

不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究

高岩, 马涛, 张振华, 张力, 王岩, 严少华*

(江苏省农业科学研究院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要:通过模拟实验,比较不同生长阶段凤眼莲对不同程度富营养化水体氮、磷去除效果,研究植株吸收氮、磷能力对去除水体营养盐的贡献,以及对底泥营养盐含量的影响。结果发现随着富营养化水体初始氮浓度增加,不同生长阶段凤眼莲吸收氮量占水体可溶性总氮(TDN)去除量的比例呈现明显下降趋势,但不同生长阶段凤眼莲吸收作用在净化不同浓度氮的效率和贡献方面存在一定差异。在低浓度富营养化水体中,三个生长阶段凤眼莲对水体TDN、TDP去除效果和效率的影响无显著差异。在净化中、高浓度水体氮时(TDN浓度约为 $7, 13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),生长初期凤眼莲对水体TDN在实验前期的净化效率明显高于生长后期,而生长中期净化效率最慢,但在实验中、后期各生长阶段凤眼莲净化速率趋于一致。在中等氮浓度水体中(TDN浓度约为 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),凤眼莲吸收氮量占水体氮损失量百分比为生长后期<生长中期<生长初期。种植凤眼莲水体中底泥总氮、总磷含量均显著降低;凤眼莲对磷吸收量高出水体可溶性总磷(TDP)损失量,不同生长阶段凤眼莲吸收作用对消减水体磷的贡献无显著差异。综合分析说明生长初期凤眼莲通过主动吸收净化高浓度水体氮的速率最快、贡献最高,而通过凤眼莲根系调节的生物脱氮途径理论上较弱,凤眼莲不仅能够快速去除上覆水体中的磷,而且能够吸收底泥中的磷。

关键词:氮;磷;凤眼莲;富营养化

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)12-2427-09 **doi:**10.11654/jaes.2014.12.021

Nutrient Removals from Eutrophic Water by *Eichhornia Crassipes* at Different Growth Stages

GAO Yan, MA Tao, ZHANG Zhen-hua, ZHANG Li, WANG Yan, YAN Shao-hua*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The capability of floating macrophyte, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), to clean up eutrophic water has been widely recognized, but there is still lack of information on the effect of *E. crassipes* at different growth stages on nutrient removal from eutrophic water with various concentrations of nitrogen (N) and phosphorous (P). A series of simulated experiments were conducted comparing the efficiency of N and P removals from eutrophic water by *E. crassipes* at different growth stages. The proportion of N accumulated by *E. crassipes* to the total dissolved nitrogen (TDN) removal from the water declined as the initial concentrations of N in the water increased. However, *E. crassipes* at different growth stages showed different efficiencies of TDN removal from the water with the various concentrations of N and P. In water with relatively low concentrations of N and P, the effects of *E. crassipes* on the removals of TDN and total dissolved phosphorous (TDP) were not significantly different among the different growth stages; whereas in water with relatively high concentrations of N (TDN $\sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ or $\sim 13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the efficiency of TDN removal from the water at the initial phase of the experiments was significantly higher at the early stage of plant growth than the middle and late growth stages, but became closer among the different growth stages as the experiments progressed. In water with TDN levels of $\sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the proportion of plant N accumulation to N removals from water was in order of the late growth stage < middle growth stage < early growth stage. The growth of *E. crassipes* significantly reduced the contents of N and P in sediments. The amount of P assimilated by *E. crassipes* exceeded the amount of P removed from the water. The contribution of plant assimilation to the

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100373); 973 计划前期研究专项(2012CD426503); 江苏省科技支撑计划项目(BE2013436); 江苏省农业科技自主创新资金专项(CX(14)2093)

作者简介: 高岩(1978—), 女, 副研究员, 研究方向为富营养化水体生物修复及机理研究。E-mail: jaas.gaoyan@yahoo.com
马涛, 共同第一作者。

* 通信作者: 严少华 E-mail: shyan@jaas.ac.cn

removals of TDP was not significantly different among the different stages of plant growth. These results showed that nitrogen assimilation by *E. crassipes* at the early growth stage contributed greatly to N removals from water; while N removal via the root biological processes was small, and *E. crassipes* not only removed P from the water, but also assimilated P released from the sediments.

Keywords: nitrogen; phosphorus; water hyacinth; eutrophication

水体富营养化治理已成为当今世界性难题。水生植物修复是目前净化富营养化水体关键技术之一,与传统物理、化学方法相比,具有环境友好、投资低、净化效果稳定、便于应用等优势,发展潜力巨大^[1-2]。纽约州立农业与生物科学院 Willian. J. Jewell^[3]指出,以水生植物为基础的生态处理体系和典型生化处理厂对污水的净化效果是一样的。

凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)是水生植物中研究最早、最深入,同时也是实际修复工程中应用范围较广的水生植物,被公认为是去除富营养化水体氮、磷效果最好的水生植物^[4]。近年来已经被广泛应用于生活污水、工业废水、富营养化湖泊、河道^[5-7]等水体处理中。

漂浮植物凤眼莲根系发达、生长繁殖快、耐污能力强,关于凤眼莲对水体氮、磷等污染物高吸收作用的研究屡见报道^[8],其在污染水体修复中起着不可取代的作用。植物不同生长阶段对氮、磷吸收效率不同,对富营养化水体净化效果可能有所差异^[9]。富营养水体氮、磷浓度对植物吸收效率也有一定影响。已有研究表明,在一定浓度范围内,水生植物对氮、磷吸收量随水体营养元素浓度升高而相应增加^[10-11]。然而,高浓度氮、磷可能会对植物主动吸收产生抑制。以往研究通常局限于水生植物某一生长阶段对特定类型污水的净化效果研究,但并未对不同生长阶段水生植物的吸收作用去除不同浓度富营养化水体氮的贡献进行系统的评价。由于水生植物净化过程是连续生长的阶段性过程,不同生长阶段的水生植物通过吸收作用净化氮的效果可能存在差异,且其与水生植物并存的微生物驱动的氮转化过程的相对重要性可能发生变化。因此,有必要研究不同生长阶段凤眼莲对不同程度污染水体氮、磷吸收累积及水体氮磷去除能力,为凤眼莲净化富营养化水体生态工程设计提供理论依据。

