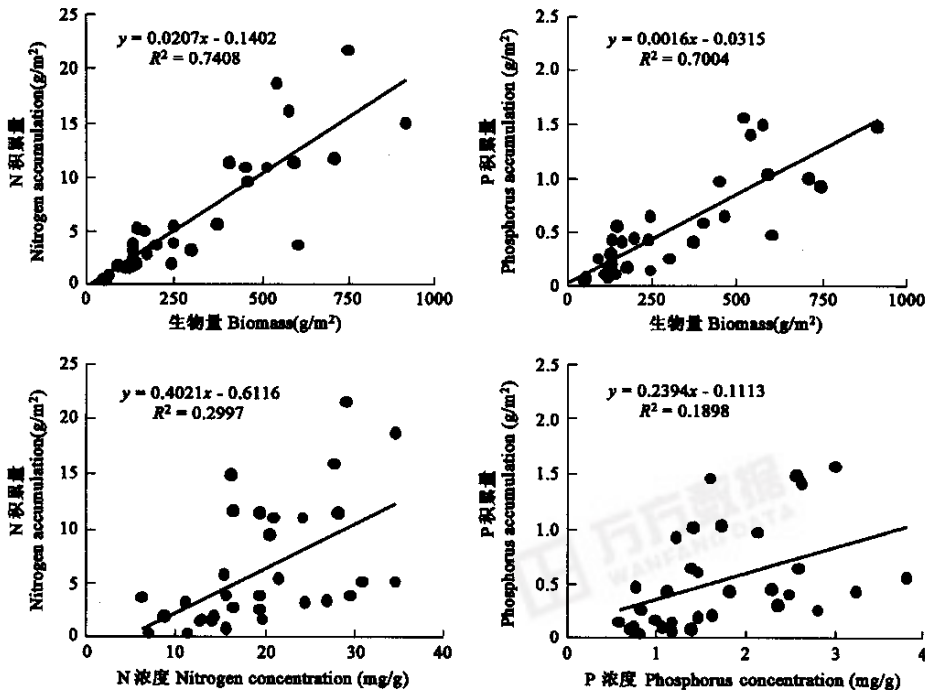


图4 植物氮磷积累量与植物生物量、植物氮磷浓度的关系

Fig. 4 Relationship between plant nitrogen and phosphorus accumulation and biomass and plant nitrogen and phosphorus concentration

3.2 人工湿地植物的景观功能群

当考虑植物景观功能时, 可以根据公共庭园绿化植物的选择标准^[12], 按照植物的形态特征, 选择人工湿地的构景种类。斑茅、芦竹、花叶芦竹植株高大, 可以作为大规模的造景种类; 线穗苔草、吉祥草、黑麦草和鸭跖草可作为草坪和地被植物; 紫露草、黄菖蒲和美人蕉可作为草花植物。其中美人蕉在人工湿地中生长比自然条件下高大, 可以间隔收割高大个体, 控制景观效果, 而且收割对提高人工湿地净化效果也很有必要^[13]。

3.3 人工湿地中植物吸收对人工湿地氮磷去除的贡献

许多研究^[7, 10, 11, 14]对富营养化水具有很好的净化效果。Peterson 的研究^[15]发现, 对于轻度氮磷负荷的人工湿地处理系统, 在植物的生长阶段收割, 可以占人工湿地氮总去除量的 30%; 而在重度氮磷负荷的处理系统中, 虽然植物吸收氮的

绝对量比轻度氮磷负荷的系统大,但其所占比例低,只有 1%~4%。本研究的 17 种植物平均氮磷积累量对去除水中氮磷的贡献率分别为 46.8%和 51.0%。因此,在处理轻度富营养化水的人工湿地中,植物吸收对氮磷的去除起主要作用。本研究发现,植物的氮磷积累量主要集中在植物的地上部,其平均氮磷积累对去除水中氮磷的贡献率分别为 38.5%和 40.5%,所以通过对植物地上部分的收割,就可以去除水中大部分的 N、P。

