

人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收

金卫红¹, 付融冰^{2*}, 顾国维³

1. 浙江海洋学院 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316000

2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233

3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092

摘要: 构建了潜流水平芦苇湿地处理富营养化污水, 在近 2 年的研究中考察了芦苇的生长规律、芦苇不同器官对 TN 和 TP 的吸收及季节变化, 评价了植物吸收对湿地 TN 和 TP 的去除作用。结果表明, 2 个生长年内芦苇的生长规律不同, 受第 1 年芦苇移植的影响, 芦苇生长周期滞后, 导致植物立枯生物量与活体生物量比例在 2 年中相同月差异很大。第 2 年芦苇地上生物量是第 1 年的 3.9 倍。芦苇组织中 TN 和 TP 含量遵循新鲜叶 > 成年根 > 新鲜茎的规律。新鲜植物组织中 TN 和 TP 含量变化相对不大, 当植物枯萎时地上组织 TN 和 TP 含量明显下降。根中 TN 和 TP 含量在全年中基本维持稳定。植物净吸收随植物生长情况而改变, 按全年衡算, 当湿地进水 TN 和 TP 负荷分别为 61.39 和 7.39 g/(m²·a) 时, 植物地上生物量吸收 TN 和 TP 分别占湿地 TN 和 TP 总去除量的 46.0% 和 26.8%, 植物吸收仍起到重要作用。

关键词: 潜流水平人工湿地; 富营养化水体; 植物生长; 植物吸收

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5929(2007)03-0075-06

Plant Growth Characteristics and Nutrient Uptake from Eutrophic Water in Constructed Wetlands

JIN Wei-hong¹, FU Rong-bing², GU Guo-wei³

1. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China

2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China

3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Subsurface horizontal flow constructed wetlands (CWs) planted *Phragmites australis* were developed to treat eutrophic water for two years. Plant growth characteristics, nutrient uptake of different organs and seasonal variation, and the attribution of plant uptake were assessed. The results showed that the plant growth characteristics were different during the two growth years. In the first year, reed growth was postponed due to transplant, as led to differences of ratio of standing dead biomass and live biomass in the same month between the two years. Aboveground biomass of reed in the second year was about 3.9 times of that in the first year. TN and TP distribution in *Phragmites australis* organs can be summarised as follow: fresh leaves > grown roots > fresh stems. TN and TP contents were relatively steady in fresh organs. However, the nutrient content of aboveground biomass decreased dramatically when organs were in course of senescent. The nutrient content in root was relatively steady during the entire year. The net nutrient uptake of plant varied with plant growth. Based on nutrient balance in an entire year, 46.0% of TN and 26.8% of TP were uptaken by aboveground biomass when the influent TN and TP loadings were 61.39 and 7.39 g/(m²·a). Plant uptake was an important pathway for nutrient removal in the constructed wetland for treating eutrophic water.

Key words: subsurface horizontal flow constructed wetland; eutrophic water; plant growth; plant nutrient uptake

湿地植物是人工湿地系统的重要组成部分^[1-2], 它能直接或者间接地影响湿地系统的污水处理效果, 在湿地污水处理中扮演重要角色。湿地植

物可以稳定床体介质, 减缓床体堵塞, 拦截固体物质改变系统内部水力传导性能和系统水量平衡, 输送氧气并提供微生物附着界面, 具有一定景观功能并能起到冬季保温等作用^[2-9]。关于植物对湿地去除 TN 和 TP 的贡献, 研究者的报道很不统一。Brix 和 Haberl 等认为在湿地处理污水的整个过程中, 植物的吸收并不重要^[2,10]。Geller 对运行 4 年的芦苇湿地的物质衡算结果表明, 植物对 TN 和 TP 的吸收分别

收稿日期: 2007-02-12

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(20061124)

