

太湖地区高效除氮浮萍品种的筛选及其除氮机理的初步研究^①

周影茹^{1,2}, 袁晓燕², 王俊儒¹, 包涛芳³, 施卫明^{2*}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

3 宜兴市水利局, 江苏宜兴 214200)

摘 要: 农业面源污染是引起太湖水体富营养化的重要因素, 而植物生态工程技术在面源污染的治理中起到了很大的作用。本文调查和收集了太湖地区 13 个稻田浮萍种质资源, 研究了不同浮萍品种对低浓度稻田排水中氮(N)素的去除效果及其初步除N机理。结果表明, 在实验营养条件下, 4 种浮萍品种中紫背浮萍(*Spirodela polyrrhiza*)具有最高的N去除效率, 其次是少根紫萍(*Spirodela oligorrhiza*)或稀脉浮萍(*Lemna perpusilla*), 而除N效果最低的品种是青萍(*Lemna minor*)。供试材料对水体中总N的去除率范围为 57.3%~85.2%, 其中紫背浮萍HZ1 具有最高的去除效果, 15 天后总N去除率可达到 85%, 青萍WX3 去除效果最低, 15 天后去除率仅为 57%。两个浮萍品种进行比较发现, HZ1 生物量增长速度慢, 鲜重和干重平均倍增时间分别为 7.96 天和 7.82 天, 而WX3 的鲜重和干重倍增时间分别为 5.20 天和 4.73 天。另一方面, HZ1 和WX3 的含N量分别为 4.9% 和 5.7%。由此可以推知, 紫背浮萍HZ1 高效除N的主要机理不是通过生物体吸收, 而更可能是微生物或化学作用共同引起。

关键词: 水体富营养化; 稻田排水; 浮萍; 除氮途径; 生物吸收

中图分类号: X52

太湖是我国的第三大淡水湖, 流域内城市化水平居全国之首, 乡镇工业发达, 粮食产量占全国的 3%, 是我国重要的商品粮基地^[1], 但自 20 世纪 80 年代起, 随着农业生产中施肥量的增加^[2-3], 太湖水体富营养化现象加重^[4], 导致蓝藻频繁爆发, 对当地生产生活产生极为严重的影响。据有关专家分析, 太湖水体富营养化的主要原因便是农业面源污染, 水体中总N的 60% 和总P的 30% 均来自于农田排水中的N、P物质^[5]。

由于面源污染比较分散而且难以定点监测, 因此很难用工业污水的净化方法来治理^[6-8], 而需要寻求一种更加简易, 适合农村地区特点且经济有效的治理方法。利用水生植物来净化N、P污水是一种值得推广的处理技术^[9-12]。但大型水生植物容易过度繁殖, 阻塞河道, 且不易收割, 残体腐烂在河道中又会将体内吸收的N、P物质释放到水体中, 产生二次污染^[13]。

浮萍科植物是一种小型浮叶植物, 可快速吸收转化水体中的N元素并耐受多种污水条件^[14-15], 且具有

特点, 因此近年来被广泛用于N、P污水的生态净化处理^[16]。对于浮萍科植物的除N机理及根和叶在吸收营养物质过程中的作用, 不同学者也曾提出不同的观点^[17-18]。但是之前的研究多集中在以下方面: ①浮萍生长最佳条件的确定^[18-21]; ②浮萍塘的除N途径或N素转移模型^[22-23]; ③浮萍稳定塘的工程设计^[23-24]。

稻田排水具有水位浅, 溶解氧高, 污染浓度较低但变幅大, 且以N、P等无机污染为主的特点, 浮萍作为低等植物, 对N、P营养的适应范围广, 因此, 可能比较适用于稻田低浓度排水的N、P净化处理。但是, 用浮萍来处理低浓度稻田排水的研究甚少, 其部分原因是由于对适合作去除稻田排水中N、P的浮萍品种不甚了解。对此, 本文首先对环太湖地区的浮萍种质资源进行了初步调查, 并设计模拟实验, 研究了采集到的 4 类浮萍品种对低浓度稻田排水中铵态氮(NH₄-N), 硝态氮(NO₃-N), 总氮(TN)的去除效果, 筛选出适合太湖流域稻田排水净化处理的浮萍

①基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目(30821140542)和国家科技支撑计划课题项目(2006BAD17B03)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 周影茹(1985—), 女, 陕西户县人, 硕士研究生, 主要从事面源污染控制方面的研究。E-mail: zhouyingru1985@163.com

