

不同湿地植物对污水中氮磷去除的贡献*

崔丽娟¹, 李伟¹, 张曼胤¹, 赵玉辉¹, 王义飞¹, 赵欣胜¹, 商晓静²

(1: 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091)

(2: 翠湖国家城市湿地公园, 北京 100194)

摘要: 选择5种湿地植物(芦苇、东方香蒲、菖蒲、茭白、鸢尾)和1种喜湿灌木(蒿柳), 研究重度富营养化水体中植物的生长特性和氮磷去除效果. 研究发现, 所选用的6种植物在实验池中均生长良好, 稳定生长105d以后, 各种植物的总生物量在424-1772g/m²之间, 除了香蒲的地上地下生物量比(A/U)达到3.23外, 其它的比值在0.63-1.49之间. 6种植物地上部N和P浓度分别在13.12-28.83mg/g及1.55-3.77mg/g之间, 地下部N和P浓度在7.76-15.60mg/g及1.70-2.71mg/g之间, 大部分植物地上部N和P的浓度大于地下部. 6种植物平均氮、磷积累量分别为20.60g/m²和3.08g/m², 其中地上部平均氮、磷积累量分别占66.60%和58.22%. 不同植物筛选池对不同污染物的净化效果有差异, 鸢尾池对TN的净化效果最好, 芦苇池对TP的净化效果最好. 植物的氮、磷积累量与浓度及生物量之间均存在显著相关.

关键词: 湿地植物; 污水; 生物量; 积累量; 净化效果

Different wetland plant roles of removing nitrogen and phosphorus on sewage water

CUI Lijuan¹, LI Wei¹, ZHANG Manyin¹, ZHAO Yuhui¹, WANG Yifei¹, ZHAO Xinsheng¹ & SHANG Xiaojing²

(1: Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, P. R. China)

(2: Cuihu National Urban Wetland Park, Beijing 100194, P. R. China)

Abstract: Five kinds of wetland plants, including reed (*Phragmites australis*), oriental cattail (*Typha orientalis*), calamus (*Zizania aquatica*), wildrice stem (*Acorus calamus*), Iris (*Iris tenuifolia*), and one kind of shrub of willow (*Salix viminalis*) were selected to study the growth characteristics of plants and the role of removing nitrogen and phosphorus in severe eutrophic waters. The study showed that the six kinds of plants in experiments grew well and steadily. After 105 days, the total biomass ranged from 424 to 1772g/m². Ratios of most plant biomass above/below ground (A/U) varied between 0.63 and 1.49, except for oriental cattail (A/U; 3.23). Concentrations of nitrogen and phosphorus in the biomass of above ground ranged from 13.12 to 28.83mg/g and from 1.55 to 3.77mg/g, respectively. Concentrations of nitrogen and phosphorus in the biomass below ground ranged from 7.76 to 15.60mg/g and from 1.70 to 2.71mg/g, respectively. The concentrations of nitrogen and phosphorus between above and below ground biomass differed significantly. The average plant accumulations of nitrogen and phosphorus were 20.60g/m² and 3.08g/m², which the above ground accounted for 66.60% and 58.22%, respectively. Purification effect of the plants on different pollutants was different. The best purification effects for TN in Iris and TP in reed were found. Plant accumulations of nitrogen and phosphorus displayed significantly positive linear correlation with plant biomass and concentrations of nitrogen and phosphorus.

Keywords: Wetland plant; waste water; biomass; accumulation; purification efficiency

湿地植物在污水净化等方面起着重要的作用^[1-2]. 湿地植物种类繁多, 且具有较强的地域性, 不同湿地植物对污染物质的去除能力有较大的差异^[3-5]. 因此, 筛选适合生长且净化能力较强的湿地植物用于湿地水质净化和水环境修复具有重要的理论和现实意义. 目前针对湿地植物污水净化效果的研究很多, 国内外学者利用芦苇、香蒲和茭白等湿地植物来构建人工湿地处理污水的研究已有许多报道, 湿地植物在人工湿地

* 北京市科技计划重大项目“北京市湿地生态系统保护与恢复关键技术研究 and 示范”(D08040600580000)和国家科技支撑计划“十一五”项目“湿地生态系统保护与恢复技术试验示范”(2006BAD03A19)联合资助. 2010-02-24 收稿; 2010-09-22 收修改稿. 崔丽娟, 女, 1968年生, 研究员; E-mail: lkyclj@126.com.

