

# 基于 STELLA 的循环水养殖系统池塘总氨氮动态模拟\*

于涛<sup>1,2</sup> 钟非<sup>3</sup> 贺锋<sup>2</sup> 梁威<sup>2</sup> 吴振斌<sup>2</sup>

(1. 新乡学院化学与化工学院, 新乡 453003; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

3. 江苏省海洋水产研究所, 南通 226007)

**摘要:** 通过对影响循环水养殖系统养殖池塘中总氨氮动态的各种因素及其因果关系的分析, 得出了养殖池塘中总氨氮的理论模型。在理论模型基础上, 使用 STELLA 系统动力学模拟软件建立了循环水养殖实验系统中池塘水体总氨氮的系统动力学模型。通过将系统设计和运行的相关参数代入到该模型中, 对养殖过程中池塘中总氨氮的动态变化进行了模拟运算, 模拟结果与实测值基本吻合, 说明该模型对实验系统的模拟具有一定的可信度, 可为循环水养殖系统的设计和运行优化提供依据。

**关键词:** 循环水养殖系统 总氨氮 水质模型 系统动力学

**中图分类号:** X322; S954 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0199-05

## Dynamic Simulation of Total Ammonia in Culture Ponds of Recirculating Aquaculture System Based on STELLA Model

Yu Tao<sup>1,2</sup> Zhong Fei<sup>3</sup> He Feng<sup>2</sup> Liang Wei<sup>2</sup> Wu Zhenbin<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

3. Institute of Oceanology and Marine Fisheries, Nantong 226007, China)

**Abstract:** A theoretical model to evaluate total ammonia concentration in recirculating aquaculture system was established by investigating the relationship between impact factors of total ammonia. Subsequently, a system dynamics model for total ammonia in the recirculating aquaculture system was developed based on the theoretical model. The dynamics of total ammonia concentration in a culture pond during the breeding process was simulated by using STELLA simulation software. The simulation results were consistent with the measured values approximately, indicating that this model could simulate the experimental system to a certain extent and could provide suggestions on design and operation of the recirculating aquaculture system.

**Key words:** Recirculating aquaculture system Total ammonia Water quality model System dynamics

### 引言

循环水养殖系统 (Recirculating aquaculture system, RAS) 是在水产养殖生产过程中引入废水处理工艺, 以此来控制水质, 从而达到节约养殖用水, 提高养殖密度和产量的养殖模式, 目前已在世界范围内得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。在循环水养殖系统

中, 池塘的水质状况是影响鱼类生长以及净化单元效率的重要因素, 认识和了解养殖水体水质的动态变化规律, 建立水质预测和评价的模型, 从而对系统运行参数进行调整, 对于维持一个较为理想的水质环境, 提高系统的养殖效能具有重要的意义。但由于循环水养殖系统是一个复杂的系统, 具有多层次、高阶非线性、动态性、自反馈性等特征, 一般数学方

收稿日期: 2012-12-25 修回日期: 2013-01-11

\* 国家自然科学基金资助项目(51108335)和新乡学院创新基金资助项目(12ZA02)

作者简介: 于涛, 副教授, 中国科学院博士后, 主要从事水污染治理与水质净化工艺学研究, E-mail: yutao7777@hotmail.com

通讯作者: 吴振斌, 研究员, 博士生导师, 主要从事水质净化工艺学与环境生物学研究, E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

法难以对其进行量化描述和分析。基于此,本文运用系统动力学的方法,采用 STELLA 9.0.1 软件,以循环水养殖系统养殖池塘总氨氮(Total ammonia, TAN)这个对鱼类养殖影响较大的水质指标为例,进行系统建模,并对模型的有效性进行验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 养殖系统组成

建模对象为武汉市中国科学院水生生物研究所官桥养殖基地的循环水养殖系统,该实验系统于2004年春季建成,由池塘、湿地水处理单元、曝气池和管道组成(图1)。系统共有5口池塘(P1~P5),其中P1~P4为养殖塘,P5为补水塘。池塘近椭圆形,各塘面积均为200 m<sup>2</sup>,水深1.2 m。