作者简介: 金卫红(1964-), 女, 浙江东阳人, 副教授。

*责任作者

只占 4% 和 2%^[11]. Howard 和 William 指出, 植物吸收只是临时储存, 这部分储存会达到饱和并且随着植物的枯萎逐渐释放出来^[12-13]. 而 Breen 认为, 湿地植物 (*Typha* sp.) 对氮的吸收占到 50%^[14]. Rogers 等认为湿地植物 (*Scirpus validus*) 直接吸收氮达到湿地对氮去除量的 90%^[15]. Koottatep 研究认为, 湿地植物 (*Typha* sp.) 对氮的吸收占进入湿地总氮量的 43% ~ 75%^[16]. 其他的研究者如 Greenway 和 Meuleman 等也认为植物吸收是湿地的重要脱氮途径^[17-18]. 以上报道的不同主要是由于研究条件的不同所致, 污水性质、进水负荷、湿地基质、气候条件、植物种类及其生长特性等对植物 TN 和 TP 的吸收有着重要的影响. 在湿地中, 不同的生长期植物生长状况在变化, 生物量以及植物各器官对 TN 和 TP 的吸收量也不相同^[19]. 关于湿地植物生长特性以及不同生长期植物各器官 TN 和 TP 吸收能力的研究很少, 这些都关系到植物在湿地污水处理过程中通过直接吸收所起的作用.

笔者构建了潜流水平芦苇人工湿地, 对富营养化污水进行了近 2 年的处理. 通过考察不同时期植物各器官生物量变化来考察植物生长特性, 并测定植物各器官 TN 和 TP 吸收量, 得出植物生物量随季节变化和植物对 TN 和 TP 吸收量的变化, 根据湿地在研究期间进、出水负荷的计算, 评估了不同时期植物直接吸收对人工湿地去除 TN 和 TP 的作用.

1 材料与方法

1.1 人工湿地构建及运行

在自然环境中(亚热带季风气候), 构建了 2 套潜流水平人工湿地 W1 和 W2, 试验装置由 PVC 板材制成. 湿地长 × 宽 × 深为 1.5 m × 0.4 m × 0.6 m, 床体前面为进水池, 后面为出水池. 床体内部填充粒径约 10 mm 的砾石和土壤的混合基质(体积比为 4:1), 基质层深 55 cm, 水深 50 cm. 湿地植物为芦苇 (*Phragmites australis*), 第 1 年的 5 月在湿地中培植具有少量地上生物量的植株, 初始种植密度为 24 株/m². 系统培育期内每隔一定时期更换床体中的污水, 水质测定从 8 月底开始, 一直持续到第 2 年的 12 月. 芦苇分别在第 1 年 12 月底和第 2 年 12 月初收割, 用剪刀齐地剪去地上部分.

试验用水为实际富营养化河水, 污水水质指标见表 1. 试验进水用恒流泵控制, 进入湿地的进水池, 出水采用自然溢流的方式. 水力停留时间为 3.2 d.

表 1 富营养化水体水质

COD _{Cr}	NH ₄ ⁺ -N	TN	PO ₄ ³⁻ -P	TP
44.5 ~ 103.3	1.5 ~ 10.3	4.6 ~ 15	0.11 ~ 0.73	0.57 ~ 1.72

1.2 植物生长参数及生物量测定

植物地上部分生物量的测定采用非破坏性方法. 在植物生长全过程中, 每隔一定时间在每个试验系统中选取具有代表性的植株测量其茎高. 同时, 选取数株具有代表性的植物收割, 测量茎高, 茎、叶分开后称量, 在 80 ℃ 下烘至恒重, 取出后迅速称量, 测定含水率和干重. 确定植物干重和茎高的关系, 12 月植物收割后校正该关系式, 按以下方法操作: 植物最终收割后, 称量总湿重, 然后测量植株高度, 按照 140 ~ 240 cm 间每 20 cm 继增的方式分档. 每 1 档的植物分别取样测定茎、叶的含水率, 计算干重.

植物根系在湿地不同位置处选取 10 cm × 10 cm 左右直接挖取, 选取成年根, 处理后测定, 其余根系重新埋于湿地中.

由于植物在生长的过程中同时伴随部分叶子的枯萎, 枯萎的部分不能继续吸收 TN 和 TP, 因此, 在测定植物生物量时, 将新鲜植物部分和枯萎部分分别计量. 枯落的植物叶子在整个试验周期内进行收集, 测干重和含水率.