中发挥了十分重要的作用,但这些植物多为草本植物,而利用乔木、灌木作为人工湿地植物的报道甚少^[6-10]. 本研究设于北京地区野外自然条件下,选择了5种湿地植物和1种喜湿灌木研究不同植物单种的净化效果以及在重度富营养化水体中的生长特性和氮磷去除作用,旨在筛选出净化能力较强的湿地植物,以期是北京地区污染湿地水质净化和退化湿地恢复提供科学依据.

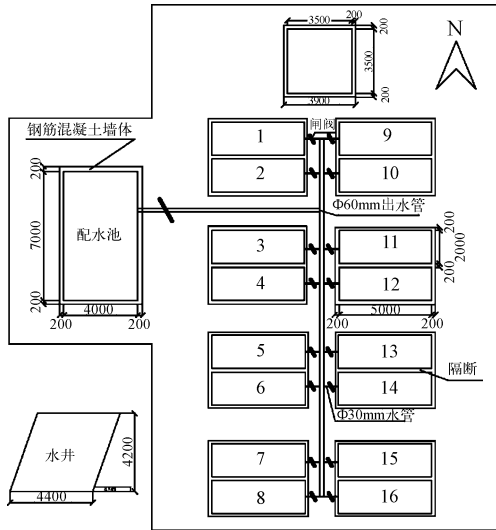


图1 湿地植物筛选池平面图(单位:mm)

Fig. 1 Map of filter pool of wetland plants

1 材料和方法

1.1 实验池构建和实验运行

实验地位于北京市西北部的延庆县康庄镇军营村西,占地面积约 1000m². 该地海拔约 500m, 年均气温 8℃, 年均降水量 493mm; 地处温带与中温带、半干旱与半湿润带的过渡带, 属大陆性季风气候. 实验池由配水池、湿地植物筛选池和出水池三部分组成, 其中湿地植物筛选池 16 个(单池长: 宽: 高 = 500cm: 200cm: 85cm), 配水池和出水池各一个. 各湿地植物筛选池内填充相同的基质, 从下至上依次为砾石 15cm(粒径 5-8cm)、豆石 20cm(粒径 0.5-1cm)和沙壤土 10cm(过筛 2mm).

2009 年 5 月 5 日, 采集官厅水库滨滨带大小较均匀的 6 种实验植物, 其中挺水植物 5 种, 即禾本科芦苇属的芦苇 (*Phragmites australis*)、香蒲科香蒲属的东方香蒲 (*Typha orientalis* Presl.)、禾本科菰属的茭白 (*Zizania aquatica*)、天南星科菖蒲属的菖蒲 (*Acorus calamus* Linn.)、鸢尾科鸢尾属的鸢尾 (*Iris tenuifolia*); 湿生灌木 1 种, 即杨柳科柳属的蒿柳 (*Salix viminalis* L.), 分别栽种到植物筛选池 1-6 中, 种植密度为 4 棵/m². 采用地下水预培养 1 个月. 2009 年 6 月 5 日, 将污水经配水池缓慢放入植物筛选池(水深 35cm). 由于水流通过水管均匀流入植物筛选池, 污水通过布设在植物筛选池的布水管流入, 缓慢向下渗滤, 放水 12h 后, 停止注水. 因此整个植物筛选池具有相似的水力负荷, 从而保证湿地植物具有相似的生长环境. 经过植物筛选池处理后的水从植物筛选池底部排出. 实验用水取自延庆县饲养动物粪水污水, 初始水质起始浓度总氮(TN)为 32.13-78.21mg/L, 总磷(TP)为 7.74-21.76mg/L.