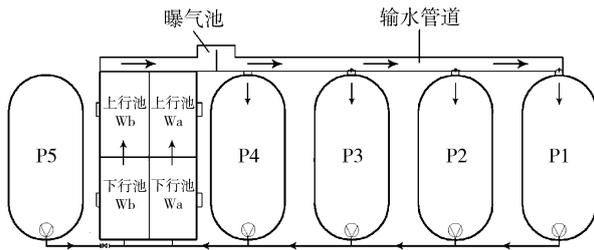


图1 循环水养殖系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of recirculating aquaculture system

湿地水处理单元由2组(Wa、Wb)并联的复合垂直流人工湿地(Integrated vertical-flow constructed wetland, IVCW)构成,总面积320 m<sup>2</sup>,每组湿地由串联的2个池(10 m×8 m×0.8 m)组成,分别称为下行流池和上行流池。其中Wa湿地下行流池种植红花美人蕉和水竹,上行流池为在收集管上铺垫一层沙土后种植绿色草皮;Wb湿地下行流池种植黄花美人蕉和水竹,上行流池种植香蒲、菖蒲、风车草和剑麻。湿地中基质由粒径不同的沙石组成。养殖池塘循环水通过UPVC管均匀布于下行池表面,经过湿地处理后由上行池表面的UPVC管收集形成出水,湿地出水经水道(60 m×0.5 m×0.25 m,坡降0.5%)循环流入池塘。

### 1.2 建模工具

采用 Isee Systems 公司的一款可视化系统动力学模拟软件 STELLA 9.0.1 来进行模型构建, STELLA (Structure thinking experimental learning laboratory with animation),即图形导向的系统动力学模型发展软件,它与 VINSIM 以及 Matlab 的 Simulink 软件包相似,可以提供一个实现动态系统建模、仿真的集成环境<sup>[6-7]</sup>,动态展现和表达复杂系统和概念实际是如何进行运作的。STELLA 在研究复杂系统的行为和在处理高度非线性、高阶次、多变

量、多重反馈问题方面具有优势<sup>[8]</sup>,随着系统动力学理论和方法的不断发展与完善以及计算机技术的改进,目前已广泛应用于规划学、生物学、生态学和环境科学等领域<sup>[9-10]</sup>。

## 2 模型建立

### 2.1 模型结构

实验系统中氮的动态变化如图2所示。从图中可见,氮的贮存库包括鱼类、养殖水体、浮游植物、底泥和人工湿地。鱼类排泄物、浮游植物尸体及底泥中的有机氮经矿化和氨化作用生成氨氮,其中一部分氨经挥发作用直接进入大气,剩余的氨在有氧条件下经硝化作用生成亚硝态氮,进而氧化成硝态氮,再经脱氮作用转化为N<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>O进入大气。在此过程中,浮游植物也通过同化作用吸收一部分氨、硝态氮和亚硝态氮,而浮游植物死亡后产生的有机氮则通过沉降作用进入底泥。由于本实验系统为基于人工湿地的循环水养殖系统,在池塘水循环的过程中,水中的氨、硝态氮、亚硝态氮、浮游植物和有机碎屑不断被人工湿地所截留和净化,从而达到了降低养殖水体中氮元素浓度,优化鱼类养殖环境的目的。