本文通过模拟实验,比较不同生长阶段凤眼莲对不同程度富营养化水体氮、磷去除效果,研究植株吸收氮、磷能力对移除水体营养盐的贡献,以及对底泥营养盐含量的影响。同时,监测凤眼莲在净化不同程度富营养化水体时水体理化指标 pH、DO 的变化规律。期望通过研究为阐明不同生长阶段凤眼莲对不同

程度富营养化水体的净化能力,及其在净化富营养化水体过程中吸收作用对去除水体氮磷的贡献提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物

凤眼莲,俗称水葫芦,属雨久花科,凤眼莲属,为大型漂浮水生植物。凤眼莲生长初期试验开始前,在江苏省农业科学院 2 号蓄水塘凤眼莲种养区选取植株健壮且长势一致的凤眼莲种苗进行移栽。由于凤眼莲属分蘖繁殖,难以区分不同苗龄阶段,而生长中期及生长后期苗龄均由实验所用的生长初期凤眼莲种苗生长繁殖获得。本文所指生长初期为 6 月份,生长中期为 8 月份,生长后期为 10 月份,符合凤眼莲在亚热带地区的生长规律。

1.2 供试富营养化水体与底泥

富营养化水体为江苏省农业科学研究院蓄水塘污水。该蓄水塘水体主要来源于生活污水和雨水,主要用于灌溉水稻田。2013 年,蓄水塘水体的 pH 变化范围在 6.9~8.2, DO(溶解氧)变化范围 7.4~13.7 mg·L⁻¹, TN(总氮)变化范围 5.0~10.2 mg·L⁻¹, TP(总磷)变化范围 0.2~0.7 mg·L⁻¹。实验所用底泥也挖自农科院蓄水塘,有机碳含量为 2.5%, TN 约为 5.3 g·kg⁻¹, TP 约为 0.29 g·kg⁻¹。

将污水稀释或直接将该污水作为实验用水,以 KNO₃ 形式向其中加入不同浓度的 NO₃⁻-N, 配制为具有氮浓度梯度的富营养化水体;磷浓度梯度由源污水稀释或不稀释产生。不同实验阶段不同程度富营养化水体的氮、磷初始浓度见表 1。

1.3 试验方法

1.3.1 实验处理

实验处理设为 3 种初始硝态氮浓度(2、5、10 mg·L⁻¹)富营养化水体,并同时设种植与不种植凤眼莲处理。每个处理重复 4 次。具体表示为:处理 I, 2 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N + 凤眼莲(2 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N + WH);处理 II, 2 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N;处理 III, 5 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N + 凤眼莲(5 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N + WH);处理 IV, 5 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N;处理 V, 10 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N + 凤眼莲(10 mg·L⁻¹ NO₃⁻-N +

表 1 不同程度富营养化水体的初始氮、磷浓度水平

Table 1 Initial concentrations of N and P in prepared eutrophic water

实验阶段	浓度水平	NO ₃ -N/ mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·L ⁻¹	TDN/ mg·L ⁻¹	TDP/ mg·L ⁻¹
6 月	低	1.45±0.08	3.04±0.37	5.25±0.32	0.62±0.11
	中	3.52±0.12	3.08±0.39	7.62±0.63	0.93±0.16
	高	10.25±0.16	2.72±0.21	13.52±0.51	1.13±0.21
8 月	低	1.56±0.10	0.97±0.11	3.97±0.40	0.46±0.02
	中	3.15±0.12	1.71±0.12	8.36±0.32	0.65±0.16
	高	7.63±0.60	4.00±0.41	17.54±0.47	0.94±0.03
10 月	低	1.99±0.13	0.80±0.03	3.26±0.47	0.89±0.08
	中	5.67±0.25	0.84±0.24	7.06±0.34	1.30±0.13
	高	11.34±0.45	0.86±0.03	12.36±0.30	1.60±0.32

注:TDN 可溶性总氮;TDP 可溶性总磷。

WH);处理 VI:10 mg·L⁻¹ NO₃-N。

1.3.2 实验设计

实验分别于 2013 年 6 月 8 日至 24 日、2013 年 8 月 9 日至 17 日和 2013 年 10 月 14 日至 30 日在江苏省农业科学研究院蓄水塘边温室中进行。实验用水为非流动静态水体,承载于长、宽、深为 90 cm×64 cm×70 cm 塑料集装箱中。实验开始前,在每个处理的塑料集装箱底部填充 20 cm 厚底泥,加入配制好的富营养化水 300 L。实验第一阶段(6 月份),种植水生植物处理的水体种植覆盖度约为 60% 凤眼莲,初始生物量约为 1.0 kg(以鲜重计)。使用 YSI 测定每个处理水体中的温度、pH、DO、ORP;采集初始水样测定水体初始 NO₃-N、NH₄⁺-N、NO₂-N、TDN、TDP 含量;采集初始凤眼莲植物样测定鲜重,于实验室内 105 ℃ 烘箱中杀青并烘干后测定植物含水率,粉碎后测定植物 TN、TP 含量;采集初始底泥样,于实验室内测定底泥有机质、TN、TP 含量。实验期内,每间隔 1 d 采集水样测定 NO₃-N、NH₄⁺-N、NO₂-N、TDN、TDP 含量以及理化指标(pH、DO、ORP、水温)。实验结束时,测定每个处理凤眼莲生物量,水体 NO₃-N、NH₄⁺-N、NO₂-N、TDN、TDP 含量,采集底泥测定底泥含有有机质、TN、TP 量,同时采集凤眼莲测定植株体内氮磷含量。生长中期(8 月份)、生长后期(10 月份)凤眼莲初始生物量为前一阶段结束时凤眼莲生物量,分别为 2.3~2.8 kg 和 5.0~6.5 kg。实验测定指标及过程与第一阶段相同。

