# 浮萍塘中氮归趋模式模拟分析

彭剑峰<sup>1,2</sup>,宋永会<sup>1</sup>,袁鹏<sup>1</sup>,王宝贞<sup>2</sup>

(1. 中国环境科学研究院,北京 100012; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,哈尔滨 150090)

摘要:通过模拟分析浮萍塘中氮的循环迁移过程,考察了 N 主要迁移途径对各形态氮的去除贡献,并确定了水环境季节变化 对氮循环过程影响.模拟结果显示:浮萍塘中氦的去除主要通过硝化/反硝化作用实现,而有机氮沉降以及氨氮挥发作用对 TN 去除贡献仅为 2.1%.浮萍塘中氨氮和硝态氮的变化主要受硝化和反硝化作用影响;有机氮主要受藻类腐败以及氨化作用 影响;底泥中氮的变化主要由有机氮沉降和底泥中氮氨化过程控制.此外,浮萍塘能有效去除水体中藻类,并维持藻类的较低 含量;浮萍主要通过促进硝化/反硝化速率来提高系统对 TN 的去除能力.

关键词:N循环迁移;转化机制;动力学模型;硝化/反硝化;浮萍塘

中图分类号:X799.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2006)10-1963-06

Study on Nitrogen Cycling and Transformations in a Duckweed Pond by Means of

# **Modeling Analysis**

PENG Jian-feng<sup>1,2</sup>, SONG Yong-hui<sup>1</sup>, YUAN Peng<sup>1</sup>, WANG Bao-zhen<sup>2</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the simulated results from N cycling and transformation model of duckweed pond, the influences of different major transfer pathways on various nitrogen removal performances are investigated. The effects of seasonal variations of water conditions on nitrogen transformations are determined. The simulated results show that nitrification and denitrification were the major removal pathways for nitrogen in duckweed pond, and the removal contributions of organic nitrogen sedimentation and ammonia volatilization for total nitrogen removal were less than 2.1%. Furthermore, in duckweed pond, nitrification and denitrification decided the removal efficiencies of ammonia and NO<sub>x</sub>, respectively; both algae decaying and organic nitrogen ammonification controlled primarily the organic nitrogen removal performances; both organic nitrogen sedimentation and mineralization of sedimentary nitrogen. Duckweed pond with duckweed growing largely can increase sharply algae mortality and keep the low content of algae in effluent. Besides, through accelerating the nitrification and denitrification rate, duckweed can evidently improve the removal efficiencies of total nitrogen.

Key words: N cycling; transformation mechanisms; dynamics model; nitrification/denitrification; duckweed pond

稳定塘中氮的循环迁移通常涉及氮的多种组成 形态及其多条循环途径,但氮的去除却仅有氨氮挥 发、硝酸盐反硝化和水生植物吸收这3条转化途 径<sup>[1~3]</sup>.只有通过改变稳定塘的环境因子,促进系 统中氮的循环向这3条转化途径偏移才能提高系统 对总氮去除率,优化处理系统运行效果<sup>[3]</sup>.因而环 也导致难以确定各种因素对 N 迁移途径的影响.此 外,采用此种方法仅能了解稳定塘中氮的实际变化 过程,无法对可能出现的情况进行预测,因而该法在 N 循环研究中应用相对较少<sup>[6]</sup>.而通过少量具有代 表性的氮迁移过程分析试验,建立相对完善的 N 迁 移转化模式,再通过数学模型对该模式进行验证和 校正,能有效降低实际监测强度,并保证模型具有较 高的预测精度. 本文主要利用数学模型对浮萍塘中各形态氮的 迁移转化过程进行定量分析,确定系统中各形态 N 的主要迁移转化机制.此外,还考察了浮萍塘中环境 因子季节差异对 N 循环迁移过程的影响.