生长快, 易收割, 蛋白质含量高, 后期利用价值好的 优势品种, 并对其除 N 机理作初步分析, 为进一步研

究利用浮萍科植物来净化污染水体中的 N 素提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料的准备

2008 年 10 月在环太湖地区的无锡、苏州、湖州和宜兴采样, 采样点的GPS定位经纬度范围在 119°41' ~ 120°46'E, 30°16' ~ 31°31'N。采集水体浮萍的同时, 用塑料瓶进行水样采集, 依据每个采样点浮萍密度和多样性, 各设 3 ~ 5 个重复, 之后带回实验室用

Steinberg培养液^[25]驯化培养 2 周, 待其生物量扩大后挑选健康植株, 经自来水清洗除去污垢和杂质后使用。

1.2 实验水质状况

对采集到的浮萍原生境稻田排水的水质进行分析, 测定其 N、P 和 COD 含量后, 对驯化浮萍使用的 Steinberg 培养液进行修正, 使其 N、P 含量状况与浮萍原生长条件下稻田排水状况相近用以进行后续实验。修正后的培养液水质状况如表 1 所示。

表 1 供试培养液水质状况

Table 1 Chemical characters of nutrient solution used in experiments

pH	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD (mg/L)
6.8	3.2	11.7	15	0.4	70

1.3 实验方法

1.3.1 优势浮萍的筛选 实验于 2009 年 2 月开始。取有效容积为 2.5 L 的塑料桶(直径 10 cm, 高 12 cm), 装修正后的Steinberg培养液体积 2 L, 每桶植入用蒸馏水冲洗干净的浮萍, 按表面覆盖率 50% 投放进行培养。筛选培养条件为: 昼/夜温度为 26℃/10℃, 湿度 65%, 白炽灯照明, 光照时间/黑暗时间为 16 h/8 h。

为保证植物共生微生物的活性, 实验过程中加入了土壤浸提液。具体操作步骤如下: 在宜兴水稻试验田中, 随机取表层土壤(0 ~ 10 cm), 风干研磨后以 40 目网筛过筛, 取土 1000 g, 加入 2 L 蒸馏水, 20℃ 下在摇床上振荡 60 min (80 r/min), 过滤 2 次得到母液; 然后稀释成 1/10 浓度的土壤浸提液。实验中每个处理添加 1/10 土壤浸提液 1 ml。

实验设置 1 个空白对照, 浮萍植株按产地和形态分类共计 13 个处理, 每个处理 3 次重复。每 3 ~ 4 天取 10 ml 水样, 进行 NO₃-N、NH₄-N 和 TN 的测定。采样后补充相同体积的蒸馏水至培养塑料桶中。实验过程中每天用蒸馏水添至刻度以弥补由于蒸腾和蒸发丧失的水分。实验持续 15 天。

筛选实验共进行了 2 次以验证其生物学实验的再现性。

1.3.2 除N机理的初步研究 实验于2009年6月开始。采用筛选实验中得到的除N效果最高和最低的 2 种浮萍作为实验材料。取装有 2 L 修正的Steinberg培养液的塑料桶, 每桶植入浮萍叶状体 30 ~ 50 个(其初始覆盖表面积分别为 2.92 cm² ± 0.36 cm² 和 2.50 cm² ±

0.22 cm²), 并添加 1 ml 土壤微生物浸提液后进行培养, 每天用蒸馏水添至刻度以弥补由于蒸腾和蒸发丧失的水分。实验同时设置 1 个空白对照, 每组 3 次重复。实验中每 3 天采集 10 ml 水样分析其 pH、NO₃-N、NH₄-N 和 TN 含量, 收获浮萍样品称取鲜重和干重, 测量叶表面积。消化浮萍样品, 测定植株含 N 量。实验过程持续 22 天。

1.4 测定方法

1.4.1 水样的测定 pH 采用电位法; NO₃-N 采用紫外分光光度法; NH₄-N 采用靛酚蓝法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法^[26]。

1.4.2 浮萍植物样品的测定 鲜重称量: 用镊子将浮萍从培养液中捞起, 滤去自由水, 并用去离子水清洗 3 次, 将待测浮萍平铺放在吸水卫生纸上, 吸水 1 min 后, 立即用精度 0.001 g 的电子天平进行测定以防植物体脱水。

干重称量: 将吸干水分的浮萍样品于 50 ~ 60℃ 烘箱中烘约 3 ~ 4 h 后将烘箱温度调至 105℃ 烘干至恒重后称量。

叶表面积: 使浮萍无重叠的浮在水面, 用根系分析仪 (WinRHIZO Regent, 加拿大) 进行分析, 精确度为 0.01 cm²。

浮萍含 N 量的测量: 浮萍植物样品经过浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消化后, 用凯氏定氮仪 (Buchi B-339, 瑞士) 测定植物体含 N 量。