1.3.3 测定项目及方法

水体理化指标使用 YSI 多功能水质测定仪(YSI ProPlus)测定水温、pH、DO、ORP。可溶性总氮(TDN)含量使用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;可溶

性总磷(TDP)含量使用钼锑抗分光光度法测定^[12]。底泥采回后,于晾土间晾干粉碎过 100 目及 60 目筛,之后底泥全氮使用半微量开氏法测定;全磷使用 HClO₄-H₂SO₄ 法测定^[13]。

1.4 计算方法

$$E_{\text{氮}} = C_{\text{初}} \times V_{\text{初}} - C_{\text{终}} \times V_{\text{终}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{氮}}$ 为实验阶段富营养化水体可溶性总氮损失量,mg; $C_{\text{初}}$ 为初始富营养化水体可溶性总氮浓度,mg·L⁻¹; $V_{\text{初}}$ 为实验初始富营养化水体体积,L; $C_{\text{终}}$ 为实验结束富营养化水体可溶性总氮浓度,mg·L⁻¹; $V_{\text{终}}$ 为实验结束富营养化水体体积,L。

$$E_{\text{莲-氮}} = M_{\text{结束-莲}} \times C_{\text{结束-莲}} - M_{\text{初始-莲}} \times C_{\text{初始-莲}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{莲-氮}}$ 为实验阶段凤眼莲植株增加氮量,mg; $M_{\text{结束-莲}}$ 为实验结束凤眼莲重量(以干重计),mg; $C_{\text{结束-莲}}$ 为实验结束凤眼莲植株含氮量,%; $M_{\text{初始-莲}}$ 为实验开始凤眼莲重量(以干重计),mg; $C_{\text{初始-莲}}$ 为实验开始凤眼莲植株含氮量,%。

$$W_{\text{莲}} = E_{\text{莲-氮}} / E_{\text{氮}} \quad (3)$$

式中: $W_{\text{莲}}$ 为实验阶段凤眼莲吸收氮量(mg)占水体可溶性总氮损失量(mg)百分比,%。

1.5 统计方法

不同处理间水体 pH、DO 分析方法使用 SPSS 13.0 进行方差分析,种植与未种植凤眼莲水体 TDN、TDP 含量,不同处理凤眼莲含氮、磷量使用 SPSS 13.0 进行多因素差异性分析,其显著水平为 5%,极显著水平为 1%。

2 结果

2.1 不同生长阶段凤眼莲对不同浓度富营养化水体理化环境参数的影响

种植与未种植不同生长阶段凤眼莲的不同程度富营养化水体 pH、DO 均呈现出持续下降趋势(图 1),种植凤眼莲富营养化水体较未种植凤眼莲富营养化水体 pH、DO 极显著降低($P < 0.01$)。以生长初期(6 月)为例,3 种浓度对照水体 pH 由初始(8.04±0.19)、(7.94±0.48)、(8.31±0.46)至实验结束时分别降低至(7.54±0.10)、(7.66±0.16)、(7.74±0.21);水体 DO 含量由初始(6.69±0.43)、(6.80±0.47)、(6.99±0.26)mg·L⁻¹至实验结束时分别降低至(5.31±0.38)、(5.35±0.13)、(5.09±0.42)mg·L⁻¹。种植不同生长阶段凤眼莲水体 pH 由初始(7.64±0.28)、(7.84±0.45)、(7.79±0.53)至实验结束时分别降低至(7.00±0.04)、(6.99±0.02)、(7.02±0.10);水体 DO 含量由初始(6.59±0.28)、(6.65±

0.40)、 $(6.61 \pm 0.21) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 至实验结束时分别降低至 (2.24 ± 0.34) 、 (2.75 ± 0.37) 、 $(2.63 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，中、后期生长阶段实验呈现类似规律。

2.2 不同生长阶段凤眼莲净化不同浓度富营养化水体的效果

种植与未种植不同生长阶段凤眼莲不同浓度富营养化水体 TDN、TDP 浓度均呈现持续下降趋势，如图 2 所示。实验结束时，低浓度富营养化水体(氮磷浓度见表 1)，种植与未种植不同生长阶段凤眼莲 TDN、TDP 浓度差异性不显著；中高浓度富营养化水体(氮磷浓度见表 1)，种植不同生长阶段凤眼莲富营养化

水体 TDN、TDP 浓度极显著($P < 0.01$)低于相应条件下未种植凤眼莲的对照水体。以生长后期为例，不同浓度对照水体 TDN 浓度由初始 (3.7 ± 0.1) 、 (6.9 ± 0.2) 、 $(12.3 \pm 0.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 至实验结束分别降至 (0.9 ± 0.01) 、 (0.9 ± 0.03) 、 $(1.2 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；水体 TDP 含量由初始 (0.9 ± 0.1) 、 (1.2 ± 0.1) 、 $(1.9 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 至实验结束分别降至 (0.14 ± 0.06) 、 (0.27 ± 0.01) 、 $(0.26 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。种植凤眼莲的不同浓度富营养化水体，TDN 浓度由初始 (3.69 ± 0.10) 、 (6.86 ± 0.20) 、 $(12.29 \pm 0.39) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 至实验结束分别降至 (0.89 ± 0.01) 、 (0.93 ± 0.03) 、 $(1.18 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，富营养化水体 TDP 浓度由初始 $(0.85 \pm$

