

92, 12 (3)
193-200

8272(1)

第12卷 第3期
1992年9月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 12, No. 1
Sep., 1992

生物稳定塘碳、氮、磷物质迁移 转化模型的研究

文湘华

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

钱易 顾夏声

(清华大学环境工程系, 北京)

Q141

摘 要

本研究较系统地建立在试验基础上建立了生物稳定塘系统内碳、氮、磷营养物质转移规律的生态学模型, 并对模型进行了全面参数估值和估值的灵敏度分析, 用实地塘数据对模型进行了检验。结果表明: 模型结构合理, 总体上能够反映碳、氮、磷在稳定塘正常运转条件下的迁移转化规律及塘内生物和生物化学反应的特征。模型参数适用, 解法成功, 具有广泛的应用前景。

关键词: 生物稳定塘, 物质转移, 生态学模型。

生物稳定塘是一种经济有效的废水处理设施。鉴于我国目前的水污染状况和经济实力, 生物稳定塘在我国具有广泛的应用前景。

生物稳定塘是一种半人工生态系统, 其中发生着多种物质的迁移转化过程, 尤以碳、氮、磷元素的转移过程为重要。以往, 研究者在这一领域进行过一些研究工作^[1-3], 但以生态学的基本思想为指导, 专门研究稳定塘元素转移过程及其规律的报道尚未多见。本研究的目的在于建立能较完整地反映生物稳定塘系统内碳、氮、磷元素转移规律的综合生态学模型, 以期进一步揭示生物稳定塘的工作机理, 指导塘的设计和管理。

一、生态学模型的建立

模型是考察复杂系统的有力工具, 它可以表明系统的性质, 揭示我们对事物认识的不足^[4]。

生态系统中的物质在不断地进行着转移和变化。但在这种过程中物质的总量应是基本不变的, 即所谓物质守恒, 这是生态学的基本思想。运用这一基本思想, 假定塘内的流态为完全混合型, 可写出以下形式的平衡方程:

$$V \frac{dc}{dt} = QC_i - Q_e C + V \sum_{j=1}^n (v_j); \quad (1)$$

式中

C : 生物稳定塘中某一组分的浓度(mg/l);

$\frac{dc}{dt}$: 生物稳定塘中某一组分的变化率(mg/l · d);

本文于1991年9月19日收到, 修改稿于1992年4月13日收到。

V : 反应器容积(l);
 Q : 进水流量(l/d);
 C_i : 某组分的进水浓度(mg/l);
 v_c : 某组分的容积反应速率(mg/l · d);
 n_i : 某组分参加反应的次数;
 Q_o : 出水流量(l/d)。

此方程即本研究建立稳定塘生态学模型的基础。为了建立模型, 研究中对稳定塘中碳、氮、磷的存在形式及转移过程作了一些基本假设, 分别列于图 1、2、3。

1. 关于碳

从图 1 中可见塘内碳元素共有 4 种存在形式: (1) 溶解性无机碳 C_i ; (2) 菌含碳 C_b ; (3) 溶解性有机碳 C_o 和藻含碳 C_a , 并有以下 7 种转移途径: (1) 细菌分解溶解性有机碳并合成菌体细胞(V_{obc}); (2) 细菌衰亡形成无机碳(V_{bic}); (3) 溶解性有机碳在细菌作用下分解为无机碳(V_{oic}); (4) 藻利用无机碳, 经光合作用形成藻细胞(V_{iac}); (5) 藻体衰亡