1.4.3 数据处理和统计分析方法 营养元素的去除率 (removal efficiency, RE) 计算公式:

$$RE = (C_0 - C_t)/C_0$$

(1)

式中, C_0 为初始时刻营养元素浓度 (mg/L), C_t 为 t 时刻营养元素浓度 (mg/L)。

浮萍相对生长率 (relative growth rate, RGR) 的计算公式:

$$RGR = (\ln N_t - \ln N_0)/t$$

(2)

式中, N_0 为初始时刻浮萍生物量 (mg), N_t 为 t 时刻浮萍生物量 (mg), t 为种群增长时间 (d)。

浮萍生物量倍增时间 t_2 的计算公式公式:

$$t_2 = \ln 2 / RGR$$

(3)

实验体系 N 平衡 (balance of nitrogen) 的计算公式:

$$N_{\text{输入}} = N_{\text{吸收}} + N_{\text{未知途径去除}} + N_{\text{残留}}$$

(4)

式中, $N_{\text{输入}}$ 为输入的总N量 (mg), $N_{\text{吸收}}$ 为浮萍吸收的N素量 (mg), $N_{\text{未知途径去除}}$ 为未知因素去除的N素量

(mg), $N_{\text{残留}}$ 为残留在水体中的总N量 (mg)。

实验数据用 Excel2003 和 SPSS17.0 软件进行数理统计分析, 并用 Duncan 检验进行多重比较 ($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 太湖流域浮萍种质资源的调查和鉴定

通过对采集到的浮萍品种根据《中国植物志》^[27]和《江苏植物志》^[15]鉴定浮萍种属分类, 进行分离鉴定后共得到 5 种浮萍科植物。其中紫背浮萍在无锡、苏州、湖州和宜兴均有采集到; 稀脉浮萍在苏州、湖州和宜兴采集到; 青萍和少根紫萍在无锡、湖州和宜兴采集到。除此之外还在无锡和苏州采集到无根萍WX4和SZ4, 但由于其个体细如微砂, 不易操作, 且培养过程中易于被藻类污染, 产生较大的误差, 故后续实验中未使用其作为筛选材料。

采集得到的浮萍种类和产地如表 2 所示。

表 2 环太湖地区采集到的浮萍形态特征及鉴定

Table 2 Principal morphology and identification of duckweed collected in the TaiHu Lake area

样品编号	采集地	形态特征	鉴定结果
WX1	无锡	叶状体倒卵形, 长 5~8 mm, 宽 3~4 mm, 具有 5~11	紫背浮萍 (<i>Spirodela polyrrhiza</i>)
SZ1	苏州	条叶脉, 3~6 叶聚生, 叶背呈紫色, 植物体 8~10 根,	
HZ1	湖州	成束	
YX1	宜兴		
SZ2	苏州	叶状体扁平, 两面均绿色, 长 3~5 mm, 宽 2~4 mm,	稀脉浮萍 (<i>Lemna perpusilla</i>)
HZ2	湖州	根 1 条, 叶状体不对称, 斜倒卵状长圆形	
YX2	宜兴		
WX3	无锡	叶状体对称, 长 2~4 mm, 宽 2~3 mm, 植物体 1 根,	青萍 (<i>Lemna minor</i>)
HZ3	湖州	两面均绿色, 具有不明显的 3 脉	
YX3	宜兴		
WX5	无锡	叶状体椭圆形, 长 4~6 mm, 宽 1~3 mm, 3~5 叶聚	少根紫萍 (<i>Spirodela oligorrhiza</i>)
HZ5	湖州	生, 背紫色, 植物体 3~5 根	
YX5	宜兴		

2.2 优势浮萍品种的筛选

从表 3 可以看出, 对照空白 (CK) 在实验期间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率只有 4.7%, 而有浮萍放养的所有处理中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率变化在 31.4%~71.8% 之间, 均明显高于空白对照, 说明在该实验体系中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除主要依赖于浮萍的作用。保证表面覆盖率为 50% 情况下处理 15 天后, 来自不同地区的各浮萍品种对培养液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 的去除率存在较大差异。就浮萍种类来

看, 各个地区 N 去除效率从大到小依次是紫背浮萍>少根紫萍或稀脉浮萍>青萍。其中, HZ1 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除效果最好, 可达到 71.8%, 其次为 YX1 可达到 71.5%, 而去除效果最差的 WX3 只有 31.4%。

浮萍对培养液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效率都很高, 达到 85% 以上。不同产地来源的浮萍品种对培养液中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率差异不大。这主要是因为浮萍是喜铵植物, 当 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 同时存在时, 浮萍优先利用

$\text{NH}_4\text{-N}$ 作为N源^[28]。因此，在覆盖率 50% 的生物量投入条件下，在 3~5 天培养时间之内 $\text{NH}_4\text{-N}$ 被迅速吸收利用，溶液中浓度已经很低；当实验进行到 15 天时，