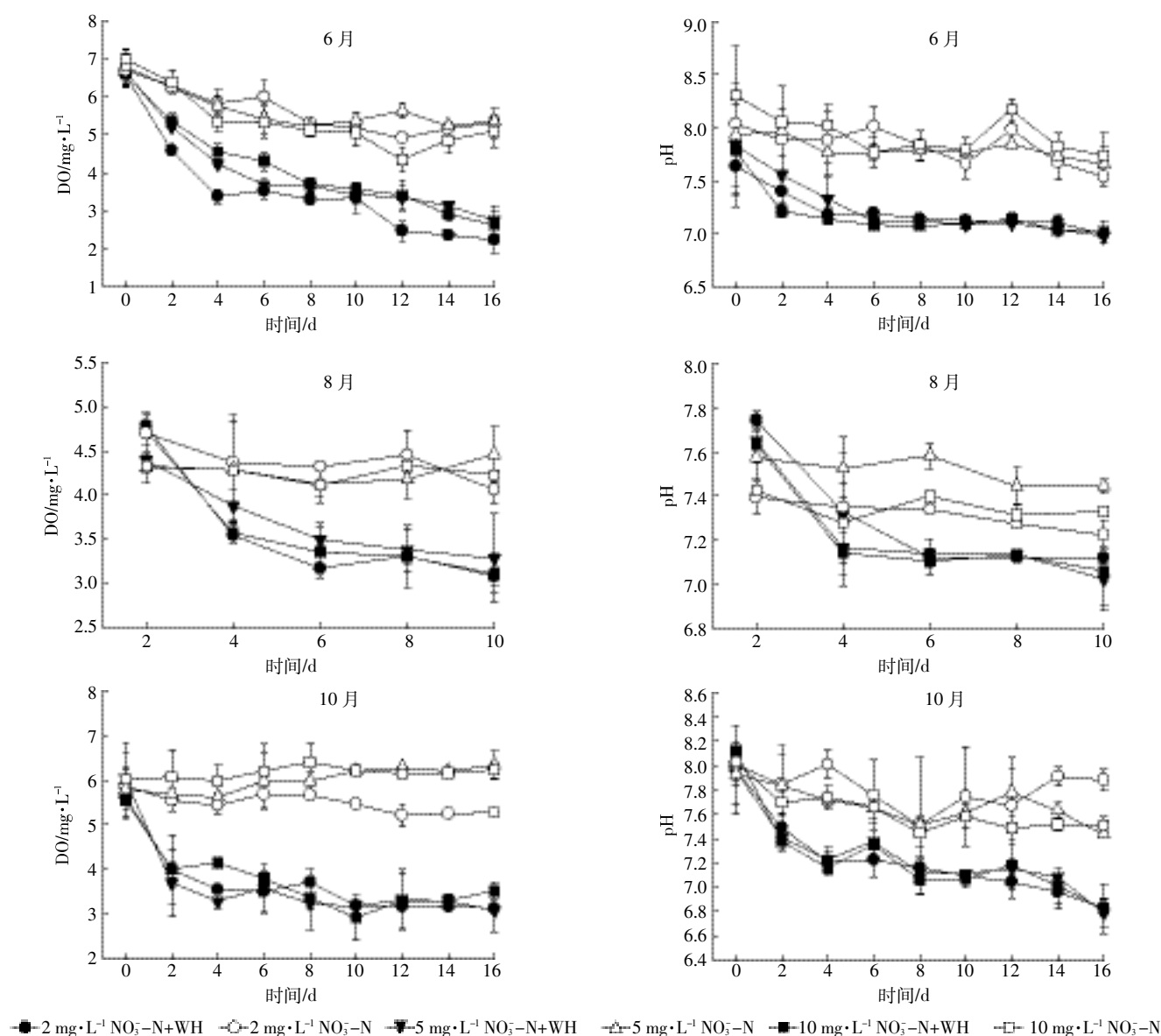


图 1 种植与未种植不同生长阶段凤眼莲的不同浓度富营养化水体 DO、pH 随时间变化规律

Figure 1 Changes of DO and pH in water containing different initial concentrations of nutrients with or without growth of *Eichhornia crassipes* at different growth stages

0.10)、 (1.24 ± 0.13) 、 $(1.87 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 至实验结束分别降至 (0.14 ± 0.06) 、 (0.27 ± 0.01) 、 $(0.26 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生长初期、中期富营养化水体可溶性总氮、可溶性总磷含量变化规律类似。

低浓度富营养化水体中,三个生长阶段凤眼莲对水体 TDN、TDP 去除效果和效率的影响无显著差异。在中高浓度富营养化水体中,生长初期的凤眼莲对水体 TDN 在 4 d 内去除效率 $(54.3\% \pm 5.2\%、40.8\% \pm 3.0\%)$ 明显高于生长后期 $(38.6\% \pm 1.8\%、26.2\% \pm 3.0\%)$, 6 d 后净化效果趋于一致。而生长中期凤眼莲对水体

TDN 去除效率最低,对水体 TDN 在 4 d 内去除效率为 $28.5\% \pm 4.7\%、33.0\% \pm 0.02\%$ 。

2.3 不同生长阶段凤眼莲对不同浓度富营养化水体底泥营养盐变化规律

不同实验阶段底泥总氮、总磷含量变化如图 3 所示。未种植凤眼莲的对照水体,低浓度富营养化水体底泥总氮变化量呈现轻微降低趋势,中高浓度富营养化水体底泥总氮变化量呈现轻微上升趋势。如生长后期试验,低浓度富营养化水体底泥变化量为 $(-9.33 \pm 5.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,中高浓度硝态氮富营养化

