

10 种水生植物的氮 磷吸收和水质净化能力比较研究

金树权¹, 周金波¹, 朱晓丽², 姚永如³, 蔡国成³, 陈若霞¹

(1.浙江省宁波市农业科学研究院生态环境研究所, 浙江 宁波 315040; 2.宁波市农村水利管理处, 浙江 宁波 315000; 3.宁波市鄞州区下应街道农办, 浙江 宁波 315100)

摘要:选取 10 种水生植物水罨粟、黄花水龙、大聚藻、香菇草、水芹、大藻、凤眼莲、美人蕉、黄菖蒲和鸢尾等为研究对象,于 2009 年 2 月中旬至 6 月中旬在室内静水条件下对其吸收氮、磷和净化水质的能力进行了比较研究。结果表明:(1)不同水生植物的净增生物量差异较大,变化范围为 109.9~1 511.1 g·m⁻²,其中香菇草净增生物量最高,是黄花水龙(最低)的 13.7 倍;(2)不同水生植物的氮、磷含量差异较小,其氮、磷量变化范围分别为 13.67~26.38 mg·g⁻¹ 和 1.16~3.50 mg·g⁻¹;(3)不同水生植物的水质净化能力差异较大,10 种水生植物的水质氮、磷去除率范围分别为 36.3%~91.8%和 23.2%~94.0%,10 种水生植物的氮、磷吸收贡献率分别占水质氮、磷去除率的 46.3%~77.0%和 54.3%~92.7%。水体氮、磷去除率与水生植物净增生物量存在较高相关性,而与植株氮、磷含量不存在相关性,因而氮、磷吸收量而不是植株氮、磷含量应作为水生植物筛选的一个重要指标。

关键词:水生植物;氮、磷吸收;水质净化

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1571-05

Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Ten Aquatic Macrophytes

JIN Shu-quan¹, ZHOU Jin-bo¹, ZHU Xiao-li², YAO Yong-ru³, CAI Guo-cheng³, CHEN Ruo-xia¹

(1.Ecology and Environment Institute, Ningbo Academy of Agricultural Science, Ningbo 315040, China; 2.Ningbo Rural Water Management Division, Ningbo 315000, China; 3.Agriculture Office of Xiaying Street, Yinzhou Distract, Ningbo City, Ningbo 315100, China)

Abstract: Ten aquatic macrophytes uptake of nitrogen(N) and phosphorus(P) and their water purification capacity were investigated in hydrostatic conditions from middle February 2009 to middle June 2009, including *Hydrocleys nymphoides*, *Jussiaea repens*, *Myriophyllum aquaticum*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Oenanthe javanica*, *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, *Canna indica*, *Iris pseudacorus*, *Iris tectorum*. Results showed that (1)the net accumulated biomass strongly changed from 109.9 g·m⁻² to 1511.1 g·m⁻² among different aquatic macrophytes, with the highest biomass of *Hydrocotyle vulgaris* and the lowest of *Jussiaea repens*;(2)there was little difference in N and P concentration among different aquatic macrophytes, with the range of N and P contents 13.67~26.38 mg·g⁻¹ and 1.16~3.50 mg·g⁻¹, respectively;(3) there was greater difference in the water purification ability among these ten aquatic macrophytes, with the range of N and P removal efficiency 36.3%~91.8% and 23.2%~94.0%, respectively. The uptake of N and P and their accumulation in macrophytes were the main mechanism for the water purification, which accounted for 46.3%~77.0% and 54.3%~92.7% of the nitrogen and phosphorus removal efficiency. N and P removal efficiency in water body was significantly correlated with plant net accumulated biomass, but not with N and P concentration in macrophytes, thus N and P absorption instead of N and P concentration should be an important index for aquatic macrophytes choosing.

Keywords: aquatic macrophyte; nitrogen and phosphorus uptake; water purification

水体富营养化是我国江河、湖泊、水库等地表水体的重要水环境问题之一,而水体中过高的氮、磷浓度是引起水体富营养化的主要原因^[1-3]。控制和修复富营养化水体的生态工程有很多,如人工湿地^[4-6]、植物

缓冲带^[7-8]、生态浮(床)岛^[9-10]等,在这些生态工程中水生植物是不可缺少的一部分。水生植物不但能直接吸收水体中的营养物质,而且能输送氧气到根区为微生物的生长、繁殖和污染物降解创造适宜条件^[11]。不同的水生植物具有不同的生长特性和氮、磷吸收能力,这就使得不同水生植物的水质净化能力存在较大的差异。目前大部分研究侧重于人工湿地系统、植物浮床系统的水质净化能力分析和系统中水生植物的氮、磷吸收能力研究^[4-5,10],在室内控制条件下也有一定的相关研究^[10,12],但是很少有在室内控制条件下同时比