各种来源的浮萍处理对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率几乎没有

表 3 处理 15 天后不同浮萍品种对 $\text{NO}_3\text{-N}$ (A)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (B) 和TN (C) 的去除率 (%)

Table 3 Removal efficiencies of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ and TN of different duckweed species after 15d treatment

浮萍品种处理	$\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率	$\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率	TN 去除率
WX1	44.5 ± 10 ab	99.1 ± 1.4 a	67.8 ± 6 abcde
WX3	31.4 ± 6.6 b	99.4 ± 0.8 a	57.3 ± 1 cde
WX5	40.6 ± 6.6 b	99.8 ± 0.4 a	62.0 ± 4.3 bcde
SZ1	52.4 ± 5.4 ab	99.4 ± 0.8 a	75.0 ± 8.7 abc
SZ2	53.3 ± 3.7 ab	98.1 ± 2.9 a	68.9 ± 10.7 abcde
HZ1	71.8 ± 12.6 a	98.8 ± 1.1 a	85.2 ± 8.6 a
HZ2	45.1 ± 5 ab	99.1 ± 1.6 a	65.6 ± 9.7 bcde
HZ3	43.1 ± 3.5 b	98.6 ± 1.3 a	62.0 ± 7.9 bcde
HZ5	58.9 ± 8.8 ab	98.9 ± 1.5 a	74.2 ± 14.6 abcd
YX1	71.5 ± 7.6 a	98.4 ± 2.8 a	78.6 ± 13.8 ab
YX2	42.7 ± 9.9 b	99.8 ± 0.3 a	62.3 ± 9.8 bcde
YX3	38.2 ± 6.1 b	98.5 ± 0.9 a	59.6 ± 7.5 de
YX5	31.8 ± 5.2 b	98.7 ± 1.7 a	58.9 ± 0.9 e
CK	4.7 ± 2.3 c	29.9 ± 2.5 b	34.1 ± 7.3 f

注：同一列英文字母相同表示无显著性差异，字母不同表示差异达到 $p < 0.05$ 的显著水平。

差异，均在 98% 以上。

此外，空白对照中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率达到 29.9%，远高于对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的 4.7% 去除率，其原因可能是因为根周围微区好氧环境的硝化细菌会将 $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，增大了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率。另一方面，因为空白对照没有浮萍的覆盖，透光率较高，有少量藻类生长，这也可能导致了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 被吸收利用以及藻类生长导致的 NH_3 挥发，从而提高了空白对照的去除率。

TN的去除率与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率几乎一致，HZ1 去除率最高，达到 85.2%，其次的YX1 为 78.6%，WX3 则最低，仅为 57.3%。实验中使用的培养液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量占到TN的 78%，因此 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率的增加会对TN的去除率产生较大影响。HZ1 和YX1 都是紫背浮萍，紫背浮萍在浮萍科植物中有着最大的叶片面积和聚生叶片数，并且植物有数条根，一般可达到 8~12 根^[29]，浮游植物根和叶在营养物质的吸收过程中都有着很大的作用^[17, 30]，因此其生物学特性可能对其除N作用有着重要的影响。

在空白对照处理中，TN的去除率达到 34.1%，几乎为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 对照处理之和，说明实验体系中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 及有机N含量极微，不会对实验结果产生较大的

影响。具体的脱N途径有待进一步研究。

此实验进行了两次，其结果基本一致，因此可以得出结论，即在本实验水质状况下，HZ1 为除N高效品种，WX3 为除N低效品种。并且由于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 对TN的贡献不大，各品种之间去除效率无显著差异，可以认为，HZ1 和WX3 对N去除的差异主要是由对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除引起的，种云霄等^[31]曾经研究认为，水体中硝酸盐的存在可以提高紫背浮萍对高铵的耐受性，因此研究浮萍对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除机理具有极其重要的作用。

2.3 优势浮萍品种除氮机理的初步研究

在初始叶片覆盖面积分别为 $2.92 \text{ cm}^2 \pm 0.36 \text{ cm}^2$ (HZ1) 和 $2.50 \text{ cm}^2 \pm 0.22 \text{ cm}^2$ (WX3) 的情况下，经过 22 天的实验处理，两种浮萍都形成了一定规模的种群。采用鲜重、干重和叶表面积 3 个指标来同时绘制浮萍生长曲线，见图 1。从图 1 中可以看出，无论鲜重、干重还是叶面积指标，WX3 生长速度均大于HZ1。由于青萍WX3 生物个体小于紫背浮萍HZ1，繁殖较快，所以生物量增长快，而且到培养后期，其增殖速率呈指数增长，越来越快；而HZ1 则在前 8 天内的增殖速率与WX3 接近，10 天后其增殖速率开始趋缓。两种浮萍的生长状况如表 4 所示。在修正的