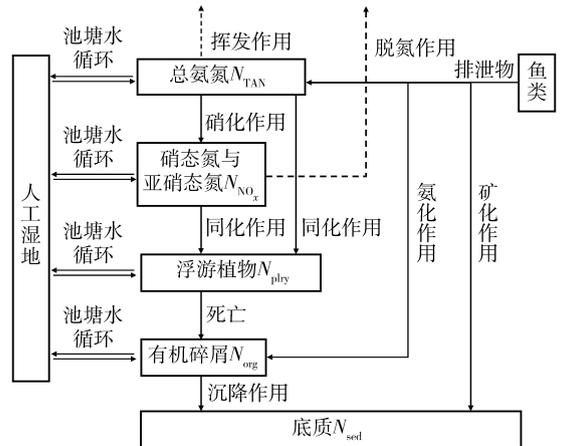


图2 实验系统养殖池塘氮动态变化图

Fig.2 Nitrogen balance processes in culture pond

根据图2,可得到池塘中总氨氮的动态方程为

$$\frac{dN_{TAN}}{dt} = \left( r_{TAN} N_{org} + r_{mi} N_{sed} + \frac{N}{V} r_{fish\_excrete} \right) - \left( k_{W\_TAN} R_{pond} N_{TAN} + r_{ni} N_{TAN} + r_{vo} N_{TAN} + r_{phy\_TAN} N_{TAN} \right) \quad (1)$$

其中

$$r_{fish\_excrete} = 0.3805 W_{fish}^{0.65}$$

式中  $k_{W\_TAN}$ ——湿地对总氨氮的去除率

$R_{pond}$ ——池塘日循环率, d<sup>-1</sup>

$V$ ——池塘水体体积, m<sup>3</sup>

$N$ ——鱼放养尾数, 尾

$N_{TAN}$ ——池塘水氨氮以氮计的质量浓度, g/m<sup>3</sup>

$N_{org}$  —— 池塘水有机碎屑中氮质量浓度,  $g/m^3$   
 $N_{sed}$  —— 底质中氮的质量浓度,  $g/m^3$   
 $r_{ni}$  —— 硝化率,  $d^{-1}$        $r_{vo}$  —— 挥发率,  $d^{-1}$   
 $r_{phy\_TAN}$  —— 浮游植物对氨氮的同化率,  $d^{-1}$   
 $r_{TAN}$  —— 氨化率,  $d^{-1}$        $r_{mi}$  —— 矿化率,  $d^{-1}$   
 $r_{fish\_excrete}$  —— 鱼类排氮率, 与鱼体重的幂函数呈负相关关系<sup>[11-12]</sup>,  $g/(尾 \cdot d)$   
 $W_{fish}$  —— 单尾鱼体重,  $g/尾$

水中以硝态氮及亚硝态氮形式存在的氮的动态方程为

$$\frac{dN_{NO_x}}{dt} =$$

$$r_{ni}N_{TAN} - (k_{W\_NO_x}R_{pond}N_{NO_x} + r_{den}N_{NO_x} + r_{phy\_NO_x}N_{NO_x}) \quad (2)$$

式中  $k_{W\_NO_x}$  —— 湿地对硝态氮及亚硝态氮净化率  
 $N_{NO_x}$  —— 池塘水硝态氮及亚硝态氮以氮计的质量浓度,  $g/m^3$   
 $r_{den}$  —— 脱氮作用率,  $d^{-1}$   
 $r_{phy\_NO_x}$  —— 浮游植物对硝态氮及亚硝态氮的同化率,  $d^{-1}$

有机碎屑中所含氮的动态方程为

$$\frac{dN_{org}}{dt} = r_M N_{phy} - (k_{W\_org}R_{pond}N_{org} + r_{am}N_{org} + r_{pr}N_{org}) \quad (3)$$

式中  $k_{W\_org}$  —— 湿地对有机碎屑的去除率  
 $r_{pr}$  —— 沉降率,  $d^{-1}$        $r_{am}$  —— 氨化率,  $d^{-1}$   
 $r_M$  —— 浮游植物自然死亡率,  $d^{-1}$   
 $N_{phy}$  —— 浮游植物中氮的质量浓度,  $g/m^3$

浮游植物中所含氮的动态方程为

$$\frac{dN_{phy}}{dt} = r_{phy\_TAN}N_{phy} + r_{phy\_NO_x}N_{phy} - (k_{W\_phy}R_{pond}N_{phy} + r_M N_{phy}) \quad (4)$$