1 种, 即杨柳科柳属的蒿柳 (*Salix viminalis* L.), 分别栽种到植物筛选池 1-6 中, 种植密度为 4 棵/m². 采用地下水预培养 1 个月. 2009 年 6 月 5 日, 将污水经配水池缓慢放入植物筛选池(水深 35cm). 由于水流通过水管均匀流入植物筛选池, 污水通过布设在植物筛选池的布水管流入, 缓慢向下渗滤, 放水 12h 后, 停止注水. 因此整个植物筛选池具有相似的水力负荷, 从而保证湿地植物具有相似的生长环境. 经过植物筛选池处理后的水从植物筛选池底部排出. 实验用水取自延庆县饲养动物粪水污水, 初始水质起始浓度总氮(TN)为 32.13-78.21mg/L, 总磷(TP)为 7.74-21.76mg/L.

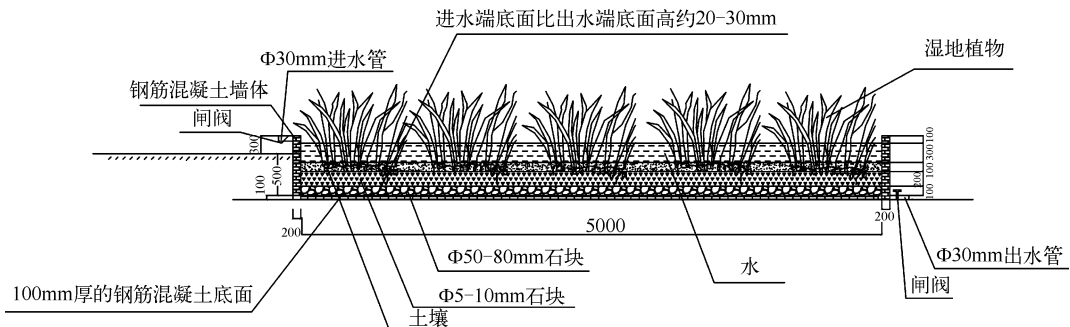


图2 湿地植物筛选池剖面图

Fig. 2 Profile of filter pool of wetland plants

1.2 取样与测试方法

分别于 2009 年 6 月 5 日和 2009 年 8 月 17 日进行水样采集与测试, 每个池设置三个重复. 其中, 水温和 pH 值采用 YSI-6820 型多参数水质监测仪现场测定. TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,

TP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定^[11]。水深用钢卷尺测量。

2009 年 8 月 17 日,统计每个植物筛选池中 1m²样方中植株数目、株高等生长性状,并随机取 3 株(水深 10cm)。将每株样品分为地上和地下部,在 80℃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 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮制备成溶液,总氮用过硫酸钾氧化吸光光度法测定;总磷用钒钼蓝法测定^[12]。

1.3 数据处理与分析

TN 和 TP 去除率(R)的计算公式: $R = (C_0 - C_i) \times 100 / C_0$, C_i 为第 i 次 TN 或 TP 的浓度, C_0 为 TN 或 TP 的初始浓度^[12]。

植物筛选池氮磷负荷(L) = 进水的氮磷浓度(IC) × 进水量(Q)^[12-13];植物氮磷积累量(PA) = 植物氮磷浓度(PC) × 植物生物量(PB)^[12]。

采用 SPSS16.0 统计分析软件分别对 TN 和 TP 等指标因子进行单因子方差分析(One-Way ANOVA),并对不同植物筛选池的污染物净化效果做多重比较(Duncan's Multiple Range Test)。