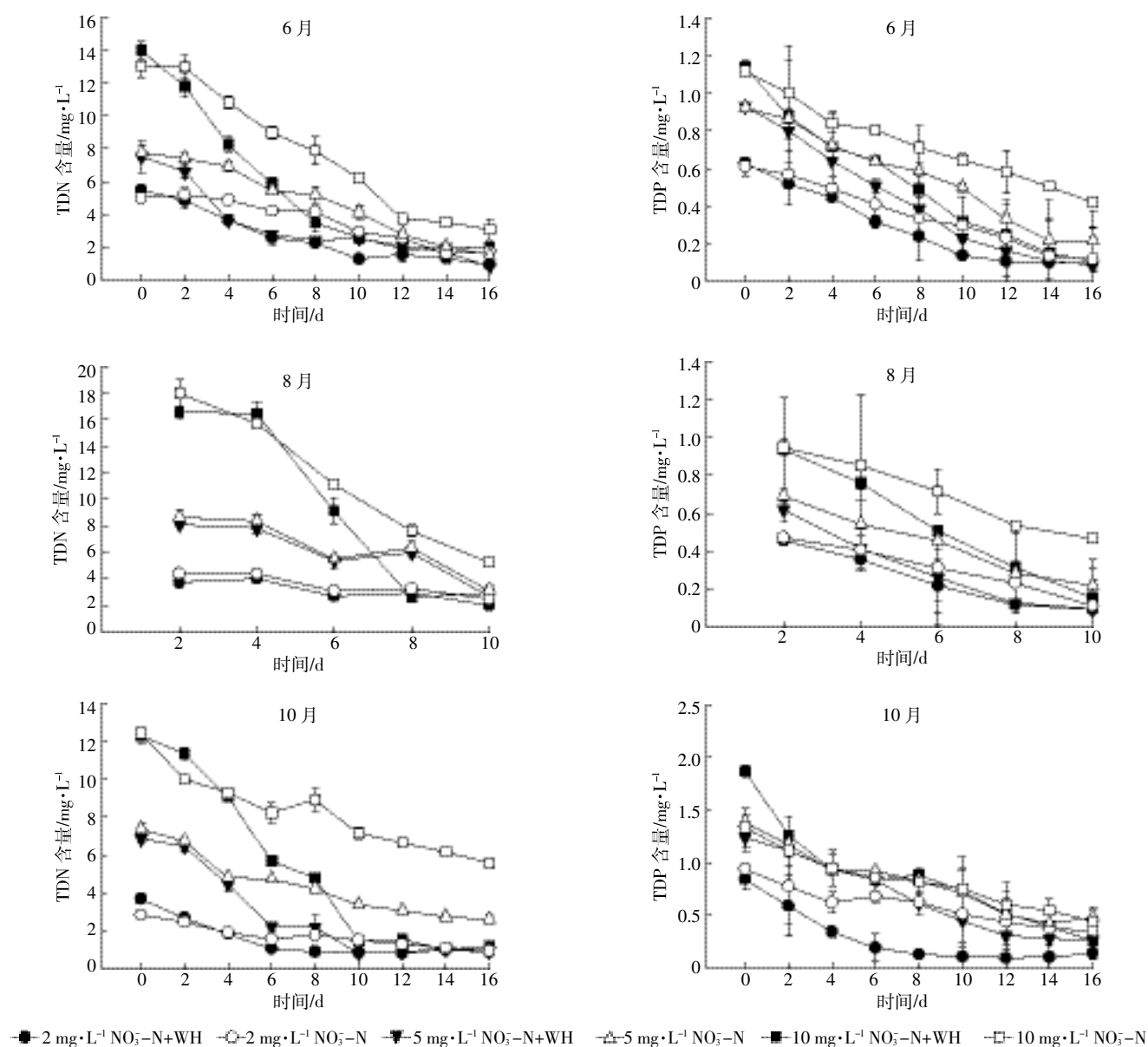


图 2 种植与未种植不同生长阶段凤眼莲的不同浓度富营养化水体 TDN、TDP 随培养时间变化规律

Figure 2 Changes of TDN and TDP concentrations in water containing different initial concentrations of nutrients with or without growth of *Eichhornia crassipes* at different growth stages

水体底泥总氮变化量为 (42.16 ± 4.11) 、 (58.69 ± 2.54) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。未种植凤眼莲不同浓度富营养化对照水体底泥总磷变化量均呈现细微升高趋势,如10月份底泥总磷变化量分别为 (3.25 ± 1.11) 、 (10.36 ± 6.13) 、 (4.16 ± 1.18) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

种植不同生长阶段凤眼莲不同浓度富营养化水体底泥总氮、总磷变化量均呈现出下降趋势,如生长后期试验,不同浓度富营养化水体底泥总氮变化量分别为 (-93.25 ± 8.45) 、 (-86.39 ± 3.34) 、 (-119.78 ± 9.57) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,底泥总磷变化量分别为 (-58.69 ± 6.75) 、 (-60.33 ± 10.36) 、 (-55.31 ± 6.15) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。种植凤眼莲不同浓度富营养化水体底泥总氮、总磷变化量均极显著($P < 0.01$)低于相应未种植凤眼莲底泥总氮、总磷变化量。

2.4 不同生长阶段凤眼莲对水体营养盐吸收及对消减水体氮磷的贡献

不同生长阶段凤眼莲吸收作用对不同浓度富营养化水体氮、磷净化效果的贡献见表2和表3。凤眼莲对不同浓度富营养化水体TDN、TDP吸收量均随着水体初始氮浓度增加呈现升高趋势。但凤眼莲吸收氮量占不同程度富营养化水体TDN损失量比率却呈下降趋势,如生长后期,低、中、高浓度富营养化水体凤眼莲吸收氮量占水体氮损失量百分比分别为 $86.5\% \pm 2.6\%$ 、 $52.7\% \pm 2.1\%$ 、 $44.2\% \pm 1.7\%$ 。在高浓度富营养化水体中,三个生长阶段凤眼莲吸收作用对消减水体氮贡献无显著差异;在中等浓度富营养化水体中,凤眼莲吸收氮量占水体氮损失量百分比为生