式中  $k_{W\_phy}$  —— 湿地对浮游植物的去除率  
 底质中所含氮的动态方程为

$$\frac{dN_{sed}}{dt} = r_{pr}N_{org} - r_{mi}N_{sed} \quad (5)$$

根据以上理论模型,使用 STELLA 系统动力学模拟软件对养殖池塘中总氮氮的动态进行了模拟,模型结构如图 3 所示。

### 2.2 模型参数确定

研究采用吴振斌<sup>[5]</sup>和于涛<sup>[13]</sup>等使用同一个实验系统得到的研究数据,确定养殖池塘氮氮 STELLA 模型的参数。表 1~3 列出了模型中变量与常量的初值以及各反应和过程速率的计算方法<sup>[11,13,20]</sup>,通过将该系统 2004 年 P1~P4 塘以及 2005 年 P1、P3、P4 塘的实验数据代入至模型中,得

到养殖池塘氮氮实测值与模拟值的比较结果如图 4 所示。养殖池塘总氮氮模拟值与实测值的线性回归方程为  $y = 0.9487x$ , 决定系数  $R^2$  为 0.8843, 表明模型的模拟值与实测值的符合度较好,所获取的参数基本可信。

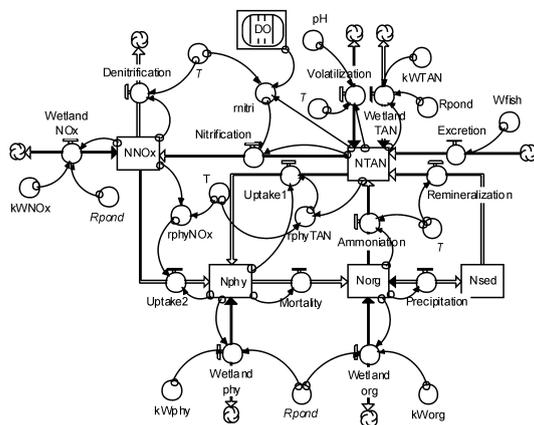


图 3 总氮氮系统动力学模型结构图

Fig. 3 Graphical interface of system dynamics model for TAN in culture ponds with STELLA

表 1 模型变量初始值

Tab. 1 Initial values of model		$g/m^3$			
参数	$N_{TAN}$	$N_{NO_x}$	$N_{phy}$	$N_{org}$	$N_{sed}$
初值	0.2	0.012	1.95	0.25	0.9

表 2 模型参数和常数表

Tab. 2 Coefficients and constants of model

参数符号	数据源	定义	取值
$\mu_n$	文献[14]	硝化细菌最大生长率/ $d^{-1}$	0.008
$Y_n$	校准值	硝化细菌生长系数	0.25
$C_T$	文献[15]	硝化细菌生长限制因子	$e^{0.098 - (T - 15)}$
$K_1$	文献[14]	硝化细菌氨半饱和和常数	$e^{0.051(T - 15.8)}$
$K_2$	文献[14]	硝化细菌氧半饱和和常数	1.3
$K_3$	文献[15]	氨氮半饱和和常数	18
$K_4$	文献[15]	硝态氮半饱和和常数	2
$K_5$	校准值	有机氮沉降系数	0.035
$K_v$	文献[16]	氨氮传质系数	0.0566
$K_{mi}$	校准值	沉积氮矿化系数	0.003
$K_{TAN}$	校准值	有机氮氨化系数	0.01
$K_M$	校准值	浮游植物自然死亡率	0.15
$K_d$	校准值	脱氮系数	1.9
$h_p$	实测值	池塘水深/m	1.2
$\mu_{max}$	文献[17]	浮游植物最大生长率 ( $20^\circ C$ )/ $d^{-1}$	0.45
$\theta$	校准值, 文献[18]	温度校正系数	1.02 ~ 1.08
$N/Chl - a$	文献[19]	浮游植物氮与叶绿素 a 质量比	13
$R_{pond}$	实测值	养殖池塘日循环率	0.1 ~ 0.2
$k_{W\_NO_x}$	实测值	湿地对硝态及亚硝态氮 净化率	0.486