1.3 植物组织中 TN 和 TP 含量测定

植物样品的采集在上午 8:00 ~ 10:00 进行. 采集的样品按不同的器官立即分离, 然后用去离子水洗涤, 在 80 ℃ 烘干, 剪碎, 用植物粉碎机粉碎, 过 0.25 mm 筛. 在称样测定之前, 将植物粉末再次烘干, 准确称量 0.500 0 g 置于 100 mL 的凯氏烧瓶底部, 加入浓硫酸 8 mL, 混匀浸润放置过夜. 在恒温器上慢慢加热至开始冒白烟, 控温稍冷, 逐滴加入 H₂O₂ 12 滴, 继续加热微沸几分钟, 放冷, 滴加 H₂O₂ 数滴, 反复多次, 直至消煮液完全清亮为止, 最后一次应微沸 20 min, 以除尽剩余 H₂O₂, 冷却后加入无氨水 10 mL, 移入 50 mL 容量瓶中, 定容, 测定.

直接取消解液用紫外分光光度法测定硝态氮, 采用半微量定氮装置蒸馏滴定法测定氨氮, 取消解液调节 pH 至中性然后采用钼酸盐法测定植物中的 TP 含量.

1.4 水质指标分析

TN 的测定采用过硫酸钾 - 紫外分光光度法; NH₄⁺-N 的测定采用纳氏试剂比色法; TP 的测定采

用过硫酸钾消解 - 钼酸铵分光光度法; $PO_4^{3-}-P$ 的测定采用钼酸铵分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 植物生长

芦苇于 5 月培植,在经历了一段适应期后开始生长,由于移植改变了芦苇的正常生长规律,因此考察植物生长情况时以第 2 年生的芦苇为准(见图 1).在 2006 年的气象条件下,芦苇从 2 月底开始生长,生长速率逐渐加快,到 4 月达到最大,最大可达 $56.07 \text{ mg}/(\text{株} \cdot \text{d})$,然后开始缓慢降低,10 月之后芦苇不再继续生长.

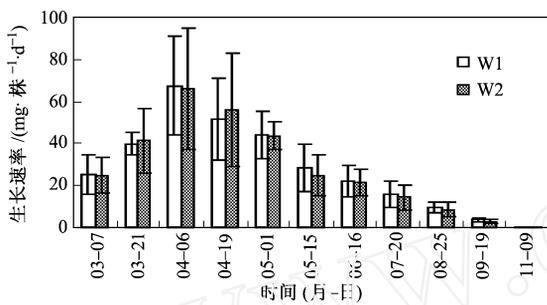


图 1 第 2 年湿地芦苇地上部分生长速率 (n = 26)

Fig. 1 Aboveground plant growth rate of *Phragmites australis* at CWs in the second growth year (n = 26)

芦苇单株在快速生长的同时植株密度也在增加.第 1 年人工湿地经历了一个逐渐发育成熟完善的过程,因此植物的生长与第 2 年不同.在第 1 年的 6—11 月为芦苇的生长期,植株密度逐渐增加,最终

维持在 $154 \sim 188 \text{ 株}/\text{m}^2$.而在第 2 年的 2—6 月芦苇植株密度快速增加,6 月之后增加非常缓慢,到 10 月不再增加,基本保持在 $260 \sim 267 \text{ 株}/\text{m}^2$.

芦苇在生长的同时也伴随着部分器官枯萎的过程.图 2 分别是湿地在 2 年内芦苇的立枯生物量(挺立枯萎生物量)和活体生物量变化情况.第 1 年 7—10 月都是芦苇的快速生长期,10 月 2 块湿地的立枯生物量占总生物量的比例平均为 4.8%,11 月该比例开始有所增加,但芦苇仍然保持了很高的活体生物量比例,平均为 92%.到 12 月,由于寒流来袭,芦苇很快枯萎,枯死生物量平均达到了 41%.