境因子对稳定塘内各形态氮的归趋模式影响分析一
直是稳定塘研究的核心问题之一.
在稳定塘中氮的循环迁移过程复杂,尤其在生
物相丰富的水生植物塘中,随水生植物种类和塘内
水环境的季节变化,生态处理系统对氮的去除效果
通常具有明显的周期差异[4].生态处理系统中常规
的 N 变化监测仅能确定环境因子变化对氮的综合
效应,无法直接反映各种迁移途径对 N 的去除贡、
献[5];而对各迁移途径的直接测定不仅分析过程复
杂,干扰因素多,工作量大,环境因子间的依变关系

**收稿日期**:2005-09-16;修订日期:2005-11-28 基金项目:黑龙江省重大科技攻关项目(GA02C201) 作者简介:彭剑峰(1977~),男,博士后,主要研究方向为水环境生态 工程及氮磷生物控制. 1 材料与方法

1.1 N迁移转化模型

为定量分析复杂生态处理系统中 N 的循环迁移过程,并对系统内各形态 N 的去除能力进行预测,根据浮萍塘中氮的实际循环情况<sup>[7]</sup>,研究中提出了一种新型的 N 归趋模式.该模式中不仅考虑了 N<sub>am</sub>(NH<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、N<sub>ox</sub>(NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、N<sub>org</sub>(水体中有机氮)、N<sub>algae</sub>(藻类所含氮)和 N<sub>dw</sub>(浮萍中有机氮)等5种形态 N 之间的迁移转化,还考虑了 pH、DO、温度、水力停留时间等环境因子对 N 各迁移过程的影响,并融入了 N 在水体和底泥间(N<sub>sed</sub>)的迁移过程,因而整个模型包含水体、水生植物和底泥 3 种存在空间.此外,在充分考虑 N 归趋模式与浮萍塘自身变化特点的基础上,模型中包含了 N<sub>am</sub>的挥发/硝化,N<sub>ox</sub>的反硝化,浮萍以及藻类对 N<sub>am</sub>、N<sub>ox</sub>的吸收/释放,N<sub>org</sub>的氨化/沉降,N<sub>sed</sub>的氨化等 12 个循环过程.具体迁移模式如图 1 所示.

$$\frac{d(N_{algac})}{dt} = \frac{Q}{V}(N_{algac,i} - N_{algac}) + r 1_{uptake \cdot N_{arm}} + r 1_{uptake \cdot N_{ox}} - r_{mortali \cdot N_{algac}}$$
(4)

$$\frac{d(N_{dw})}{dt} = r2_{uptake \cdot N_{am}} + r2_{uptake \cdot N_{ox}} - r_{mortali \cdot N_{dw}}$$
(5)

$$\frac{d(N_{\text{sed}})}{dt} = r_{\text{sedim} \cdot N_{\text{org}}} + r_{\text{mortali} \cdot N_{\text{dw}}} - r_{\text{ammoni} \cdot N_{\text{ox}}}$$
(6)

式中,Q为处理单元实际流量( $m^{3}/d$ );V为浮萍塘 有效容积( $m^{3}$ ); $N_{am}$ , $N_{am,i}$ 分别为塘内及其进水氨 氦( $NH_{3} + NH_{4}^{+}$ )浓度(mg/L); $N_{ox}$ , $N_{ox,i}$ 分别为塘 内及其进水硝态氮( $NO_{2}^{-} + NO_{3}^{-}$ )浓度(mg/L);  $N_{org}$ , $N_{org,i}$ 分别为塘内及其进水有机氮浓度 (mg/L); $N_{algac}$ , $N_{algac,i}$ 分别为塘内及其进水藻类中 所含氮含量(mg/L); $N_{dw}$ 为塘内浮萍有机氮含量



### 图 1 浮萍塘中氮迁移基本模式

Fig. 1 Nitrogen transformation, transfer and removal in duckweed pond

组:

根据此归趋模式,建立 N 迁移转化的微分方程

(mg/L);N<sub>sed</sub>为塘内底泥有机氮含量(mg/L);r为 氦反应速率,具体表达式及其参数选择详见文献 [7].

微分方程组的求解采用4阶龙格-库塔法.模型 参数一部分采用经验数值,其余通过最小二乘法最 优化确定.模型校正所需运行数据采用2002年浮萍 塘单元各形态N变化测定结果,模型验证采用2003 年系统运行结果.在模型校正和验证过程中为了减 小偶然误差,简化计算,实验输入/输出数据均为相 邻两周均值,因而全年共24组数据.