收稿日期:2010-02-01

基金项目:宁波市重大科技攻关择优委托项目(2008C50019);宁波市鄞州区科技攻关项目(鄞科 2009-99);宁波市科技局一般攻关项目(2010C10009)

作者简介:金树权(1981—),男,浙江嵊州人,博士,主要从事农村生态环境研究。E-mail:jinshuq@126.com

通讯作者:陈若霞 E-mail:crx900@163.com

较研究包括不同类型水生植物的氮、磷吸收和水质净化能力,以及水生植物氮、磷吸收和其他作用在水质氮、磷降解中的作用贡献率。

本研究选取浮叶、浮水和挺水 3 种类型 10 种水生植物为研究对象,在室内静水条件下通过植物生物量、植株氮、磷含量、水质氮、磷降解率等多方面分析对 10 种水生植物的氮、磷吸收和水质净化能力进行比较研究,以期为水生植物在生态工程中的选择应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究概况

本试验在宁波市农业高新技术实验园区大棚内进行,选用长×宽×高为 70 cm×60 cm×50 cm 的塑料桶进行盆栽试验。首先在塑料桶底部铺设 20~30 cm 的细黄沙供水生植物扎根,试验用水为农田沟渠水加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 KH_2PO_4 配制而成的富营养化水,根据预备试验结果,考虑到水生植物氮、磷降解能力的差异和实验误差等问题,不同水生植物的试验桶加入的氮、磷有所差异,各桶的总氮(TN)16.0~110.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷(TP)2.49~9.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验共选择不同类型的 10 种水生植物进行对比试验,包括浮叶植物:水罂粟(*Hydrocleys nymphoides*)、黄花水龙(*Jussiaea repens*);浮水植物:大藻(*Pistia stratiotes*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*);挺水植物:大聚藻(*Myriophyllum aquaticum*)、香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、美人蕉(*Canna indica*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、鸢尾(*Iris tectorum*)。每种水生植物设 3 个重复另外设 3 个无水生植物的空白对照,共计 33 个试验水桶。在 2008 年 9 月将供试植物移入桶内进行培养和越冬,从 2009 年 2 月中旬开始试验。

1.2 分析方法

植物生物量测定:在 2009 年 2 月和 6 月中旬测定水生植物起始和终止的生物量,两者差值为水生植物净增生物量。根据水生植物的特点分两种方法进行生物量测定,植株较明显的水生植物选取各桶高、中、矮 3 株具有代表性的植株并统计各桶相应植株数,植株不明显的水生植物利用 20 cm×20 cm 的铁丝框框定范围后进行采样。植物采样后送至实验室用自来水洗去残留物,然后放置在阴凉处晾干表面残留水分,将茎叶部和根部分开称量湿重,之后将其在 80 ℃ 烘箱中烘至恒重后称量干重,最后把结果换算成单位面积植物干重。将烘干后的植物样品用碾磨机粉碎,

过 0.25 mm 筛后保存,用于测定植株氮、磷含量。

水质和植株总氮总磷测定:在 2009 年 2 月中旬至 6 月中旬研究期间每月取样测定水质总氮、总磷,因取样、植物吸收和蒸发损失水分用蒸馏水进行补充,水质 TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989),TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定^[13]。植株氮、磷含量在 2009 年 2 月中旬和 6 月中旬各测定 1 次,预处理好的植物样品采用浓硫酸-过氧化氢法消解,其后植株 TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989),植株 TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定。

为明确 10 种水生植物的水质净化能力以及水生植物氮、磷吸收在水质净化过程中的作用,本研究在测定植物生物量、植株氮、磷含量、水质氮、磷浓度的基础上进行水体氮、磷去除率 η_1 、水生植物氮、磷吸收贡献率 η_2 以及其他作用氮、磷降解贡献率 η_3 的计算,计算如公式(1)、(2)、(3)所示。

$$\eta_1 = (C_1Q_1 - C_2Q_2) / C_1Q_1 \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = (P_2B_2 - P_1B_1) / (C_1Q_1 - C_2Q_2) \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_3 = 100\% - \eta_2 \quad (3)$$