Steinberg培养液中, HZ1 和WX3 的鲜重相对生长速率RGR分别为 0.09 和 0.13, 鲜重倍增时间 t_2 分别为 7.96 天和 5.20 天(表 4)。陈晓^[32]也曾经做过类似的研究, 并且得出的结论趋势基本一致, 即紫背浮萍的增长速

率小于青萍, 鲜重倍增时间 t_2 分别是 4.44 天和 2.68 天。但是她的研究采用的是完全培养液, 营养元素含

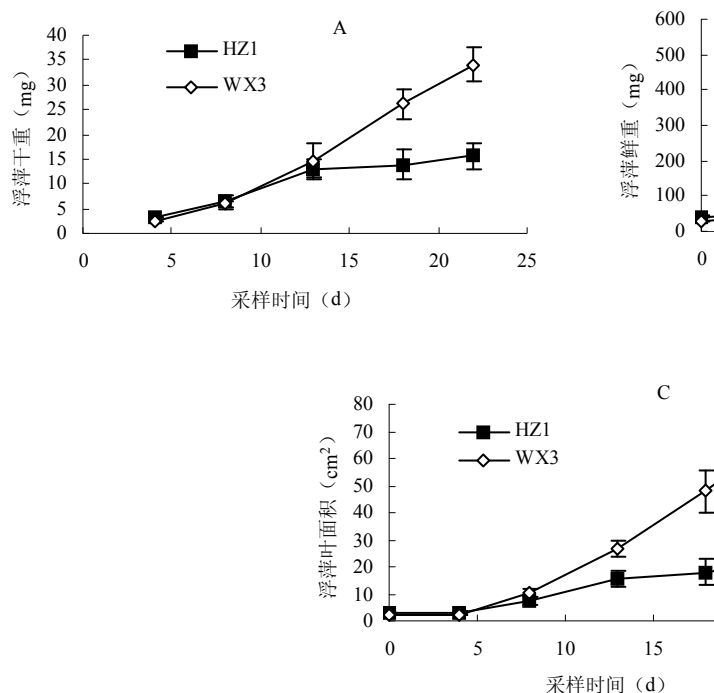


图 1 浮萍干重(A)、鲜重(B)、叶面积(C)生长曲线

Fig. 1 Growth curves of dry weight, fresh weight and frond area of duckweed

表 4 浮萍生长状况

Table 4 Growth characteristics of duckweed

	鲜重 (mg)		干重 (mg)		叶面积 (cm ²)	
	HZ1	WX3	HZ1	WX3	HZ1	WX3
RGR (1/d)	0.09	0.13	0.09	0.15	0.10	0.15
倍增时间 t_2 (d)	7.96	5.20	7.82	4.73	7.30	4.64

量较高, N、P含量分别是 40~80 mg/L和 5~15 mg/L。而本实验中采用与稻田排水大概一致的N、P含量水平的培养液, N、P含量分别是 15 mg/L和 0.4 mg/L, 远低于前人研究所使用的营养水平, 因此导致其生物量增长速率远低于之前的研究结果。

在实验结束时, 对两种浮萍生物体的含 N 量测定结果为, HZ1 含 N 量 49.0 g/kg, WX3 含 N 量 57.3 g/kg。两个处理中均出现浮萍生物体的黄叶和残根, 并且容器壁上也附着了少量的藻类物质, 这对实验结果可能有一定的影响, 同时也说明了用浮萍处理水体中 N、P 物质时及时打捞的重要性, 否则死亡的植物体会将体内的 N、P 物质重新释放回水体, 从而影响处理效果。

图 2 显示的是实验过程中水体中N素浓度变化及

水体pH变化曲线。由于浮萍本身的喜铵特性和硝化微生物的存在, 在实验开始时 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度下降速度很快, 后趋于平缓, 但至实验结束时, 水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度已经很低, 只有 0.2~0.3 mg/L, 两个品种之间无显著差异。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度则先微微上升, 然后下降, 证明了水体中硝化微生物的存在将 $\text{NH}_4\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。但是, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度下降速率是HZ1 显著大于WX3, 经过 22 天培养后, 水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分别为 6.1 mg/L和 8.6 mg/L。TN浓度一直呈下降趋势, 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化趋势一致, 也是HZ1 下降速率显著大于WX3, 经过 22 天的培养后, 水体中TN浓度分别为 6.5 mg/L和 9.8 mg/L。从溶液pH值来看, 3 种处理之间有一定的差异, 但都是一直处于下降的过程。经过 22 天的培养后, 空白对