2 结果与分析

2.1 不同湿地植物的生物量及其分配

2009 年 5 月开始,对栽种到植物筛选池中的 6 种植物进行观察,了解它们的存活及生长情况。至 2009 年 8 月 17 日,除了蒿柳生长一般以外,剩下 5 种湿地植物都生长旺盛,植株高度在 81-184cm 之间,芦苇、东方香蒲、茭白、菖蒲、鸢尾和蒿柳的株高分别为 184 ± 26 、 109 ± 6 、 173 ± 28 、 97 ± 26 、 81 ± 24 和 179 ± 8 cm。

至 2009 年 8 月 17 日,6 种植物在植物筛选池中生长一段时间以后,各种植物的总生物量在 424.10-1772.08g/m² 之间,其中鸢尾最高,蒿柳最低,种间差异显著($P < 0.05$)。除了香蒲的地上、地下生物量比(A/U)达到 3.23 外,其它 5 种植物的比值在 0.63-1.49 之间(表 1)。大部分植物的地下生物量占总生物量的 30% 以上,但香蒲只有 15.47%,蒿柳则高达 78.96%。生长在相似条件下植物筛选池中的植物,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。

表 1 湿地植物的生物量*

Tab.1 Biomass of wetland plants

物种	总生物量(g/m ²)	地上生物量(g/m ²)	地下生物量(g/m ²)	A/U
芦苇	430.63 ± 48.68 ^a	257.11 ± 15.22 ^a	173.51 ± 33.54 ^a	1.49
东方香蒲	928.01 ± 17.94 ^b	708.45 ± 50.18 ^b	219.56 ± 53.46 ^{abg}	3.23
茭白	1607.09 ± 46.90 ^c	827.32 ± 37.41 ^c	779.77 ± 18.09 ^c	1.06
菖蒲	1698.19 ± 17.35 ^d	884.44 ± 13.88 ^d	813.75 ± 23.81 ^{cd}	1.09
鸢尾	1772.08 ± 20.92 ^e	731.31 ± 19.58 ^{be}	1040.77 ± 1.34 ^e	0.70
蒿柳	424.10 ± 18.79 ^{af}	164.29 ± 34.13 ^f	259.81 ± 28.65 ^{ef}	0.63

* 同组内同一列字母不同表示在 5% 水平具有显著差异性。

2.2 不同湿地植物的氮磷浓度

2009 年 8 月 17 日,实验植物地上部分 N 浓度在 13.12-28.83mg/g 之间,芦苇最高,蒿柳最低,且各植物之间的差异显著($P < 0.05$);地上部分 P 浓度以鸢尾最高(3.77mg/g),蒿柳最低(1.55mg/g),各植物之间的差异也显著($P < 0.05$)。所有实验植物地下部分 N 和 P 浓度在 7.76-15.60mg/g 及 1.70-2.71mg/g 之间,差异显著($P < 0.05$)。6 种植物地上部分和地下部分之间 N 和 P 的浓度差异显著($P < 0.05$),6 种植物的地上部分 N 浓度和 4 种植物的地上部分 P 浓度高于地下部分,仅有茭白和蒿柳的地上部分 P 浓度低于地下部分(图 3a)。

2.3 不同湿地植物的氮、磷积累量

菖蒲具有最高的 N、P 积累量,分别为 36.46g/m²和 5.00g/m²,分别超过 6 种植物平均 N、P 积累量,属于高积累功能群;蒿柳的 N、P 积累量最低,分别为 4.17g/m²和 0.76g/m²(图 3b),属于低积累功能群。6 种植物

平均 N、P 积累量为 20.60g/m² 和 3.08g/m², 其中地上部分平均 N、P 积累量为 13.72g/m² 和 1.89g/m², 分别占 66.60% 和 58.22%, 可见实验植物的氮、磷主要积累在地上部分, 这种分配有利于通过收割地上部去除氮、磷.