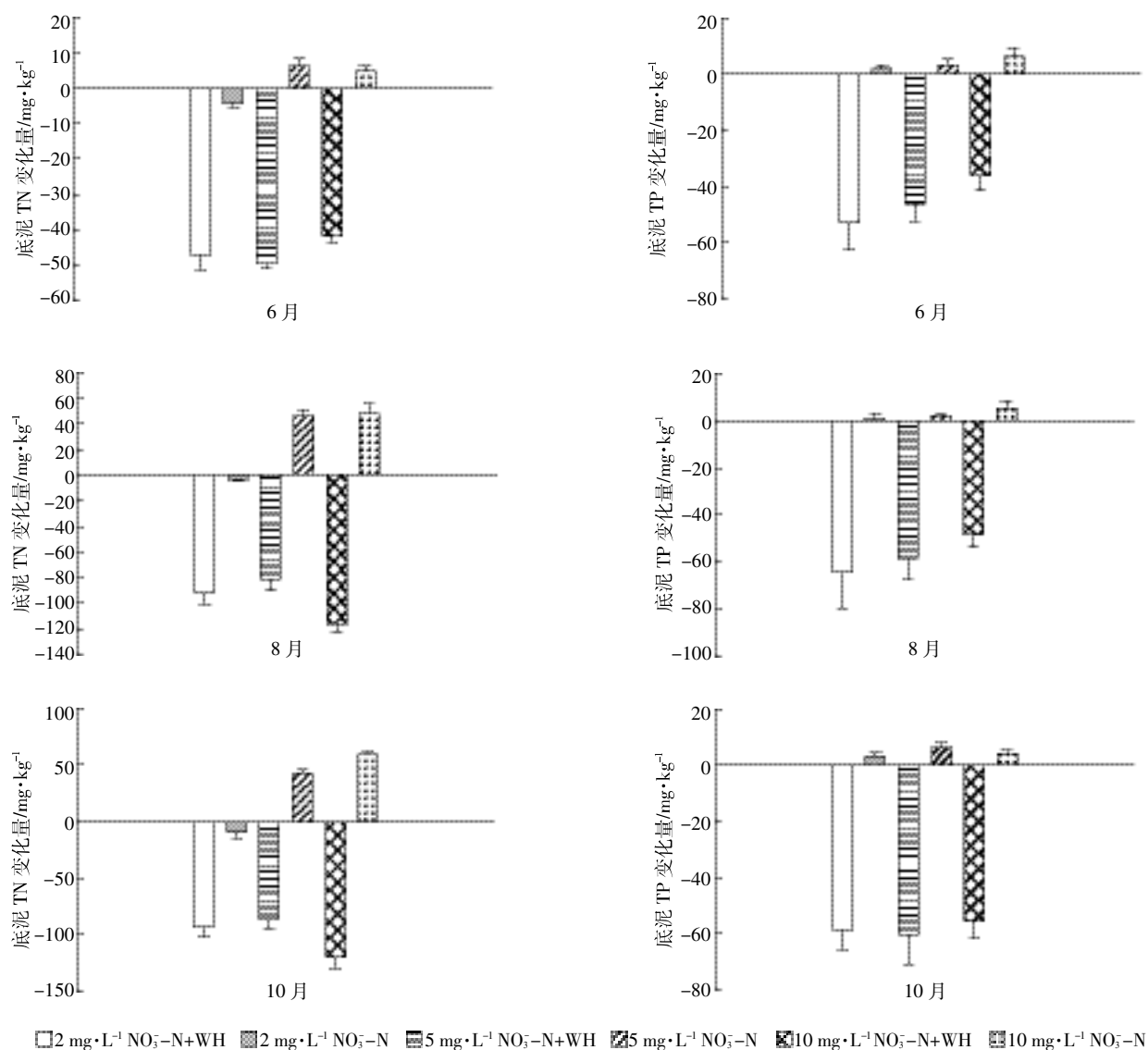


图3 不同阶段底泥总氮、总磷含量变化

Figure 3 Changes of TN and TP in sediments after growth of *Eichhornia crassipes* at different growth stages

表 2 不同生长阶段植物吸收对消减水体氮贡献

Table 2 Contribution of plant uptake to N removal from water at different stages of plant growth

实验 阶段	处 理	水体 TDN 损失量/mg	植物吸收 N	
			吸收 N 量/mg	占水体氮消减量比例/%
6 月	I	1 369.9±118.6	1 191.1±108.9	87.1±6.7
	Ⅲ	1 999.5±270.7	1 418.1±185.2	71.0±2.4
	V	2 801.3±96.4	1 215.1±63.7	43.4±1.9
8 月	I	522.7±19.9	761.6±61.8	145.6±6.3
	Ⅲ	1 834.7±40.7	1 171.1±29.7	63.9±2.8
	V	4 084.8±361.8	2 207.7±437.1	54.0±8.5
10 月	I	838.2±30.4	725.1±41.4	86.5±2.6
	Ⅲ	1 779.4±52.4	938.4±58.3	52.7±2.1
	V	3 151.2±46.9	1 391.9±201.3	44.2±1.7

注:处理 I : $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N+WH}$;处理 Ⅲ : $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N+WH}$;处理 V : $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- \text{--N+WH}$ 。下同。

表 3 不同生长阶段植物吸收对消减水体磷贡献

Table 3 Contribution of plant uptake to P removal from water at different stages of plant growth

实验 阶段	处 理	水体 TDP 损失量/mg	植物吸收 P	
			吸收 P 量/mg	占水体磷消减量比例/%
6 月	I	159.2±3.9	170.7±18.0	107.2±4.6
	Ⅲ	252.8±2.5	257.0±16.4	101.7±6.6
	V	309.6±10.2	286.8±20.4	92.6±2.0
8 月	I	109.0±8.8	131.1±1.7	120.0±1.9
	Ⅲ	157.0±18.6	128.7±14.7	82.1±7.9
	V	234.3±2.6	221.6±1.2	94.6±1.9
10 月	I	211.7±18.8	290.9±8.8	138.5±14.4
	Ⅲ	291.6±39.2	358.1±34.2	125.3±28.2
	V	483.8±19.2	428.4±26.0	88.6±6.1

长后期<生长中期<生长初期。凤眼莲对不同浓度富营养化水体磷去除均表现出较高吸收效率,在低、中浓度磷浓度水平下,凤眼莲对磷吸收量高出水体 TDP 损失量,如生长后期凤眼莲吸收磷量占水体损失可溶性磷量分别为 $138.5\% \pm 14.4\%$ 、 $125.3\% \pm 28.2\%$;在高浓度磷含量下,凤眼莲对水体磷吸收量占水体 TDP 去除量也超过了 90%。三个生长阶段凤眼莲吸收作用对消减水体磷的贡献无显著差异。