表3 模型中各反应和过程速率及其计算方法

Tab.3 Rate variables and their calculation in model

参数符号	计算式
$r_{ni}$	$r_{ni} = \frac{\mu_n}{Y_n} \left( \frac{N_{TAN}}{K_1 + N_{TAN}} \right) \left( \frac{DO}{K_2 + DO} \right) C_T$
$r_{vo}$	$r_{vo} = \frac{K_e e^{0.13(T-20)}}{h(1 + 10^{10.5 - 0.03T - pH})}$
$r_{phy\_TAN}$	$r_{phy\_TAN} = \mu_{max} \Theta^{T-20} \left( \frac{N_{TAN}}{K_3 + N_{TAN}} \right)$
$r_{phy\_NO_x}$	$r_{phy\_NO_x} = \mu_{max} \Theta^{T-20} \left( \frac{N_{NO_x}}{K_4 + N_{NO_x}} \right)$
$r_{den}$	$r_{den} = K_d \Theta^{T-20}$
$r_M$	$r_M = K_M \Theta^{T-20}$
$r_{pr}$	$r_{pr} = K_S$
$r_{TAN}$	$r_{TAN} = K_{TAN} \Theta^{T-20}$
$r_{mi}$	$r_{mi} = K_{mi} \Theta^{T-20}$
$k_{W\_TAN}$	$k_{W\_TAN} = 1 - e^{-\frac{1.95S_{PL} - H_{RT}}{2.97 + S_{PL}}}$
$k_{W\_org}$	$k_{W\_org} = 1 - \frac{0.00864S_{PL}}{H_{LR}(1 - e^{-0.0905S_{PL}})}$
$k_{W\_phy}$	$k_{W\_phy} = 1 - \frac{0.0611S_{PL}}{H_{LR}(1 - e^{-0.0621S_{PL}})}$

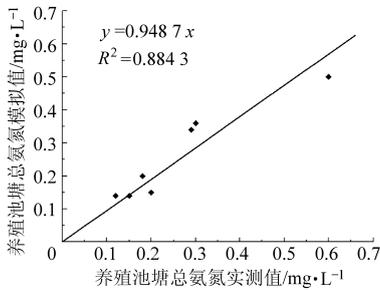


图4 养殖池塘总氮实测值与模拟值比较

Fig.4 Comparison of field-measured and model-predicted TAN concentration in culture ponds

### 2.3 模型验证

为进一步研究循环水养殖系统养殖池塘中总氮的动态,使用本系统2005年6月12日至10月30日的实际运行资料<sup>[13]</sup>,对P2塘中总氮的动态进

行了模拟计算,并与同时段内该池塘总氮氮实测值进行对比,结果见图5。由图可见,本模型对养殖池塘中总氮浓度的模拟值和变化趋势与实测情况基本一致,具有一定的可信度。但本模型的计算拟合效果还不是特别理想,与实测值存在着一定的偏差。一方面可能是由于实验所用循环水养殖系统位于室外,受天气变化影响,系统的随机波动较大;另一方面也说明模型参数还需要进一步验证和优化,以提高其拟合效果。

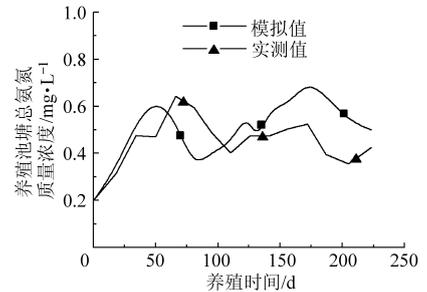


图5 养殖池塘总氮氮实测值与模拟值随时间的变化  
Fig.5 Time courses of field-measured and model-predicted TAN concentration in culture pond

### 3 结束语

(1) 在分析影响水中总氮氮动态的各要素及其因果关系的基础上,得到氮元素在循环水养殖系统养殖池塘中转化与传递的理论模型,并进一步建立了养殖池塘水体总氮氮 STELLA 系统动力学模型。

(2) 将该系统往年运行数据代入至模型中进行参数校核,总氮氮模拟值与实测值线性回归方程的决定系数为0.8843,表明模型参数基本可信。对养殖过程中P2塘总氮氮进行的实时模拟运算结果显示,模型模拟值和变化趋势与实测情况基本一致,表明利用 STELLA 对循环水养殖系统养殖池塘总氮氮进行模拟和预测有一定的可行性。