1.2 试验地点

试验地点选择在山东某组合生态处理系统的浮萍塘处理单元,该单元主要用以去除水体中的氮和磷.该浮萍塘水深仅1.0m,水质清澈,阳光可以直接透射到塘底部,水体全年维持好氧状态.3~11月单元内生长着大量的浮萍(duckweed)和金鱼藻(*Ceratophyllum*L.),它们常覆盖塘表面达80%以上,这一定程度上抑制了水中藻类的生长,并导致该单元DO从春季的高于15 mg/L逐渐降低到夏秋季

 $\frac{d(N_{am})}{dt} = \frac{Q}{V}(N_{am,i} - N_{am}) - r_{nitrif \cdot N_{am}} - r_{volati \cdot N_{am}} - r_{1uptake \cdot N_{am}} - r_{2uptake \cdot N_{am}} + r_{ammoni \cdot N_{org}} + r_{ammoni \cdot N_{sed}}$ (1)  $\frac{d(N_{ox})}{dt} = \frac{Q}{V}(N_{ox,i} - N_{ox}) - r_{denitrif \cdot N_{ox}} - r_{1uptake \cdot N_{ox}} - r_{2uptake \cdot N_{ox}} + r_{nitrif \cdot N_{am}}$ (2)  $\frac{d(N_{org})}{dt} = \frac{Q}{V}(N_{org,i} - N_{org}) - r_{ammoni \cdot N_{org}} - r_{sedim \cdot N_{org}} + r_{mortali \cdot N_{algae}}$ (3) 的 4~8 mg/L. 此外,该单元内底泥厚约 6cm,表层 黄褐色,呈好氧状态.

将上述 N 归趋模型(公式 1~6)应用于浮萍塘 处理单元,并对浮萍塘中 N 循环迁移模型的精确性 和可靠性进行验证.模拟结果显示,模型中各形态氮 预测值与检测值之间的相关系数在 0.61~0.89 之 间,该模型能够有效反映浮萍塘中各形态氮的实际 变化趋势,模型整体表现为一个稳健的系统,具有较 优的预测可靠性,这就为该模型的实际应用奠定了 坚实的基础<sup>[8]</sup>.因而本文以此模型作为浮萍塘内 N 归趋过程模拟工具是可行的. 1.3 各项指标测定方法

浮萍塘中 N<sub>am</sub>、N<sub>org</sub> 的测定采用 APHA (1995) 标准方法,而 N<sub>ox</sub>采用戴氏合金法测定以消除 Cl<sup>-</sup> 的 干扰.水体中藻类含量用叶绿素(Chl-a)表示,其中 Chl-a 与藻类中氮的转化关系采用经验值  $R_{N/Chl-a} =$  $13^{[5]}$ .

实验用泥样采自浮萍塘表层底泥(<3cm).为 减小偶然误差,每个泥样为5~10次取样的混合样. 底泥中氮含量的测定采用凯式氮的分析方法.

浮萍含量表示为浮萍覆盖面积与其密度的乘 积.单位面积浮萍湿重取 0.4~0.8 mg/m<sup>2</sup>,浮萍含 水率为 92% ~ 94% [9]. 浮萍中氮含量不仅与浮萍种 类有关,还受水体中 N<sub>am</sub>浓度影响.本研究中采用 Leng 等人的试验结果,通过对不同浓度下浮萍中氮 含量 加 权 平 均 可 知 随 N<sub>am</sub> 从 0 mg/L 升 高 到 20

此外.图 2 也显示浮萍和藻类对 N<sub>am</sub>的去除贡 献存在明显依变关系.1~2月份,藻类吸收对水体 中 N<sub>m</sub>的去除贡献维持在 5.8% ~ 8.9% 之间, 而浮 萍对 Nam的去除贡献小于 2.9%; 而 3~5月, 随浮萍 大量生长,浮萍对 Nam的去除贡献迅速增长到 7.0% ~25.9%之间,远高于藻类对 Nam约 3.5% 的去除贡 献;6~10月浮萍和藻类对 Nam的去除贡献保持相 对稳定,平均分别为0.6%和7.6%;11~12月,随 浮萍生物量的逐渐降低,藻类对 Nam 的去除贡献又 逐渐回升到9.4%左右.浮萍和藻类对 N<sub>am</sub>去除贡献 的这种依变关系来源于浮萍对藻类生长的抑制作 用.当浮萍大量生长后会逐渐覆盖大部分水表,抑制 藻类的光合作用,并导致藻类死亡,进而抑制藻类对 N<sub>am</sub>的去除能力.因而在浮萍塘中,水生植物对 N<sub>am</sub> 的去除主要通过浮萍的吸收作用实现, 而藻类对

mg/L,浮萍中氮含量相应从 4.7% 升高到 5.2%<sup>[9]</sup>.