第 2 年同第 1 年相比,植物立枯量与活体生物量所占的比例发生了很大的变化.第 2 年的 3—6 月芦苇生物量增加很快,这时枯萎的叶子很少;6—8 月,芦苇生长速率减缓,生长进入相对稳定期,枯萎量维持在 20%以下;9 月之后,芦苇枯萎加快;10 月立枯生物量所占比例平均为 32.2%,11 月达到 50%左右,大部分的芦苇叶片都已枯萎.

2.2 地上生物量

2 年中芦苇地上生物量变化见图 3.地上生物量在 2 年间差异很大,第 2 年芦苇平均地上生物量是第 1 年的 3.9 倍.第 1 年芦苇地上生物量一直到 11 月都是增加的,是由于当年芦苇移植延迟了植物生长所致.第 2 年 3—7 月芦苇的地上生物量增加较快,8 月之后地上生物量增加非常缓慢,10 月达到最大值 $1.78 \text{ kg}/\text{m}^2$,10 月之后,地上生物量不再增加.

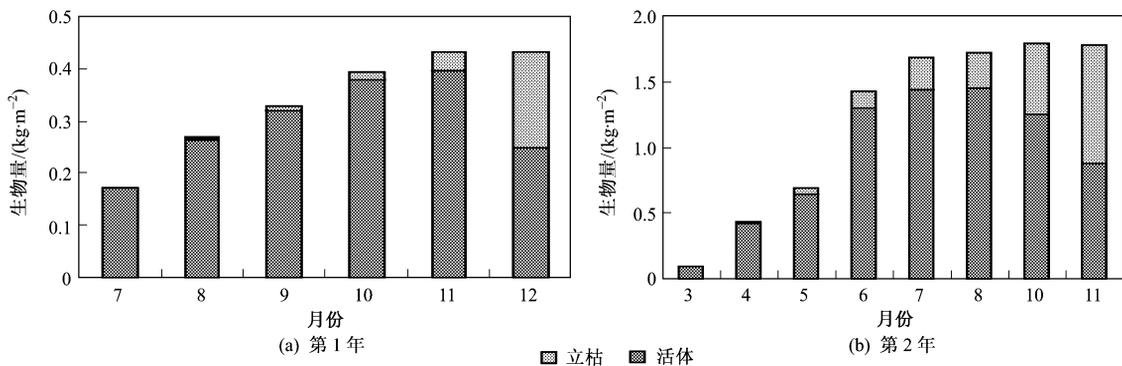


图 2 芦苇立枯生物量与活体生物量

Fig. 2 The standing dead and living biomass of common reeds at CWs in two growth years

2.3 地上植物组织中 TN 和 TP 分布及季节变化

不同植物器官中 TN 和 TP 含量根据植物的营养情况和生长状况有所不同.在该试验的进水水质和生长条件下,测得新鲜叶、成年根及新鲜茎中 $w(\text{TN})$ 和 $w(\text{TP})$ 分别为 26.7 ± 2.54 , 7.19 ± 1.12 ,

$5.43 \pm 0.85 \text{ mg}/\text{g}$ 和 2.16 ± 0.23 , 1.02 ± 0.15 , $0.52 \pm 0.12 \text{ mg}/\text{g}$ ($n = 5$).TN 和 TP 在芦苇不同组织中的含量遵循新鲜叶 > 根 > 新鲜茎的规律.硝态氮以根含量最多,为 $3.04 \text{ mg}/\text{g}$,反映了根系对氮素的利用情况.