式中: C_1, C_2 和 Q_1, Q_2 分别表示水质的起始、终止浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和水量(L); P_1 和 B_1 分别表示 2009 年 2 月中旬水生植物茎叶部或根部的氮、磷含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和生物量(g); P_2 和 B_2 分别表示 2009 年 6 月中旬水生植物茎叶部或根部的氮、磷含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和生物量(g)。采用 DPS 数据处理系统对试验结果进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水生植物的生物量变化

经过 4 个月的生长,水生植物的净增生物量差异较大(表 1),变化范围为 109.9~1 511.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (干重),净增生物量最高的香菇草是最低的黄花水龙的 13.7 倍。所选的 10 种水生植物中,黄花水龙和水罂粟的净增生物量显著低于其他 8 种水生植物的净增生物量;大藻和凤眼莲的净增生物量在 10 种水生植物中属于中等水平;大聚藻、香菇草和水芹属于丛生挺水植物,净增生物量均较高,分别达 1 214.1、1 511.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 935.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,特别是香菇草其净增生物量显著高于其他 9 种水生植物;美人蕉属于多年生宿根草本挺水植物,净增生物量高达 1 202.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中茎叶部在试验期间增加 5.6 倍,净增生物量为 996.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,占总净增生物量的 82.9%;黄菖蒲和鸢尾同属鸢尾科挺水

植物,具有较强的耐寒性,在我国南方地区冬季低温条件下也能正常生长,但从生物净增生物量角度看这两者都不高,分别为 $313.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $340.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,并且茎叶部和根部的净增生物量相差较少。

2.2 水生植物的植株氮、磷含量

不同水生植物的植株氮、磷含量相差较少(表 2),不同时期不同植物部位的植株含氮量变化范围为 $13.67\sim 26.38\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,植株含磷量变化范围为 $1.16\sim 3.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。2 月中旬的植株氮、磷含量均大于 6 月中旬的植株氮、磷含量,这可能与水质起始氮、磷浓度较高有关,也可能因为水生植物在生长初期植株氮、磷含量相对较高有关;从植株部位上看,同一水生植物茎叶部的氮、磷含量大于根部的氮、磷含量,从通过收割植物去除氮、磷的角度看,茎叶部的植物氮、磷含量越高越有利于通过收割植物去除氮、磷,如美人蕉的茎叶部生物量和氮、磷含量均较高,定期收割可大大

提高水质净化效果。

2.3 水生植物氮、磷吸收和水质净化能力分析

不同水生植物的水质净化能力存在较大差异(表 3),10 种水生植物的水质氮去除率为 $36.3\%\sim 91.8\%$,水质磷去除率为 $23.2\%\sim 94.0\%$ 。水体中磷主要依靠植物吸收、底质和根系吸附等途径去除^[14-15],而水体氮的去除除了这两条途径外,还存在氨的挥发、硝化和反硝化等^[16-17]途径。本研究将水质氮、磷去除作用分为植物吸收和其他作用两部分进行研究。从表 3 可以看出,水生植物的氮吸收贡献率为 $46.3\%\sim 77.0\%$,其他作用氮降解贡献率为 $23.0\%\sim 53.7\%$;水生植物的磷吸收贡献率为 $54.3\%\sim 92.7\%$,其他作用磷降解贡献率为 $7.3\%\sim 45.7\%$ 。与相关研究相比^[10,18-19],本研究中水生植物氮、磷吸收的贡献率相对较高,这可能是因为本试验在静水条件下进行,吸附于底质和根系的氮、磷由于水质氮、磷浓度的降低而再次释放到水体而被植物

表 1 10 种水生植物的生物量变化
Table 1 Variation of biomass of ten aquatic macrophytes

植物名	茎叶部/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$			根部/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$			总净增生物量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
	2 月中旬	6 月中旬	净增量	2 月中旬	6 月中旬	净增量	
水罂粟	83.2±7.4	208.6±21.0	125.4±28.3	—	—	—	125.4±28.3f
黄花水龙	59.4±1.9	169.3±20.5	109.9±22.4	—	—	—	109.9±22.4f
大聚藻	472.1±25.2	1 686.2±91.8	1 214.1±67.6	—	—	—	1 214.1±67.6b
香菇草	445.9±20.3	1 957±125.9	1 511.1±106.8	—	—	—	1 511.1±106.8a
水芹	617.4±35.6	1 553.0±140.1	935.6±108.2	—	—	—	935.6±108.2c
大藻	52.6±7.4	352.6±30.9	300.0±25.4	15.0±1.6	87.8±6.4	72.8±4.9	372.8±25.9e
凤眼莲	117.2±6.6	621.0±28.9	503.8±22.5	48.1±4.7	152.9±10.1	104.8±5.6	608.6±28.0d
美人蕉	216.6±7.9	1 213.1±166.4	996.5±166.2	410.8±21.3	616.6±19.5	205.8±8.4	1 202.3±158.4b
黄菖蒲	587.1±23.6	780.9±38.3	193.8±21.9	578.2±22.0	698.2±23.5	120.0±3.5	313.8±25.4e
鸢尾	545.8±38.4	690.3±69.9	144.5±50.3	638.8±33.2	698.2±32.8	196.0±10.4	340.5±40.0e