# 各形态氮循环迁移过程分析

# 2.1 N<sub>am</sub>的循环迁移

在浮萍塘中, N<sub>am</sub>的挥发、硝化以及水生植物的 同化吸收作用能降低水体中 N<sub>am</sub>的浓度; 而 N<sub>org</sub>和 N<sub>sed</sub>的氨化作用却又一定程度上促进了 N<sub>am</sub>含量的 升高,最终水体中 N<sub>am</sub>的变化趋势取决于这 2 种变 化的综合效应,如图2所示.



N<sub>am</sub>的去除率仅在低温期相对较高.

**2.2** N<sub>ox</sub>的循环迁移

图 3 为浮萍塘中 N<sub>ox</sub>去除速率的变化曲线.从 图 3 可以看出,全年藻类和浮萍对 Nox的同化吸收 速率分别为 0.03 mg·(L·d)<sup>-1</sup> 和 0.087  $mg \cdot (L \cdot d)^{-1}$ ,远低于 N<sub>ox</sub>约为 1.29 mg \cdot (L \cdot d)^{-1}的 反硝化速率.反硝化作用对 Nox 的去除贡献高达 91%,因而是 $N_{ox}$ 的主要去除途径.



### 浮萍塘 N<sub>ox</sub>变化速率分布

Fig. 3 Increased rate variation of N<sub>ox</sub> in duckweed pond

## 图 2 浮萍塘 Nam 变化速率分布

Fig. 2 Increased rate variation of N<sub>am</sub> in duckweed pond

模拟结果显示,浮萍塘中 N<sub>am</sub>硝化速率年均为  $1.36 \text{ mg} \cdot (L \cdot d)^{-1}$ , 是类似环境条件下好氧塘中硝 化速率的  $5 \sim 7$  倍左右<sup>[10]</sup>. 浮萍塘中硝化作用对 N<sub>am</sub>的去除贡献为113%,也远高于其余各反应途径 对 N<sub>am</sub>约 - 31.4% ~ 25.9% 的去除贡献. 这说明相 对于好氧塘而言,浮萍塘能有效提高处理单元中 N<sub>am</sub>的硝化能力,并促使硝化过程最终成为 N<sub>am</sub>的主 导去除机制.

从图 3 还可以看出,在浮萍塘中硝化和反硝化 反应速率的变化规律接近,且年均差值小于0.1  $mg \cdot (L \cdot d)^{-1}$ ,这种较小的速率差异导致水体中 N<sub>ox</sub> 的全年速率维持在  $\pm 0.3 \text{ mg} \cdot (L \cdot d)^{-1}$ 之间. 这是由 于在浮萍塘中,相对于反硝化菌而言,硝化菌的世代 期长,硝化速率制约着硝化/反硝化过程的整体速 率,因而全年硝化速率和反硝化速率相接近. 2.3 N<sub>org</sub>的循环迁移 稳定塘中有机氮主要来源于藻类、细胞等的生

物残骸以及底泥的再悬浮;其去除途径主要有 N<sub>org</sub> 氨化及有机颗粒在底泥表层的沉降<sup>[11]</sup>. 从图 4 可以 看出,在浮萍塘中有机颗粒沉降和氨化作用对 Norg 的去除贡献率分别为 25.9% 和 74.1%; 而藻类死亡 /释放对 Norg的去除贡献率为-66.7%.因而在浮萍 塘中 N<sub>org</sub>的变化主要受 N<sub>org</sub>的氨化以及 N<sub>algae</sub>死亡/ 释放作用的影响, 而 N<sub>org</sub>的沉降作用也在一定程度 上影响着系统中 N<sub>org</sub>的变化规律.