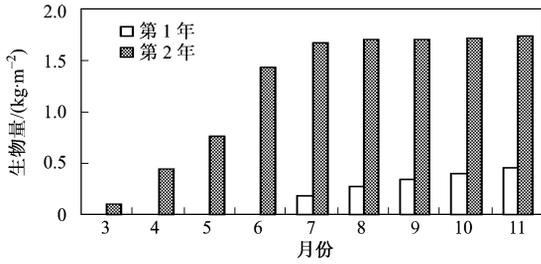


图 3 2年中芦苇地上生物量变化

Fig. 3 Aboveground biomass of common reeds at CWs in two growth years

图 4 分别为芦苇的叶、根和茎在第 2 年 TN 和 TP 含量的变化. 由图 4 可见,新鲜叶的 TN 和 TP 含

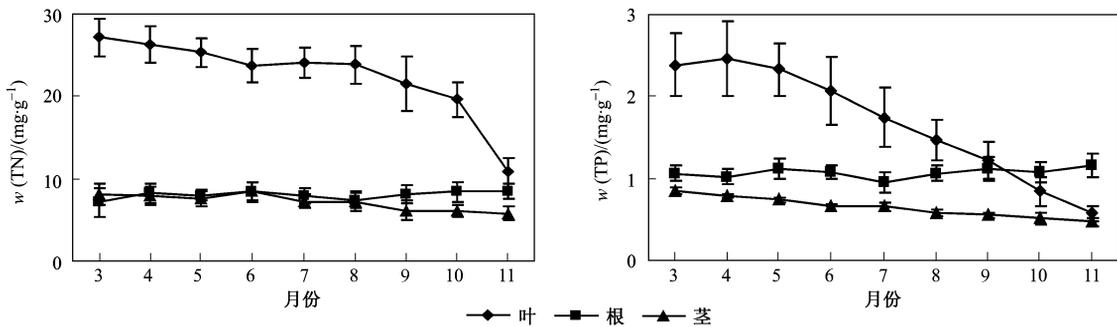


图 4 芦苇不同器官中 TN 和 TP 含量季节变化

Fig. 4 Solid TN and TP concentration in different organs of common reeds with month

2.4 植物吸收对湿地 TN 和 TP 去除的贡献

通常采用地上部分植物 TN 和 TP 吸收量来考察湿地植物的吸收作用. 由于目前一般认为湿地植物在枯萎期将大部分 TN 和 TP 转移到地下,但并没有得到研究证明,因此,在计算植物 TN 和 TP 吸收和存储时基于以下几点: 植物在枯萎时通过挥发损失的 TN 也作为植物吸收来处理,由于植物是否将地上部分 TN 转移到地下、转移多少尚不清楚,该部分 TN 不做转到地下考虑; 在枯萎期植物中的 TP 含量也迅速降低,关于 TP 是否存在以气体形式损失,损失多少仍需进一步研究,不考虑植物从地上向地下转移的部分; 植物地上组织中的 TN 和

TP 均来自于进水和湿地系统内部,对芦苇是否以其他形式从大气中摄取 TN 和 TP 不做考虑; 芦苇的茎、叶 TN 和 TP 含量差异很大,分别计算茎、叶的 TN 和 TP 吸收量.

植物全年的 TN 和 TP 净吸收量计算结果见图 5. 由图 5 可见,湿地植物 TN 和 TP 净吸收量先开始增加然后下降,在 6 月净吸收量达到最大,平均分别为 8.74 和 0.583 g/m². 10 月之后随着芦苇的迅速枯萎,新的生命组织不再生长,TN 和 TP 净吸收量为零.