照、HZ1 和WX3 的溶液pH值分别为 5.32、4.62 和 4.37。

对于水生生物处理系统中N去除作用的机理，一直以来有着不同的见解。Silva 等^[33]和Soares等^[34]认为NH₃挥发在N去除过程中起到主要作用，Ferrara和

Avci^[35]提出有机N沉积为底泥的过程是N素从水体中

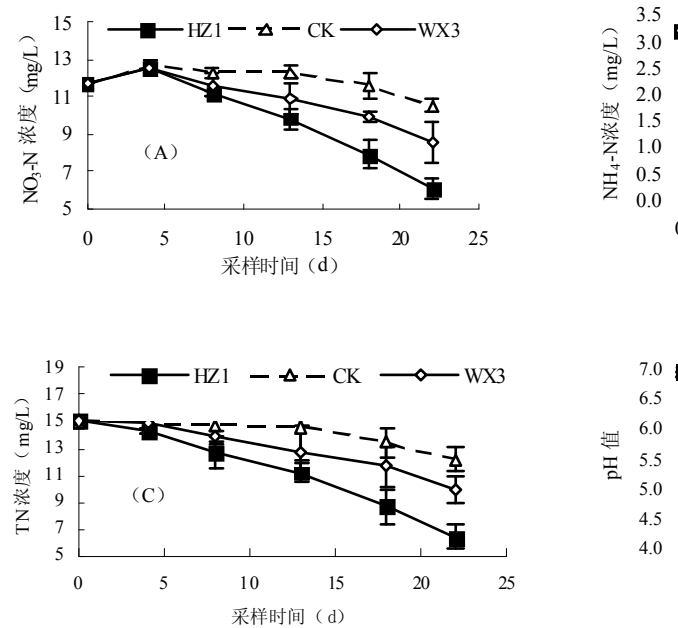


图 2 不同浮萍品种水体中NO₃-N (A)、NH₄-N (B)、TN (C) 浓度和溶液pH (D) 变化

Fig. 2 Changes in nitrogen concentration and pH in solutions cultivated with different species of duckweed

表 5 不同浮萍品种 N 平衡 (mg/L)

Table 5 Nitrogen balances summarized for treatments with different duckweed species

浮萍品种	N 输入	N 残留	N 吸收	N 未知途径去除
HZ1	30.0	12.8 (43)	0.76 (3)	16.4 (54)
WX3	30.0	19.7 (65)	1.95 (7)	8.34 (28)

注：表中括号内表示不同途径 N 去向所占的百分数 (%)。

去除的主要过程，而Zimmo等^[36-37]认为NH₃挥发占到总N去除过程中的不到 1.5%，但硝化/反硝化作用在N去除过程中则发挥着更大的作用。根据本实验研究的结果，如表 5 所示，在高效品种HZ1 处理系统中，浮萍生物体吸收仅占到 3%，实验结束水中残留N素占到 43%，其余 54% 均为未知因素引起的N素去除。这些未知因素可能包括：NH₃挥发，硝化/反硝化作用，底泥沉淀作用，藻类吸收作用等等。而低效品种WX3 处理系统中，浮萍生物体吸收仅占到 7%，另有 28% 为未知因素引起，而实验结束时水中残留N素达到 65%。但从本实验体系溶液pH值的动态变化来看，pH从 6.8 一直下降到 5.3 至 4.6 之间，因此，溶液中N素通过NH₃挥发过程去除的可能性并不大。沈根祥等^[38]在研究浮萍系统的除N途径时得到的结果为，NH₃挥发、浮萍吸

收和硝化反应对N元素的去除作用分别占总N去除作用的 33%、17% 和 50%。其NH₃挥发和浮萍吸收量大于本实验的原因可能是由于其培养水体pH初始设置为 7.5，且N、P浓度远高于本实验所设定水平，从而导致高的pH条件下NH₃挥发作用的加强和生物体对营养元素的吸收作用加大。

表 5 中HZ1 和WX3 两个品种处理后N残留所占的百分数分别为 43% 和 65%，而表 3 中TN的残留百分数则分别为 15% 和 43%，导致两次实验结果相差较大的原因是，表 3 中TN去除率是在浮萍表面覆盖率为 50% 的情况下进行的优势品种筛选试验的结果，而表 5 中的N残留百分数则是机理分析实验的结果，其初始浮萍叶片覆盖面积分别为 $2.92 \text{ cm}^2 \pm 0.36 \text{ cm}^2$ (HZ1) 和 $2.50 \text{ cm}^2 \pm 0.22 \text{ cm}^2$ (WX3)，表面覆盖率