此外,从图4还可以看出,浮萍塘整体表现为对 Norg的去除,但 Norg去除速率季节差异明显.1~4 月 以及 8~12 月,由于水温相对较低,有机物的分解速 率慢,因而 N<sub>org</sub> 的总去除速率仅有 0.06  $mg \cdot (L \cdot d)^{-1}; 而高温期, 随微生物生物量及其活性$ 的迅速增长,有机物降解速率加快,Norg的去除速率

含量.

从模拟结果还可知,浮萍塘中藻类的生长主要 来自于藻类对水体中 Nam 的吸收, 而受 Nox 的影响相 对较小. 尤其在 1~4 月份, 藻类对 Nam 的吸收速率 平均为  $0.045 \text{ mg} \cdot (L \cdot d)^{-1}$ , 为藻类总变化速率的 -39.5% 左右, 明显高于藻类对 N<sub>ox</sub>约 0.005 mg·(L·d)<sup>-1</sup>的吸收速率.因而在浮萍塘中藻类吸收 对 N<sub>ax</sub>的去除能力有限.



亦相应升高到 0.52 mg·(L·d)<sup>-1</sup>左右.



#### 浮萍塘中 N<sub>org</sub>变化速率分布 图 4

Fig. 4 Increased rate variation of Norg in duckweed pond

Nalgae的循环迁移 2.4

传统的好氧塘中藻类生长旺盛,尤其在夏季藻 类的大量滋生常导致出水 TSS 的升高,并促进受纳 水体中"水华"的产生, 而浮萍塘能有效去除水体中 的藻类,因而国外常把浮萍塘作为稳定塘系统的末 端处理单元来降低出水中藻类含量[12]

图 5 浮萍塘 N<sub>algee</sub>变化速率分布

Increased rate variation of Nalgae in duckweed pond Fig. 5

N<sub>sed</sub>的循环迁移 2.5

稳定塘底泥中的氮通常来源于藻类等微生物残 骸以及污水所携带的有机颗粒沉降.常规好氧塘中 Norg沉降速率受季节变化影响较小,但在浮萍塘中1 ~3 月以及 8~12 月 N<sub>org</sub> 沉降速率小于 0.05 mg·(L·d)<sup>-1</sup>,而 4~7 月 N<sub>org</sub>的沉降速率平均为 0.17 mg·(L·d)<sup>-1</sup>,季节差异明显(见图 6).这是由于浮萍 塘进水所携带有机颗粒相对较少,单元内 Norg 主要来 源于藻类的分解及释放,因而随浮萍塘中藻类生物量 的变化, Norg的沉降速率季节差异明显.



图 5 为浮萍塘中 N <sub>algae</sub> 的变化速率分布曲线,它
反映了藻类在浮萍塘中的去除过程.可以看出,在浮
萍塘中对藻类变化过程影响最大的是藻类的死亡速
率.随4~5月份浮萍逐渐覆盖绝大部分塘水面,藻
类光合作用被抑制,其死亡速率明显升高,最高可达
0.28 mg·(L·d) <sup>-1</sup> ;而 5~12 月随藻类含量的降低,
其死亡速率亦相应减小到 0.03 mg·(L·d) <sup>-1</sup> ;全年
浮萍塘对藻类的去除效率可达 0.12 mg·(L·d) <sup>-1</sup> .
正是浮萍塘中较高的藻类死亡速率导致藻类无法大
量生存,进而能够有效控制生态处理系统出水藻类