将野生植物斑茅、菖蒲、线穗苔草、芦竹、芋、香蒲、荻和菩提子等引入到人工湿地,可以增加人工湿地中的植物多样性。植物多样性越高,资源利用越充分,根区对 NO₃ 和 NH₄ 的利用程度越高^[16]。同时,不同季节生长的野生植物也可以使人工湿地常年保持有活力的植物生长,从而稳定人工湿地的净化效果且容易管理。在我国亚热带地区可以选择冬春和夏秋两类不同功能群的植物在人工湿地中接续生长,这样可以提高人工湿地在冬季的净化效果^[17],增强人工湿地净化能力的季节间稳定性。总之,在人工湿地中,可以根据不同的需要,合理配置植物种类,既能提高净化水体的效果,又能美化环境。

References:

[1] Haberl R, Perfler R and Mayer H. Constructed wetlands in Europe. *Water Science and Technology*, 1995, **32**(3):306~315.

[2] Tanner C C. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, **9**:49~73.

[3] Wallace C. Advanced designs for constructed wetlands. *Biocycle*, 2000, **42**(6):40~44.

[4] Xia H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(4): 51~59.

[5] Knight R L, Victor W E, Payne J. Constructed wetlands for livestock wastewater management. *Ecological Engineering*, 2000, **15**: 41~55.

[6] Ji G D, Sun T H, Li S. Constructed wetland and its application for industrial wastewater treatment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 224~228.

[7] Cheng S P, WU Z B, KUANG Q J. Macrophytes in artificial wetland. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(2): 179~184.

[8] Wu J Z, Ge Y, Wang X Y. UV absorptiohpotometric determination of total nitrogen in plant after K₂S₂O₈ oxidation. *PTCA (Part B: Chemical Analysis)*, 2000, **36**(4): 166~167.

[9] Bao S D. *Soil Assay on Properties of Agro-Chemistry*. Third Edition, Nanjiang Agriculture University; China Agriculture Press, 2000.

[10] DeBusk T A, Peterson J E and Reddy K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters. *Ecological Engineering*, 1995, **5**: 371~390.

[11] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems——A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, 1996, **7**: 59~83.

[12] Ma J Y, Xu Z X and Zhang Q H ed. *Virescence and Beautification of Public Landscape*. China Forestry Press, 2003. 36~55.

[13] Y Hosoi, Y Kido, M Miki, *et al.* Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(1):351~359.

[14] He C Q, Zhao K Y, Ye J X. A study on decontaminating eutrophic water with *Acorus tatarinowii*. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 1999, **23**(1): 73~76.

[15] Peterson S B and Teal J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems. *Ecological Engineering*, 1996, **6**(1~3): 137~148.

[16] Ewel J J. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1986, **17**: 245~254.

[17] Ge Y, Chang J, Wang X Y. Relationship between the physiological characters and purification ability of different plants in waters with two trophic levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6): 1051~1055.

参考文献:

[4] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率. *生态学杂志*, 2002, **21**(4): 51~59.

[6] 籍国东, 孙铁珩, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 224~228.

[7] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究. *湖泊科学*, 2002, **14**(2): 179~184.

[8] 吴建之, 葛滢, 王晓月. 过硫酸钾氧化分光光度法测定植物总氮. *理化检验——化学分册*, 2000, **36**(4): 166~167.

[9] 鲍士旦. *土壤农化分析*(第 3 版). 南京农业大学: 北京: 中国农业出版社, 2000.

[12] 马锦义, 徐志祥, 张清海 编著. *公共庭园绿化美化*. 北京: 中国林业出版社, 2003. 36~55.

[14] 何池全, 赵愧义, 叶居新. 石菖蒲净化富营养化水体的研究. *南昌大学学报(理学版)*, 1999, **23**(1): 73~76.

[17] 葛滢, 常杰, 王晓月. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系. *生态学报*, 2000, **20**(6): 1051~1055.