注:同一列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 差异显著水平。下同。

表 2 10 种水生植物的植株氮、磷含量
Table 2 Plant nitrogen and phosphorus contents of ten aquatic macrophytes

植物名	含氮量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$				含磷量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$			
	2 月中旬		6 月中旬		2 月中旬		6 月中旬	
	茎叶部	根部	茎叶部	根部	茎叶部	根部	茎叶部	根部
水罂粟	21.12±1.37b	—	17.96±1.58ab	—	3.50± 0.25a	—	2.40 ±0.24ab	—
黄花水龙	23.44±1.05ab	—	18.59±0.61a	—	3.44 ±0.22a	—	2.59± 0.12a	—
大聚藻	23.33±1.52ab	—	15.66±0.67b	—	1.79± 0.10ef	—	1.36± 0.20fg	—
香菇草	21.35±1.53b	—	11.55±0.85c	—	1.55± 0.08f	—	1.16 ±0.17g	—
水芹	20.95±1.75b	—	16.43±0.98ab	—	2.83± 0.11bc	—	2.19± 0.14bc	—
大藻	22.38±1.80b	17.80±0.80b	16.68±1.11ab	13.67±1.23b	3.25± 0.21ab	2.43±0.19a	2.63± 0.37a	1.62±0.15b
凤眼莲	23.79±1.84ab	19.76±0.84b	16.96±1.56ab	14.23±0.88b	2.40± 0.21cd	2.16±0.18ab	1.98 ±0.23cd	1.77±0.17b
美人蕉	26.38±1.92a	24.68±1.95a	17.97±0.89ab	19.71±0.75a	2.24± 0.17d	2.41±0.21a	1.62 ±0.06ef	2.05±0.18a
黄菖蒲	23.18±1.47ab	18.60±0.62b	18.34±1.22ab	16.20±0.19b	2.16± 0.08de	1.89±0.15b	1.77± 0.08de	1.59±0.11b
鸢尾	21.40±2.75b	19.30±0.53b	18.18±0.89ab	15.98±0.33b	2.08± 0.15de	1.93±0.11b	1.85 ±0.16cde	1.67±0.16b

表 3 10 种水生植物的氮、磷去除率及各作用的贡献率
Table 3 Nitrogen and Phosphorus removal efficiency of ten aquatic macrophytes and contributions of different effects

植物名	水质氮去除率/ %	植物氮吸收贡献率/%		其他作用氮降 解贡献率/%	水质磷去除率/ %	植物磷吸收贡献率/%		其他作用磷降 解贡献率/%
		茎叶部	根部			茎叶部	根部	
水罨粟	55.3±3.6d	51.0±3.6	—	49.0±3.6	32.9±2.3f	60.6±4.2	—	39.4±4.2
黄花水龙	36.3±2.4f	67.2±5.1	—	32.8±5.1	23.2±1.5g	82.2±5.6	—	17.8±5.6
大聚藻	89.9±2.3a	71.2±1.8	—	28.8±1.8	75.3±1.9bc	92.0±2.3	—	8.0±2.3
香菇草	91.8±2.0a	65.5±1.5	—	34.5±1.5	79.1±2.5b	91.8±3.0	—	8.2±3.0
水芹	91.5±1.4a	72.3±1.2	—	27.7±1.2	94.0±1.9a	92.7±1.9	—	7.3±1.9
大藻	74.9±3.1c	62.5±2.6	12.4±0.5	25.1±3.1	69.9±1.6d	73.1±1.7	10.2±0.2	16.7±1.9
凤眼莲	80.4±2.2b	66.5±1.8	10.5±0.3	23.0±2.1	77.8±2.2bc	76.8±2.2	13.5±0.4	9.7±2.6
美人蕉	88.0±2.9a	67.4±2.3	8.4±0.3	24.1±2.6	74.3±1.6c	77.2±1.7	14.3±0.3	8.5±2.0
黄菖蒲	38.6±3.4f	26.0±2.4	20.3±1.8	53.7±4.2	29.3±2.4f	47.1±3.7	7.2±0.6	45.7±4.3
鸢尾	50.0±3.8e	26.2±2.0	30.5±2.4	43.3±4.4	50.4±4.0e	31.9±2.7	36.3±3.0	31.29±5.7
CK	22.6±1.8g	0.0	0.0	100.0	17.4±1.7h	0.0	0.0	100.0