浮萍塘 N<sub>sed</sub>变化速率分布 **E** 6

Fig. 6 Incereased rate variation of N<sub>sed</sub> in duckweed pond

此外,图6显示底泥氮的氨化速率季节差异也

10 期	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	科 学		1967	
较明显.这是由于随着水温的升高,	乍为吸附载体的	可以看出,不管在低温期还是高温期,浮萍塘中氮的			
底泥中微生物生物量迅速增长,这必	公将加速底泥中	物质流动主要集中在 N <sub>am</sub> 和 N <sub>ox</sub> 之间. <b>表1 浮萍塘氨循环对其去除贡献</b> /% Table I Contributions of nitrogen transformation			
有机物的分解速率.因而1~4月和	10~12 月,水温				
相对较低时,底泥有机物的分解速率	较小,氮的释放				
量低;而5~9月随温度升高,底泥有	可机物分解速率	to N removal in duckweed pond/%			
明显增加,氮的释放量最高可达0.1	$5 \text{ mg} \cdot (L \cdot d)^{-1}$ .		低温期	高温期	
可以看出,浮萍塘中浮萍死亡/?	冗降对底泥中氮	N <sub>am</sub> 挥发	0.01	0.06	
的含量影响较小 <sub>N</sub> 的变化主要受	N 沉降和 N.	NO <sub>4</sub> 反硝化	10.18	38.79	
		N <sub>am</sub> 硝化	10.84	44.2	
氨化过程影响.因而1~6月份,受水	く体中澡类大量	藻类吸收 NO <sub>x</sub>	0.01	0.07	
死亡/沉降的影响, N <sub>sed</sub> 表现为逐渐积	只累的过程;而7	藻类吸收 N <sub>am</sub>	0.65	0.15	
~12月陥墓举含量及其死亡速率涿	渐降低 库泥夷	Nalgae死亡	2.06	1.49	
	MITTIN, MUUA	N <sub>org</sub> 氨化	1.96	5.92	
现为 N <sub>sed</sub> 的逐渐释放过程.		底泥氨化	0.49	2.49	
2.6 N <sub>dw</sub> 的循环迁移		N <sub>org</sub> 沉降	0.69	2.07	
在营养物、光照和水温等环境历	因素合话的条件	浮萍吸收 NO <sub>x</sub>	0	1.51	
		浮萍吸收 N <sub>am</sub>	0.12	2.99	
Γ, 仔泮生物重可以住 16~24h 内迅	迷 壻 Ҡ Ӏ 篃. 囚	浮萍死亡	0.01	0.26	
而在生长密度较高、收获频繁的浮萍	塘中,浮萍的同	直接出水	72.98	0	

化吸收也是 N 的重要去除途径.

从图 7 可见,浮萍对氮的吸收速率最高可达  $0.44 \text{ mg} \cdot (L \cdot d)^{-1}$ ,远高于藻类 0.06 mg · (L \cdot d)^{-1} 的最高吸收速率.此外,浮萍对氮的吸收主要集中在 4~10月,其中 N<sub>am</sub>对浮萍的生长贡献率为 79%,而 Nox对浮萍生长贡献率为 21%,远高于 Nox对藻类生 长2.8%的贡献率.因而浮萍能够有效去除 N<sub>am</sub>和 Nox,比藻类更适合用于强化提高生态处理系统脱氮 能力.



在浮萍塘中,氦各变化速率的季节差异直接影 响到系统对氮的表观和实际去除效果.如将水体和 底泥作为一个统一体,则系统对 TN 的去除效果仅 取决于反硝化和挥发速率.在低温期,这2个反应过 程对 TN 的去除贡献为 10.0%;在高温期,反硝化 和挥发对 TN 的去除贡献为 38.9%. 如仅将水体作 为研究对象,则 TN 的去除除了取决于反硝化和挥 发作用外,还受 N<sub>org</sub>沉降,底泥氨化和浮萍死亡沉降 过程影响. 低温期和高温期, 它们对 TN 的去除贡献 分别为 10.4% 和 38.7%, 略高于实际检测的 6.7% 和 36.1%, 其中 N<sub>org</sub> 沉降和 N<sub>am</sub> 挥发对 TN 的去除 贡献全年小于 2.1%. 此外, N<sub>am</sub>是水体中氮的主要 存在形态,而硝化、藻类/浮萍同化吸收和 N<sub>sed</sub>氨化 作用直接影响到水体中 N<sub>am</sub>去除速率. 模拟实验显 示低温期和高温期,它们对 N<sub>am</sub>的去除贡献为 9.17%和 39.0%, 与实际检测的 9.23%和 34.9%

.