### 参 考 文 献

- Gary E M, George S L. Evaluation of a trickling biofilter in a recirculating aquaculture system containing channel catfish[J]. Aquacultural Engineering, 1984, 3(1): 39 ~ 57.
- Davis D A, Arnold C R. The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 17(3): 193 ~ 211.
- Luther G W, Barnaby J W, Haugh C G, et al. Modeling gas transfer and biological respiration in a recirculating aquaculture system[J]. Aquacultural Engineering, 1996, 15(5): 359 ~ 379.
- Clete A O, Steve M A, Shaun M M. Growth and reproductive performance of broodstock shrimp reared in a biosecure recirculating aquaculture system versus a flow-through pond[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 29(3~4): 93 ~ 107.
- 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 129 ~ 133.  
Wu Zhenbin, Li Gu, Fu Guiping, et al. Technological design and purification performance of a recirculation aquaculture system based on constructed wetlands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 129 ~ 133. (in Chinese)
- 张波, 虞朝晖, 孙强, 等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010, 35(2): 1 ~ 4.

- 7 石红雁, 许纯新, 付连宇. 基于 Simulink 的液压系统动态仿真[J]. 农业机械学报, 2000, 31(5): 94~96.  
Shi Hongyan, Xu Chunxin, Fu Lianyu. Study on dynamical simulation of hydraulic system based on Simulink[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 94~96. (in Chinese)
- 8 Forrester J W. Collected papers of Jay[M]. Cambridge, MA: Productivity Press, 1975.
- 9 冷红, 郭士元. 系统动力学方法在城市总体规划中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(3): 100~104.  
Leng Hong, Guo Shiyuan. Application of system dynamics to city planning[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 34(3): 100~104. (in Chinese)
- 10 Ying O Y, Jia E Z, Dian L, et al. A STELLA model for the estimation of atrazine runoff, leaching, adsorption, and degradation from an agricultural land [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(2): 263~271.
- 11 Leung K M Y, Chu J C W, Wu R S S. Effects of body weight, water temperature and ration size on ammonia excretion by the areolated grouper (*Epinephelus areolatus*) and mangrove snapper (*Lutjanus argentimaculatus*)[J]. Aquaculture, 1999, 170(3~4): 215~227.
- 12 Wu B, Sun S C. Ammonia and urea excretion of the nemertean *Procephalothrix similus* Iwata: effects of salinity, temperature, body weight and amputation[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 337(1): 13~18.
- 13 于涛, 成水平, 贺锋, 等. 基于复合垂直流人工湿地的循环水养殖系统净化养殖效能与参数优化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 188~193.  
Yu Tao, Chen Shuiping, He Feng, et al. Performance and optimization of recirculating aquaculture system combined with integrated vertical-flow constructed wetland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(2): 188~193. (in Chinese)
- 14 Charley R C, Hooper D G, Mclee A G. Nitrification kinetics in activated sludge at various temperatures and dissolved oxygen concentrations[J]. Water Research, 1980, 14(10): 1387~1396.
- 15 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, 7(1): 1~3.
- 16 Stratton F E. Ammonia nitrogen losses from streams[J]. Sanitary Engineering Division, 1968, 94(6): 974~978.
- 17 Peng J F, Wang B Z, Song Y H, et al. Modeling N transformation and removal in a duckweed pond: model development and calibration[J]. Ecological Modelling, 2007, 206(1~2): 147~152.
- 18 Stefan H G, Fang X. Dissolved oxygen model for regional lake analysis[J]. Ecological Modelling, 1994, 71(1~3): 37~68.
- 19 Chapelle A, Menesguen A, Deslous-Paoli J M, 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.
- 20 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 等. 浮萍塘中氮归趋模式模拟分析[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1963~1968.  
Peng Jianfeng, Song Yonghui, Yuan Peng, et al. Study on nitrogen cycling and transformations in a duckweed pond by means of modeling analysis[J]. Environmental Science, 2006, 27(10): 1963~1968. (in Chinese)