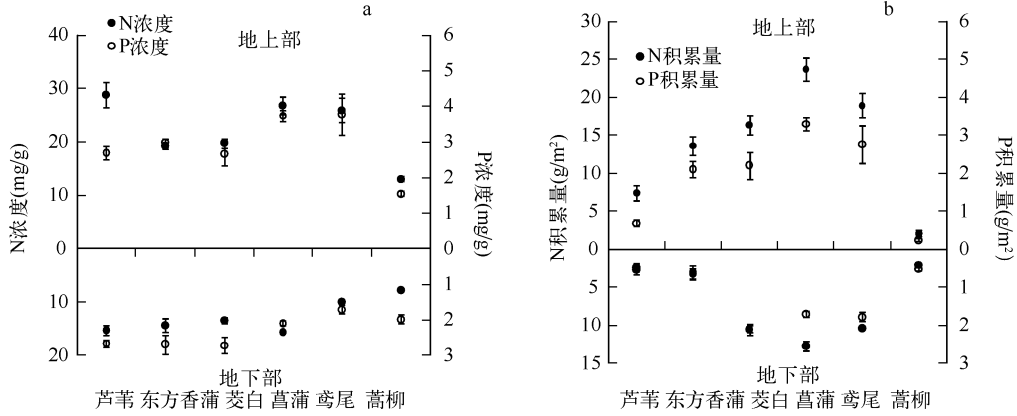


图 3 6 种植物地上部和地下部的氮磷浓度 (a) 和积累量 (b)

Fig. 3 Aboveground and underground concentrations (a) and accumulation (b) of nitrogen and phosphorus in six plants

各植物的氮磷积累量分别与生物量、各植物的氮积累量和氮浓度、磷积累量与磷浓度均呈显著的线性关系 ($P < 0.05$, 图 4), 其中氮磷积累量与生物量的相关系数分别为 0.95 和 0.98, 氮磷积累量与氮磷浓度的相关系数分别为 0.64 和 0.68, 说明氮磷积累量与生物量的相关性更好. 因而可以通过生物量来评价植物对氮磷去除的作用.