吸收。从其他作用氮、磷降解贡献率的比较来看,氮的降解贡献率要明显高于磷的降解贡献率,这是因为水体中磷的去除除了植物吸收外只有依靠底质和根系吸附去除,而氮的去除还存在氨的挥发、硝化和反硝化等途径,水生植物能输送氧气到根区,为微生物的硝化反硝化提供适宜条件从而提高水体中氮的去除效率。

3 讨论

从不同类型水生植物的生物量变化比较看(表 1),浮叶植物的总净增生物量较低,这可能是因为浮叶植物的生长相对较慢,而且其生物量仅在根系和水面浮叶,不会向水面以上空间立体发展;大藻和凤眼莲都属于浮水植物,通过分蘖生殖能快速繁殖,生物量增长较快,但由于本试验在桶内进行其生长范围受限制,生物净增量并不高;挺水植物则可以在水面上下很大空间立体发展,因此其生物量非常大。从表 3 的结果可以看出,除黄菖蒲和鸢尾两种耐寒性挺水植物总净增生物量较少外,其余丛生和宿根挺水植物都具有较大的总净增生物量。

将水质氮、磷去除率与水生植物净增生物量、植株氮、磷含量进行相关性分析,水质氮、磷去除率与水生植物净增生物量相关性较高,分别高达 0.854($P<0.01$)和 0.770($P<0.01$),而水质氮、磷去除率与水生植物植株氮、磷含量不存在相关性关系,可见水生植物的净增生物量是决定水生植物水质净化能力的一个重要因素,氮磷吸收量而不是植株氮磷含量应作为水生植物筛选的一个重要指标。在所选 10 种水生植物中,大聚藻、香菇草、水芹和美人蕉具有较高的水质

净化能力,可以作为优选水生植物在生态工程中进行利用,特别是大聚藻和香菇草具有一定的耐寒特征,在我国南方地区冬季低温条件下能少量生长;大藻和凤眼莲这两种浮水植物因繁殖速度极快而被认为具有生物侵略性^[20],如果进行定期打捞清理其水质净化能力也应较高,但在生态工程利用中应注意其管理,否则将泛滥成灾;水罨粟、黄花水龙、黄菖蒲、鸢尾的水质净化效果相对较差,但是黄菖蒲和鸢尾在我国南方地区冬季低温条件下能正常生长,因此可以将这两种挺水植物与其他水生植物组配使用,以提高冬季条件下的持续净水能力和景观效果。

当然,静水条件和自然条件存在较大的差异,在自然条件下由于水体具有流动性,水质中的氮、磷通过沉淀、底质吸附和微生物降解等其他作用可能会比在静水条件下大大增强。水生植物的生长由于不受空间局限其总净增生物量也会有所增加,特别是浮水植物的生物量变化。本文在静水条件下的研究结果虽然具有一定的局限性,但仍对水生植物的筛选具有一定的参考价值。

4 结论

本研究在 2009 年 2 月中旬至 6 月中旬期间在室内静水条件下通过植物生物量、植株氮、磷含量、水质氮、磷降解率等多方面分析,对 10 种水生植物的氮、磷吸收和水质净化能力进行比较研究,可以得出如下结论:

(1)不同水生植物的净增生物量差异较大,变化范围为 109.9~1 511.1 g·m⁻²,净增生物量最高的香菇草是最低的黄花水龙的 13.7 倍。

(2)不同水生植物的植株氮、磷含量差异较小,不同时期不同植物部位的植株含氮、磷量变化范围分别为 $13.67\sim 26.38\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.16\sim 3.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;同一水生植物相同部位在2月中旬的植株氮、磷含量要大于6月中旬的植株氮、磷含量,同一水生植物相同时期茎叶部氮、磷含量要大于根部植株氮、磷含量。