#### 浮萍中 N<sub>dw</sub>变化速率分布 图 7

Fig. 7 Increased rate variation of N<sub>dw</sub> in duckweed pond

#### 氮循环过程季节差异比较 3

受浮萍塘水环境季节变化影响,塘内氮的循环 过程存在明显季节差异.低温期(1~2月)进水N负 荷中有近73%未经任何转化而直接流出该单元;高 温期(7~8月)进水 N 负荷中所有氮都参与了氮的 循环过程,并以其它形态脱离系统.此外,从表1还

# 也较接近.

此外,从表1还可以看出即使在浮萍生长旺盛。 的高温期,浮萍对TN的去除贡献也仅有3.25%, 远低于反硝化对 TN 约 38.8% 的去除贡献,因而浮 萍直接吸收 N<sub>am</sub>和 N<sub>ox</sub>对 TN 的去除贡献较小. 但浮 萍的大量生长能够为硝化菌生长提供有效载体,保 证水体中硝化菌具有较高的密度,这在一定程度上 促进了水体中硝化和反硝化速率,因而大量生长的 浮萍能通过促进微生物生长密度来间接促进系统对 TN 的去除.

# 4 结论

(1) 浮萍塘系统中氮的迁移转化主要集中在 N<sub>am</sub>和 N<sub>ox</sub>之间,该处理单元内 TN 主要通过硝化/ 反硝化作用去除, 而 N<sub>org</sub>沉降及 N<sub>am</sub>挥发对 TN 去除 贡献较低.

(2)浮萍塘中低温期和高温期分别约有27%和 100%的氦以不同形式参与到单元内氮的各种循环 过程中.

(3) 浮萍吸收对系统 TN 去除能力提高幅度有限, 浮萍主要通过提高系统的硝化和反硝化速率来间接提高系统对 TN 的去除率.

(4)在浮萍塘中, N<sub>am</sub>的变化主要受硝化作用控制; N<sub>ox</sub>变化主要受硝化/反硝化作用影响; N<sub>org</sub>主要 受藻类死亡/腐败以及 N<sub>org</sub>氨化作用影响; 藻类表现 出较高的死亡速率; N<sub>sed</sub>的变化主要受 N<sub>org</sub>沉降和 N<sub>sed</sub>氨化过程影响; 而浮萍的变化主要来源于对 N<sub>am</sub> 和 N<sub>ox</sub>的吸收. facultative wastewater stabilization ponds [J]. Water Pollution Control Federation, 1982,  $54(4):344 \sim 351$ .

- [4] John A H. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds [J].
  Aquaculture, 1998, 166(3~4):181~212.
- [5] Annie C, Alain M, Jean M D P, et al. Modelling nitrogen, primary production and oxygen in a mediterranean lagoon.
   Impact of oysters farming and inputs from the watershed [J].
   Ecological Modelling, 2000, 127(2~3):161~181.
- [6] Zimmo O R, Van D S, Gijzenb H J. Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilization ponds [J]. Water Research, 2004, 38(4):913~ 920.
- [7] Peng J F. Study on performance of pollutants removals and mechanisms of an integrated ponds/wetland ecological treatment system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [8] Burford M A, Lorenzen K. Modeling Nitrogen Dynamics in shrimp ponds: the roles of sediment remineralization [J].

# 参考文献:

- [1] Zimmo O R, Van D S, Gijzenb H J. Comparison of ammonia volatilisation rates in algae and duckweed-based waste stabilization ponds treating domestic wastewater [J]. Water Research, 2003, 37(19):4587~4594.
- [2] Silva S A, Oliverira R D, Soares J. Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries [J]. Water Science Technology, 1995, 12(32):321~330.
- [3] Pano A, Middlebrooks E J. Ammonia nitrogen removal in

- Aquaculture, 2004,  $229(1 \sim 4)$ : 129  $\sim$  145.
- [9] Leng R, Stamboli J, Bell R. Duckweed-a potential high protein feed resource for domestic animals and fish [J]. Livestock Research for Rural Development, 1995, 1(7):1~3.
- [10] Soares J, Silva S, De O R. Ammonia removal in a pilot-scale
  WSP complex in northeast Brazil [J]. Water Science
  Technology, 1996, 33(7):165~171.
- [11] Timothy J H, Michael A C. Nitrogen removal from wastewater treatment lagoons [J]. Water Science Technology, 1999, 39
   (6):191~198.
- [12] Youngchul K, Wan J K. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds [J]. Water Research, 2000, 13(34):3285 ~3294.