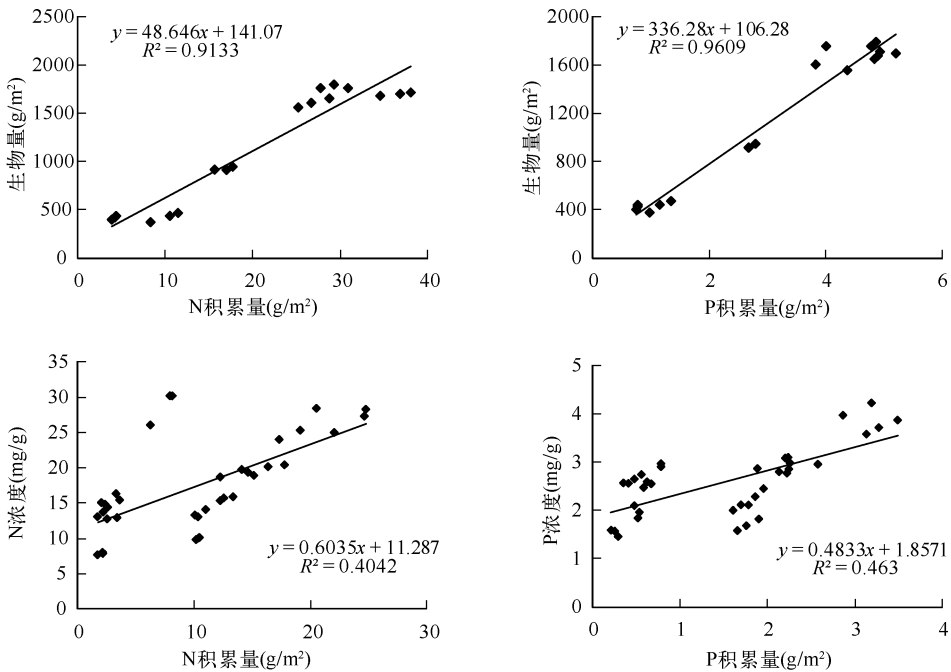


图 4 植物氮磷积累量与植物生物量、植物氮磷浓度的关系

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

2.4 不同湿地植物筛选池对氮磷去除的净化效果

不同植物筛选池对 TN 和 TP 的净化效果存在极显著性差异 ($P < 0.01$) (表 2). 不同植物筛选池对 TN 的净化效果从高到低依次为鸢尾 > 菖蒲 > 芦苇 > 蒿柳 > 东方香蒲 > 茭白, 鸢尾对 TN 的净化效果显著高于蒿柳、东方香蒲和茭白 ($P < 0.05$), 而与菖蒲和芦苇的净化效果差异不显著 ($P > 0.05$). 不同植物筛选池对 TP 的净化效果从高到低依次为芦苇 > 鸢尾 > 菖蒲 > 东方香蒲 > 茭白 > 蒿柳, 芦苇池对 TP 的净化效果显著高于其它 5 种植物 ($P < 0.05$).

表 2 不同湿地植物对污染物净化效果的比较*

Tab. 2 Comparison of pollutant removal efficiencies of different wetland plants

植物筛选池	TN 去除率 (%)	TP 去除率 (%)
芦苇池	87.16 ± 4.44 ^{ab}	82.05 ± 2.16 ^a
东方香蒲池	82.35 ± 0.31 ^{ab}	54.26 ± 10.99 ^{bc}
茭白池	67.00 ± 10.02 ^c	53.44 ± 10.72 ^{bc}
菖蒲池	87.58 ± 1.02 ^{ab}	61.10 ± 9.48 ^{bd}
鸢尾池	91.70 ± 0.31 ^{ac}	64.81 ± 4.39 ^{bc}
蒿柳池	84.98 ± 0.96 ^{af}	50.61 ± 1.55 ^{cd}

* 同组内同一列字母不同表示在 5% 水平具有显著差异性.

3 讨论

对于生长在相同条件下的 6 种实验植物, 其生物量及分配变化很大, 而且各植物的地上部生物量和地下部生物量所占的比例也各不相同, 多数湿地植物的地上部生物量等于或大于地下部生物量, 就植株体内的氮、磷含量而言, 植物的地上部氮、磷含量高于地下部 (蒿柳除外), 这应是植物内在的生长特性, 也表现了物种对环境的适应能力. 植物体内的氮、磷质量分数和积累量能够反映出该种植物对氮、磷的直接去除能力的大小, 营养物质的分配特点将涉及到采取何种收割方式. 在本研究中, 大部分的试验物种显示植物体的 N、P 积累量主要集中在植物的地上部分, 这符合 N、P 元素主要供给营养生长部位的分配特点. 所以通过对植物地上部分的收割, 就可以去除大部分的 N、P 积累量. 对于一些物种, 比如菖蒲, 其地下部分的 N、P 积累量也不能忽视, 应在适宜的时候进行全面收获, 使其移出系统. 同时, 本研究也显示, 植物体中的 N、P 积累量主要与植物的生物量存在线性相关, 生物量对氮、磷积累量的影响大于植物体内氮、磷浓度的影响, 所以选择适宜在人工湿地生长的物种, 通过增加植物的生物量, 对去除 N、P 也有重要作用. 蒋跃平等的研究也显示, 生物量与氮、磷积累量的相关性优于植物体内氮、磷浓度^[3,14]. 不同植物在试验池中的生物量有较大差异, 鸢尾的生物量大于其他植物; 马牧源等在黄花鸢尾 (*Iris pseudoacorus*) 对富营养化水体净化的实验中发现黄花鸢尾根际氮循环菌最密集, 可提高水体中硝化-反硝化作用强度, 加速水体中氮的去除^[15].