远低于 50%，初始生物量较小，因此导致实验结束时其N残留量较大。由于机理分析实验要测浮萍生物量、叶面积等数据，绘制生长曲线，如果初始表面覆盖率较大，便会受到密度和空间限制的影响^[21]，则会影响浮萍生长曲线数据，所以在试验设计时，机理分析实验的初始表面覆盖率远低于筛选试验。

我们的研究数据验证了，在太湖地区稻田排水N、P浓度水平条件下，生物体吸收并不是浮萍植物去除水体中N元素的主要因素，而可能是由于浮萍植物释放出某些次生代谢产物或者化感物质，改变了水体的微环境，从而有利于微生物的作用或者其他化学除N作用的进行。这与Zimmo等^[23]和沈根祥等^[39]在富营养条件下取得的结论是一致的。

4 结论

从太湖流域采集到的 13 个浮萍品种中，在稻田排水 N、P 浓度水平的培养条件下，N 去除效率从大到小依次是紫背浮萍>少根紫萍或稀脉浮萍>青萍。其中，HZ1 品种对水体中 N 元素具有最高的去除效果，但是其生物量增长速度缓慢，且植物体含 N 量低，因此其除 N 的主要作用不是通过生物吸收，而是通过微生物或者化学作用共同作用来实现的，详细机理有待于进一步研究。

致谢：感谢中国科学院南京土壤研究所孙海军在本研究采样工作中的大力帮助，感谢中国科学院南京土壤研究所闵炬在实验过程中提供的指导帮助。

参考文献：

- [1] 高俊峰, 毛新伟, 颜志俊, 钟华平. 太湖流域经济发展与水源需求. 科技导报, 2002(4): 62-64
- [2] 闵炬, 施卫明, 王俊儒. 不同施氮水平对大棚蔬菜氮磷钾养分吸收及土壤养分含量的影响. 土壤, 2008, 40(2): 226-231
- [3] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 沈明星. 长期施肥对太湖地区黄泥土有机氮和有机碳的影响. 土壤, 2008, 40(1): 93-99
- [4] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 黄标, 王洪杰, Oborn I, lomback KB. 太湖典型河网区地表水与沉积物氮、磷和重金属含量空间分异. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 48-53
- [5] 李兆富, 杨佳山. 太湖流域非点源污染特征与控制. 湖泊科学, 2004, 16(增刊): 83-95
- [6] 冉江华, 黄洁. 农业面源污染研究现状及发展趋势. 山西农业科学, 2009, 37(3): 7-10
- [7] 王海芹, 万晓红. 农业面源污染的立体防控. 农业环境与发展, 2006(3): 69-72
- [8] Munafo GCM, Fabio B, Laura M. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment. Journal of Environmental Management, 2005, 77: 93-98
- [9] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明. 浮床水稻对富营养化水体中氮磷的去除效果及规律研究. 环境科学学报, 1998, 18(5): 489-494
- [10] 严国安, 任南, 李益建. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响. 环境科学与技术, 1994(64): 2-5
- [11] 黄惠珠, 叶夏. 水葫芦净化猪粪便污水效果的研究. 可再生能源, 2008, 26(4): 105-108
- [12] 张志勇, 王建国, 杨林章, 冯明雷. 植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究. 土壤, 2008, 40(3): 412-419
- [13] 卢少勇, 张彭义, 余刚. 菱草, 芦苇与水葫芦的污染物释放规律. 中国环境科学, 2005, 25(5): 554-557
- [14] 印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用. 资源节约和综合利用, 1998, 2: 46-49
- [15] 江苏省植物研究所编. 江苏植物志 (上册). 南京: 江苏人民出版社, 1977: 328-331
- [16] 种云霄, 胡洪营, 崔理华, 吴启堂, 钱易. 浮萍植物在污水处理中的应用研究进展. 环境污染治理技术与设备, 2006(7): 14-19
- [17] Fang YY, Olga B, Zed R. Ammonium and Nitrate Uptake by the Floating Plant *Landotia punctata*. Annals of Botany, 2007, 99: 365-370
- [18] Cedergeen N, Madsen TV. Light regulation of root and leaf NO_3^- uptake and reduction in the floating macrophyte *lemna minor*. New Phytologist, 2003, 161: 449-457
- [19] 种云霄, 胡洪营, 钱易. pH 及无机氮化合物对小浮萍生长的影响. 环境科学, 2003, 24(4): 35-41
- [20] Oscarson P, Ingemarsson B, Larsson CM. Growth and nitrate uptake properties of plants grown at different relative rates of nitrogen supply: Activity and affinity of the nitrate uptake system in *pisum* and *lemna* in relation to nitrogen availability and nitrogen demand. Plant, Cell and Environment, 1989, 12: 787-794
- [21] Monette FS, Louise M, Abdelkrim A. Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. Water Research, 2006, 40: 2 901-2 910
- [22] Peng JF, Bell ZW, Song YH, Peng Y. Modeling N transformation and removal in a duckweed pond: Model application. Ecological Modelling, 2007, 206: 294-300
- [23] Zimmo OR, Vedrs NP, Gijzen HJ. Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilisation ponds. Water Research, 2004, 38: 913-921
- [24] Koskiahio JE, Raty M. Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands-experiences under boreal conditions. Ecological Engineering, 2003, 20: 89-103
- [25] Mirta.T, Zeljka.VC, Ivan.R. The effect of oil industry "high