3 讨论

鉴于凤眼莲的表型特征,其通过根系可直接吸收上覆水体中的氮、磷,从而快速去除上覆水体中的营养盐,通过收获植株,可将营养盐从水体中移除^[14-15],改善水质效果迅速。本实验发现不同生长阶段凤眼莲

吸收作用在净化不同浓度富营养水体氮的效率和贡献方面存在一定差异。在净化中、高浓度富营养化水体时,生长初期的凤眼莲对水体 TDN 在前期(4 d)的净化效率明显高于生长后期,而生长中期净化效率最慢,但 6 d 后各生长阶段凤眼莲净化速率趋于一致。因为模拟实验是静态耗竭实验,无外源营养盐的持续供应,所以前期不同氮浓度处理下不同生长阶段植物表现出净化效率与效果的显著差异,且在中等浓度富营养化水体中,凤眼莲吸收氮量占水体氮损失量百分比为生长后期<生长中期<生长初期。综合分析说明生长初期凤眼莲通过主动吸收净化高浓度富营养化水体氮的效率最高。在生长初期,温度适宜的情况下,凤眼莲维持生长需要主动吸收大量氮、磷营养物质,且该时期植物根系不发达,通过凤眼莲根系调节的生物脱氮途径,如硝化、反硝化脱氮,理论上较弱^[16],所以通过主动吸收去除上覆水体中的氮占水体总氮去除量的比例较高。近期研究结果表明,种植凤眼莲的富营养化水体反硝化脱氮可占水体氮去除总量的 25%~63%^[17]。

凤眼莲庞大的根系可以为硝化、反硝化微生物提供繁殖生长根际微域环境;凤眼莲可以通过根系向水体中分泌氧气和有机碳;其茎叶覆盖水面限制大气复氧及根系丰富的微生物活动强烈消耗氧气,这些都为生物硝化、反硝化过程提供了好氧-厌氧交替的良好根际微域环境,从而促进水体的生物脱氮作用^[18-19]。许多研究显示,在低负荷氮、磷含量水生系统中,水生植物对氮、磷的去除起主要作用^[20],而在高氮、磷负荷的系统中,虽然植物吸收量增加,但是其吸收量占水体损失量比例却是降低趋势^[21-22]。这与本实验结果一致,即随着初始氮浓度增加,虽然不同生长阶段凤眼莲吸收氮量呈现出增加趋势,但吸收量占水体 TDN 损失量却呈现出下降趋势;这也间接证明了富营养化水体中氮的净化途径除了水生植物吸收外,通过植物调节的生物脱氮作用随浓度的升高占水体中氮损失的比例增高。结合富营养化水体治理中种植凤眼莲的管理措施思考,在凤眼莲的生长初期,其生长速度快、吸收氮磷效率高,应增大凤眼莲种苗的用量,在控制性种植的前提下给予足够的繁殖空间,控制性种植区域内植株个体出现拥挤时,应及时收获部分凤眼莲,通过控制生物量为植物快速生长创造优良条件,将植物吸收作用发挥到极限;在凤眼莲的生长后期,凤眼莲吸收氮磷速率下降,吸收氮磷量占水体损失量比例呈现降低趋势,该阶段可考虑通过调节系统中的微生物

物脱氮过程,提高反硝化脱氮释放 N_2 过程,提升系统内氮、磷去除总量。

在模拟实验条件下,种植凤眼莲的富营养化水体 DO 含量相较于对照水体降低幅度较大。一方面,水生植物凤眼莲根系可以为微生物提供适宜生长环境,从而使水体中微生物、菌类含量上升,微生物及菌类活动消耗水体溶氧值^[23];另一方面,凤眼莲增长方式属分蘖生殖,可以很快覆盖住水体表面。本实验中,水体表面完全被凤眼莲所覆盖,降低了水体与空气接触面积,降低了水体复氧能力^[24],从而导致水体 DO 降低。但在湖泊、河流等大面积开放水体中,对凤眼莲实行控制性种养对整个水体生态系统 DO 的影响不大^[25]。

导致种植凤眼莲水体 pH 降低原因是由于凤眼莲覆盖了水体表面导致水体可以利用光能减少,水体初级生产者如藻类、浮游植物等生长受到抑制,水体光合生产能力降低,因此水体产生 CO_2 无法通过光合作用被吸收转化,原敞开水体碳酸盐、重碳酸盐及氢离子之间平衡被打破,水体氢离子浓度增加^[26]。种植凤眼莲条件下特有的 DO-pH 耦合条件(低溶解氧、pH 中性),为生物脱氮提供了良好的环境条件。

本实验发现凤眼莲不仅能够快速去除上覆水体中的磷,而且能够吸收底泥中的磷。前期研究通过原位采集滇池柱状底泥,探讨凤眼莲对富营养湖泊底泥氮磷营养盐释放的影响,在 25 d 的室内静态模拟实验中,根据上覆水营养盐浓度、凤眼莲植株吸收营养盐总量,推算底泥氮磷营养盐释放的平均速率,表明凤眼莲加速了滇池底泥氮、磷营养盐的释放速率,处理组氮、磷释放速率分别为对照组的 5.3~170.2 倍和 1.5~21.6 倍。底泥在水体中可以起到平衡养分作用,当水体营养元素含量高时,底泥可以吸附水体营养元素;当水体营养元素含量低时,底泥可以向水体释放营养元素,进行平衡^[27-28]。在种养凤眼莲富营养化水体中,试验后期水体氮、磷含量明显下降,植物为维持本身生长,促进底泥向水体释放一定量氮、磷(图 3),从而凤眼莲可以吸收去除底泥中的磷。本研究结果发现种养凤眼莲富营养化水体中,底泥总磷含量均显著地降低,这也证明了凤眼莲可通过吸收作用去除底泥中的磷。