湿地植物直接吸收所起的贡献一般用植物 TN 和 TP 吸收量占湿地 TN 和 TP 总去除量的比例来表

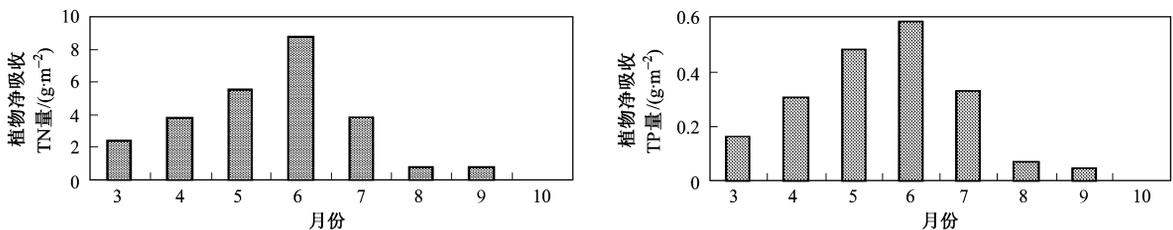


图 5 每月中芦苇地上部分吸收 TN 和 TP 量

Fig. 5 TN and TP uptake of aboveground plants in wetlands

示,即 $M_p / (C_{in} - C_{out}) QT$. 其中, M_p 为芦苇对 TN 和 TP 的净吸收量; C_{in} 和 C_{out} 分别为湿地进、出水 TN 和 TP 质量浓度; Q 为进水流量; T 为在该流量下的运行时间. 由于湿地内部植物 - 基质 - 微生物之间存在着复杂的 TN 和 TP 迁移转化, 因此直接用该比例来衡量植物的吸收作用并不太准确, 但是由于难以将这种关系定量化, 所以, 仍然以该比值考察植物的吸收贡献. 图 6 为芦苇每月吸收 TN 和 TP 占湿地 TN 和 TP 总去除量的比例. 由图 6 可见, 在芦苇快速生长期, 芦苇直接吸收 TN 和 TP 的作用很明显, 8 月之后, 芦苇枯萎加快, 净吸收量减小, 植物直接吸收所起的作用也很小. 在芦苇吸收起作用时期, 芦苇直接

吸收 TN 所占的比例差异很大, 从 9 月的 10% 到 4 和 6 月的 118.2% 和 102.7%. 植物在 4 和 6 月对 TN 的吸收量大于湿地对进水 TN 的去除量, 说明在植物迅速生长期, 芦苇对 TN 和 TP 的大量摄取不仅来自于进水, 也来自于基质、床体内部沉积的颗粒性有机氮和有机磷以及植物、微生物残体的释放. 同时说明, 在人工湿地内部, 基质、植物、微生物和湿地进水有着复杂的相互作用, 湿地基质时刻参与到湿地系统内部的整个 TN 和 TP 的动态变迁过程中, 植物在生长旺盛期可以从基质中获取 TN 和 TP, 这为重新增强基质的吸附交换能力提供了可能.

植物收割后和萌发前基本不存在地上生物量,

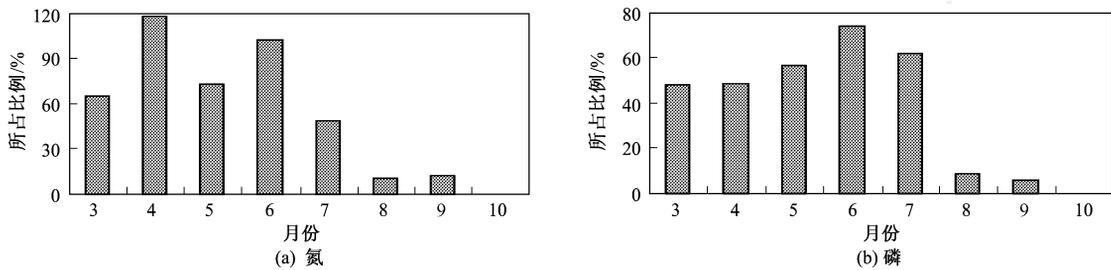


图 6 芦苇吸收 TN 和 TP 占湿地 TN 和 TP 总去除量的比例

Fig. 6 TN and TP uptake fraction of the common reeds in wetlands

因此, 在此期间植物的直接吸收就不做贡献, 如果按照 1 个生长年来计算, 当湿地进水 TN 和 TP 负荷分别为 61.39 和 7.39 g/(m² a) 时, 芦苇对 TN 和 TP 的吸收占湿地全年 TN 和 TP 总去除量的 41.9% 和 26.8%, 可见, 植物的吸收仍然起了重要作用.