- density brines" on duckweed *Lemna minor*. Chemosphere, 1998, 37(13): 2 703-2 715
- [26] 北京工业大学工业水务中心编. 水务管理 法规 标准 规范全书(水源环境卷). 北京: 中国标准出版社, 2003: 271-278
- [27] “中国植物志”编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1985: 208-212
- [28] Porath D, Pollock J. Ammonia striping by duckweed and its feasibility in circulating aquaculture. Aquatic botany, 1982, 13: 125-131
- [29] 颜素珠. 中国水生高等植物图说. 北京: 科学出版社, 1983: 294-298
- [30] Colmer TD, Arnold JB. A comparison of NH_4^+ and NO_3^- net fluxes along roots of rice and maize. Plant, Cell and Environment, 1998, 21(2): 240-246
- [31] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 硝酸盐氮对紫背浮萍氨耐受能力的影响. 华南农业大学学报, 2005, 26(3): 14-17
- [32] 陈晓. 利用浮萍进行富营养化修复及控藻研究(硕士学位论文). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 24-26
- [33] Silva SA, Pliveira R, Soares J, mara D, Pearson HW. Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries. Water Science and Technology, 1995, 31: 321-330
- [34] Soares J, Silva SA, Pliveira R, Mara D. Ammonia removal in a pilot-scale WSP complex in Northwest Brazil. Water Science and Technology, 1996, 30: 843-852
- [35] Ferrara RH, Avci CB. Nitrogen dynamics in waste stabilisation ponds. Water Pollution Control, 1982, 54: 344-351
- [36] Zimmo OR, Steen NP, Gijzen HJ. Comparison of ammonia volatilisation rates in algae and duckweed-based waste stabilisation ponds treating domestic wastewater. Water Research, 2003, 37: 4 587-4 594
- [37] Zimmo OR, Steen NP, Gijzen HJ. Comparison of ammonia volatilisation rates in algae and duckweed-based waste stabilisation ponds treating domestic wastewater. Water Research, 2003, 37: 4 587-4 594
- [38] 沈根祥, 徐介乐, 胡双庆, 赵庆节, 刘勇弟. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 42-48
- [39] 沈根祥, 胡宏, 姚芳, 倪吾钟, 朱荫湄. 浮萍放养体系中氮的平衡与浮萍体内氮的亚细胞分布研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(6): 731-735

Screening Duckweed (*Lemnaceae*) Species for Efficient Removal of Water-Body's Nitrogen in the Tai Lake Region and Preliminary Study on Nitrogen Removal Mechanism

ZHOU Ying-ru^{1,2}, YUAN Xiao-yan², WANG Jun-ru¹, BAO Tao-fang³, SHI Wei-ming²

(1 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

3 Water Resources Bureau of Yixing City, Yixing, Jiangsu 214200, China)

Abstract: Non-point agricultural sources are the major cause of water eutrophication in Tai Lake. Phyto-remediation techniques are playing an increasingly important role in non-point pollution research. This study compared nitrogen removal efficiency among different duckweed species growing in paddy field drainage water with low nitrogen concentrations in the Tai Lake region. Nitrogen removal efficiency declined in the order of *Spirodela polyrrhiza* > *Spirodela oligorrhiza*, *Lemna perpusilla* > *Lemna minor*, total nitrogen removal efficiency among the duckweed species in this study ranged from 57.3% to 85.2%. The removal efficiency in 15 days of HZ1 was highest (85.2%) while WX3 was 57.3%. The biomass production rates of WX3 were higher than that of HZ1, the doubling time of fresh and dry weights were 5.20 days and 4.73 days for WX3 but 7.96 days and 7.82 days for HZ1, respectively. The nitrogen contents were 4.9% and 5.7% in HZ1 and WX3, respectively, however the nitrogen removal efficiency of HZ1 was significantly higher than that of WX3. It suggests that nitrogen removal from water is due to microbial or chemical processes rather than bioaccumulation.

Key words: Water eutrophication, Duckweed, Paddy field drainage water, Nitrogen removal pathways, Bioaccumulation