Gersberg 等^[16]在利用芦苇等水生植物净化城镇污水的研究中发现芦苇对氨氮的净化效果明显高于香蒲, 魏成等^[17]也发现芦苇对 TN 的净化效果较好, 徐德福等^[18]在研究不同水生植物的氮磷净化效果时发现芦苇的生物量大, 氮磷净化功能最好, 同本研究中芦苇池吸收对氮磷去除的贡献较高相似. 国内外关于蒿柳对污染物净化效果的研究较少, 且木本植物的净化效果与植物的生长阶段有关, 本研究结果表明蒿柳对磷的净化效果低于湿地植物. 本研究所选择的植物中, 芦苇属于对氮磷具有高吸收功能、生命力强的植物种类, 可作为北京人工湿地植物的首选目标; 蒿柳对污水中的磷净化能力相对较弱, 出于人工湿地植物多样性原则和景观配置的需要, 蒿柳也可在人工湿地中使用. 植物对污染物的净化效果与植物的生长速度、生长阶段、植物的生物量、植物自身氮磷积累量以及植物根际微生物作用有关^[12,19-21]. 在今后利用湿地植物净化污水时, 要根据所处理污水的污染状况、景观需要及当地的气候特点, 结合当地的本身条件有针对性地选择合适的湿地植物, 选择适合的功能群植物, 考虑合理搭配, 最大限度地发挥湿地植物的作用.

4 参考文献

- [1] 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.
- [2] Allen WC, Hook PB, Biederman JA et al. Wetlands and aquatic processes: Temperature and wetland plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(3): 1010-1016.
- [3] 蒋跃平, 葛滢, 岳春等. 轻度富营养化水人工湿地处理系统中植物的特性. 浙江大学学报 (理学版), 2005, 32(3): 309-313.
- [4] 王庆海, 段留生, 武菊英等. 北京地区人工湿地植物活力及污染物去除能. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1131-1137.
- [5] Hubbard RK, Gascho GJ, Newton GL. Use of floating vegetation to remove nutrients from swine lagoon wastewater. *American Society of Agricultural Engineers*, 2004, 47(6): 1963-1971.

- [6] 方云英, 杨肖娥, 常会庆等. 利用水生植物原位修复污染水体. 应用生态学报, 2008, 19(2):407-412.
- [7] Coleman J, Hensch K, Garbutt A. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, 128(3):283-295.
- [8] 陈源高, 吴献花, 李文朝等. 抚仙湖窑泥沟人工湿地的除磷效果研究应用. 生态学报, 2005, 16(10):1913-1917.
- [9] 袁东海, 任全进, 高士祥等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较. 应用生态学报, 2004, 15(12):2337-2341.
- [10] 韩潇源, 宋志文, 李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合. 湖泊科学, 2008, 20(6):741-747.
- [11] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 210-257.
- [12] 葛 滢, 常 杰, 王晓月等. 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):1050-1055.
- [13] 孙瑞莲, 张 建, 王文兴. 8 种挺水植物对污染水体的净化效果比较. 山东大学学报(理学版), 2009, 44(1):12-16.
- [14] 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. 生态学报, 2004, 24(8):1720-1725.
- [15] 马牧源, 王 兰, 孙红文. 黄花鸢尾对富营养化水体净化的试验研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):448-452.
- [16] Gersberg RM, Elkins BV, Lyon SR *et al.* Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Research*, 1986, 20(3):363-368.
- [17] 魏 成, 刘 平, 秦 晶. 不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响. 生态学报, 2008, 28(8):3691-3697.
- [18] 徐德福, 徐建民, 王华胜等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5):597-601.
- [19] Abdeslam Ennabili, Mohammed Ater, Michel Radoux. Biomass production and N P K retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula. *Aquatic Botany*, 1998, 62:45-56.
- [20] 卢少勇, 张彭义, 余 刚等. 人工湿地处理农业径流的研究进展. 生态学报, 2007, 27(6):2627-2635.
- [21] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华等. 人工湿地植物的选择. 湖泊科学, 2004, 16(1):91-96.