3 结论

a. 由于第 1 年中芦苇移植滞后了芦苇的生长, 芦苇地上生物量在 2 年中差异很大, 第 2 年芦苇生物量是第 1 年的 3.9 倍, 第 1 年芦苇生物量一直到 11 月都是增加的, 第 2 年生物量从 3 月一直到 7 月增加较快, 8 月之后生物量增加非常缓慢, 10 月达到大值 1.78 kg/m². 芦苇在生长的同时伴随着部分器官枯萎的过程. 在 2 年中植物立枯生物量与活体生物量比例发生了很大的变化, 第 2 年植物枯萎时间明显比第 1 年提前. 因此, 第 2 年之后的规律更能体现人工湿地的正常表现.

b. 在芦苇不同组织中的 TN 和 TP 含量遵循新鲜叶 > 成年根 > 新鲜茎的规律. 新鲜的芦苇器官 TN 和 TP 含量变化不大, 当芦苇开始枯萎时地上部分 TN 和 TP 含量有明显下降. 芦苇根系 TN 和 TP 含量在几个季节中基本维持稳定, 没有明显的升高和

降低.

c. 在芦苇快速生长期, 芦苇直接吸收 TN 和 TP 的作用也越明显, 芦苇开始枯萎, 净吸收量减小, 植物直接吸收所起的作用也很小. 芦苇直接吸收所占的比例差异很大, 按照 1 个生长年来计算, 当湿地进水 TN 和 TP 负荷分别为 61.39 和 7.39 g/(m² a) 时, 芦苇对 TN 和 TP 的吸收占湿地全年 TN 和 TP 总去除量的 41.9% 和 26.8%, 植物的吸收仍然起了重要作用.

参考文献:

[1] Brix H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants: the root-zone method [J]. Water Sci Technol, 1987, 19: 107—118.

[2] Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands [J]. Water Sci Technol, 1994, 29(4): 71—78.

[3] Brix H, Schierup H H. The use of aquatic macrophytes water-pollution control[J]. Ambio, 1989, 18: 100—107.

[4] Brix H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes and treatment performance[A]. Moshiri G A. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Boca Ration: CRC Press/ Lewis Publishers, 1993. 9—22.

[5] Stottmeister U, Wiefner A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 2003, 22: 93—117.

- [6] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands [M]. Boca Raton : Lewis Publishers, 1996.
- [7] Gumbrecht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems[J]. *Ecological Engineering*, 1993a, 2(1) : 1—30.
- [8] Gumbrecht T. Nutrient removal processes in submersed macrophyte systems[J]. *Ecological Engineering*, 1993b, 2(1) : 49—61.
- [9] Chappell K R, Goulder R. Seasonal variation of epiphytic extracellular enzyme activity on two freshwater plants, *Phragmites australis* and *Elodea canadensis* [J]. *Archiv Fuer Hydrobiologie*, 1994, 132 : 237—253.
- [10] Haberl R, Perfler R. Nutrient removal in the reed bed systems [J]. *Water Sci Technol*, 1991, 29(4) : 15—27.
- [11] Geller G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries : summary of long term scientific practical and experiences, recommendations [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5) : 157—166.
- [12] Howard-William C. Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands : a theoretical and applied perspective [J]. *Freshwater Biology*, 1985, 15 : 393—398.
- [13] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands ? [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5) : 11—17.
- [14] Breen P E. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment [J]. *Water Res*, 1991, 24(6) : 689—697.
- [15] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems : evidence for the role of aquatic plants [J]. *JWPCF*, 1991, 63(7) : 934—941.
- [16] Koottatep T, Polprasert C. Role of plant uptake on nitrogen removal in constructed wetlands located in the tropics [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 36(12) : 1—8.
- [17] Greenway M. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia[J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5) : 135—142.
- [18] Meuleman A F M. Performance of treatment wetlands [D]. Netherlands : Utrecht University, 1999.
- [19] 徐治国,何岩,闫百兴,等. 湿地植物对外源氮磷输入响应研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(1) : 64—68.
Xu Zhiguo, He Yan, Yan Baixing, *et al.* Response of wetland plants to nitrogen and phosphorus inputs[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1) : 64—68.
- [20] 付融冰,杨海真,顾国维,等. 人工湿地基质微生物状况与净化效果相关分析[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(6) : 44—49.
Fu Rongbing, Yang Haizhen, Gu Guowei, *et al.* Analysis of substrate microorganisms status in constructed wetlands and their correlation with pollutants removal for wastewater treatment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6) : 44—49.

(编辑:孔欣)