4 结论

不同生长阶段凤眼莲吸收作用在净化不同浓度氮的效率和贡献方面存在一定差异。随着初始氮浓度

增加,不同生长阶段凤眼莲吸收氮量呈现增加趋势,但吸收量占水体 TDN 损失量却呈现明显下降趋势。在净化中、高浓度水体氮时,生长初期的凤眼莲对水体 TDN 在前期的净化效率明显高于生长后期,而生长中期净化效率最慢。在中等氮浓度水体中,凤眼莲吸收氮量占上覆水体 TDN 去除量百分比为生长后期<生长中期<生长初期。综合分析说明生长初期凤眼莲通过主动吸收净化高浓度水体氮的效率最高,而通过凤眼莲根系调节的生物脱氮途径理论上较弱。凤眼莲不仅能够快速去除上覆水体中的磷,而且能够吸收底泥中的磷,种植凤眼莲水体中底泥总磷含量均显著地降低。三个生长阶段凤眼莲吸收作用对消减水体磷的贡献无显著差异。

参考文献:

- [1] 周小平, 徐晓峰, 王建国, 等. 3 种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 102-104.
ZHOU Xiao-ping, XU Xiao-feng, WANG Jian-guo, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance by three planted floats in eutrophic water bodies in winter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 102-104.
- [2] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447-1450.
TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1447-1450.
- [3] Wiluan J J. The role of water plant in water treatment[J]. *Agricultural Engeneering*, 1986, 57(6): 9-10.
- [4] Babourina O, Rengel Z. Nitrogen removal from eutrophicated water by aquatic plants[M]//Ansari A A (eds.). *Eutrophication: Causes, Consequences and Controls*. Springer Science, 2011: 355-372.
- [5] El-Gendy A. Leachate treatment using natural systems[D]. Windsor: University of Windsor, 2003.
- [6] Villamagna A M, Murphy B R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review[J]. *Fresh-water Biology*, 2009, 55(2): 282-298.
- [7] 朱夕珍, 肖乡, 刘怡, 等. 植物在城市生活污水人工土快滤处理床的作用[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 582-584.
ZHU Xi-zhen, XIAO Xiang, LIU Yi, et al. Role of plants in a rapid infiltration filter made of artificial soil for treating municipal sewage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 582-584.
- [8] 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.
- [9] 刘利华, 郭雪艳, 达良俊, 等. 不同富营养化水平对挺水植物生长及氮磷吸收能力的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(6): 39-45.

- LIU Li-hua, GUO Xue-yan, DA Liang-jun, et al. Effects of different levels of eutrophication on the emergent aquatic plant growth and the nitrogen and phosphorus absorption abilities[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Sciences)*, 2012(6):39-45.
- [10] 左奇丽, 李子燕, 杨晓玲, 等. 沉水植物对水中氮、磷的去除效果[J]. 化工进展, 2012, 31(1):217-221.
- ZUO Qi-li, LI Zi-yan, YANG Xiao-ling, et al. Removals of nitrogen and phosphorus in the water by submerged hydrophytes[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(1):217-221.
- [11] 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 plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8):1718-1723.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Environmental Protection Agency of National. The monitoring and analytical methods for water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry[M]. 3th ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] Mehner T, Arlinghaus R, Berg S, et al. How to link biomanipulation and sustainable fisheries management: A step-by-step guideline for lakes of the European temperate zone[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2004, 11(3-4):261-275.
- [15] Fox L J, Struik P C, Appleton B L, et al. Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 194(1-4):199-207.
- [16] Sooknah R. A review of the mechanisms of pollutant removal in water hyacinth systems[J]. *Science and Technology*, 2000, 6:49-57.
- [17] Gao Y, Yi N, WANG Y, et al. Effect of *Eichhornia crassipes* on production of N_2 by denitrification in eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 68:14-24.
- [18] Korner S. Nitrifying and denitrifying bacteria in epiphytic communities of submerged macrophytes in a treated sewage channel[J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1999, 27(1):27-31.
- [19] Hamersley M R, Brian L H. Control of denitrification in a septage-treating artificial wetland: The dual role of particulate organic carbon[J]. *Water Research*, 2002, 36(17):4415-4427.
- [20] DeBusk T A, Peterson J E, Reddy K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters[J]. *Ecological Engineering*, 1995, 5(2):371-390.
- [21] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants[J]. *Research Journal of the Water Pollution*, 1991, 63(7):934-941.
- [22] Greler G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: Summary of long term scientific practical and experiences recommendations[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5):157-166.
- [23] Meerhoff M, Mazzeo N, Moss B, et al. The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake[J]. *Aquatic Ecology*, 2003, 37(4):377-391.
- [24] Hunt R J, Christiansen I H. Understanding dissolved oxygen in streams [M]. Information Kit. Townsville: CRC Sugar Technical Publication (CRC Sustainable Sugar Production), 2000.
- [25] Wang Z, Xiao B D, Wu X Q, et al. Linear alkylbenzene sulfonate(LAS) in water of Lake Dianchi-spatial and seasonal variation, and kinetics of biodegradation[J]. *Environmental Monitor and Assessment*, 2010, 171(1-4):501-512.
- [26] 李为, 刘丽萍, 曹龙, 等. 碳酸盐生物沉积作用的研究现状与进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(6):597-605.
- LI Wei, LIU Li-ping, CAO Long, et al. Research status and prospect of biological precipitation of carbonate[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6):597-605.
- [27] 吴俊峰, 谢飞, 陈丽娜, 等. 太湖重污染湖区底泥沉积物特性[J]. 水资源保护, 2011, 27(4):74-77.
- WU Jun-feng, XIE Fei, CHEN Li-na, et al. Characteristics of bottom sediment in heavily polluted area of Taihu Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(4):74-77.
- [28] 王智, 王岩, 张志勇, 等. 水葫芦对滇池底泥氮磷营养盐释放的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12):4339-4344.
- WANG Zhi, WANG Yan, ZHANG Zhi-yong, et al. Effect of water hyacinth on release of nitrogen and phosphorus from sediment of Lake Dianchi[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(12):4339-4344.