(3)不同的水生植物的水质净化能力存在较大差异,10种水生植物的水质氮、磷去除率分别为 $36.3\%\sim 91.8\%$ 和 $23.2\%\sim 94.0\%$,大聚藻、香菇草、水芹和美人蕉具有较高的水质净化能力。水体氮、磷去除率与水生植物净增生物量存在较高相关性,分别为 $0.854(P<0.01)$ 和 $0.770(P<0.01)$,而与植株氮、磷含量之间不存在相关性关系。10种水生植物的氮、磷吸收贡献率分别占水体氮、磷去除率的 $46.3\%\sim 77.0\%$ 和 $54.3\%\sim 92.7\%$ 。

参考文献:

- [1] Howarth R W, Marino R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 364–376.
- [2] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication [J]. *National Acad Sciences*, 2008, 105(32): 11039–11040.
- [3] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication [J]. *Science*, 2009, 324: 636–638.
- [4] 蒋跃平, 葛 滢, 岳春雷, 等. 轻度富营养化人工湿地处理系统中植物的特性 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2005, 32(3): 309–319.
JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Characteristics of plants in constructed wetland treating light eutrophic water [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2005, 32(3): 309–319.
- [5] 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 597–601.
XU De-fu, XU Jian-min, WANG Hua-sheng, et al. Absorbability of wetland plants on N and P from eutrophic water [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 597–601.
- [6] Otto C R V, Forester D C, Snodgrass J W. Influences of wetland and landscape characteristics on the distribution of carpenter frogs [J]. *Wetlands*, 2007, 27(2): 261–269.
- [7] 周 婷, 彭少麟, 任问韬. 东江河岸缓冲带景观格局变化对水体恢复的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 231–239.
ZHOU Ting, PENG Shao-lin, REN Wen-tao. Influence of landscape pattern changes on the restoration of stream in Dongjiang River riparian buffer [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 231–239.
- [8] 吴 健, 王 敏, 吴建强, 等. 滨岸缓冲带植物群落优化配置试验研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 42–45.
WU Jian, WANG Min, WU Jian-qiang, et al. Optimization of plant community of riparian buffer zone [J]. *Rural Eco-environment*, 2008, 24(4): 42–45.
- [9] 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2199–2203.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, XUE Li-hong, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2199–2203.
- [10] 罗固源, 郑剑锋, 许晓毅, 等. 4种浮床栽培植物生长特征及吸收氮、磷能力的比较 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 285–290.
LUO Gu-yuan, ZHENG Jian-feng, XU Xiao-yi, et al. Comparison of the growth characteristics and nutrient uptake of four kinds of plants cultivated on a floating-bed [J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2009, 29(2): 285–290.
- [11] 李慎瑰, 赵以军, 程 凯. 湿地植物根际微生物处理生活污水的模型规模研究 [J]. 工业安全与环保, 2009, 35(8): 9–10.
LI Shen-gui, ZHAO Yi-jun, CHENG Kai. Model study of wetland plant rhizosphere microorganism in the treatment of sanitary wastewater [J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 2009, 35(8): 9–10.
- [12] Brown L M, White J R, Brix H. Alum application to improve water quality in a municipal wastewater treatment wetland: Effects on macrophyte growth and nutrient uptake [J]. *Chemosphere*, 2010, 79(2): 186–192.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environment Protection Administration/Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods Editorial Board. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. the 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [14] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84–88.
XU Hong-deng, XI Bei-dou, WANG Jing-gang, et al. Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agriculture drainage ditch [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(2): 84–88.
- [15] Polomki R F, Taylor M D, Bielenberg D G, et al. Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands [J]. *Water, Air & Pollution*, 2009, 197(1–4): 223–232.
- [16] LIN Y F, JING S R. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from ground water in constructed wetland [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119: 413–420.
- [17] SUN G, AUSTIN D. A mass balance study on nitrification and deammonification in vertical flow constructed wetlands treating landfill leachate [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(3): 117–123.
- [18] 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 [J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1718–1723.
JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plant in constructed wetland on sightseeing water [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1718–1723.
- [19] 李建娜, 胡日利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮、磷吸收富集能力研究 [J]. 环境污染与防治, 2007, 29(7): 506–509.
LI Jian-na, HU Yue-li, WU Xiao-fu, et al. Nitrogen and phosphorus removal capacity of plant species in constructed wetlands for treating municipal wastewater [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(7): 506–509.
- [20] 金 樑, 王晓娟, 高 雷, 等. 上海市凤眼莲种群的时空分布及控制对策 [J]. 生态学报, 2005, 24(2): 1454–1458.
JIN Liang, WANG Xiao-juan, GAO Lei, et al. Spatial and temporal distribution of water hyacinth population in Shanghai and its control methods [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 1454–1458.