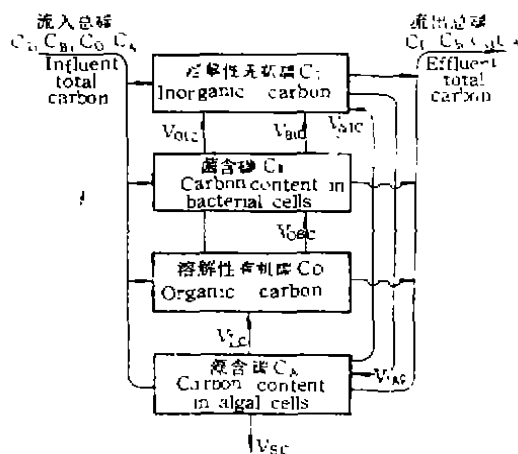


图 1 碳转移模型

Fig.1 The model of C transference

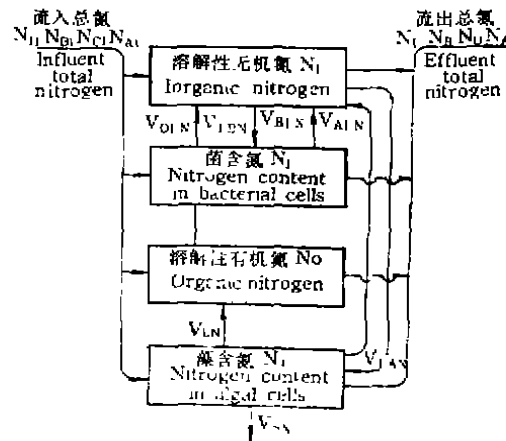


图 2 氮转移模型

Fig.2 The model of N transference

分解形成无机碳(V_{aic}); (6) 藻体自溶形有机碳(V_{lc}); (7) 藻体沉淀(V_{sc})。

为了简化模型, 对碳元素的转移过程还作了以下假设: (1) 无机碳即 CO_2 的界面传质过程可以忽略不计, 这一假设有许多前人的研究作为依据, 本研究中所测出的 CO_2 浓度均较低, 也可支持这一假设; (2) 细菌体总质量较藻体为小, 本试验的测定结果已证实了这一假设的正确性, 对沉积物的表观观察及镜检已证明了藻占绝对优势, 因此模型中可不计菌体分解产生有机碳的过程及菌体的沉淀过程; (3) 关于沉积物的再分解过程目前尚无一合理且普遍认可的表达形式。鉴于本试验的时间不很长, 故模型中将沉积与再分解过程合为一项, 以沉淀过程概括之。

2. 关于氮

由图 2 可见稳定塘内氮元素主要存在形式有: (1) 溶解性无机氮 N_i ; (2) 菌含氮 N_b ; (3) 溶解性有机氮 N_o 和 (4) 藻含氮 N_a , 并有以下 7 种转移途径: (1) 细菌分解溶解性有机氮

生成无机氮 (V_{OIN}); (2) 细菌利用无机氮合成菌体 (V_{IBN}); (3) 细菌衰亡生成无机氮 (V_{BIN}); (4) 藻类利用无机氮经光合作用合成藻体 (V_{IAN}); (5) 藻衰亡生成无机氮 (V_{AIN}); (6) 藻自溶生成有机氮 (V_{LN}); (7) 藻体沉淀 (V_{SN})。

关于氮元素模型中还假设: (1) 氨挥发过程可不计, 因为本试验中 pH 的最大测值为 8.2, 根据计算 NH_3 含量仅占总氨氮含量的 10%; (2) 多数研究者的研究工作表明硝化-反硝化不是塘内氮活动的主要过程, 本试验中硝酸盐及亚硝酸盐浓度很低, 故模型中假定硝化及反硝化过程可以不计; (3) 氮转移包含着一系列复杂过程, 如有机氮通过一系列脱氨基反应产生氨氮, 其中部分是异养菌代谢有机化合物时产生的, 部分是氨化细菌作用于蛋白质分子产生的氨氮。这些过程尚无法分解测定, 故模型中假设有机氮的转化过程为一级反应, 细菌合成利用无机氮。

3. 关于磷

图 3 所示为模型中对磷元素存在形式及转移过程的基本假设。可见磷元素的主要存在形式为: (1) 溶解性总磷 P_T ; (2) 菌含磷 P_B ;

(3) 藻含磷 P_A , 并有以下 6 种转移途径: (1) 细菌利用溶解性磷合成菌体 (V_{BTP}); (2) 菌体衰亡生成溶解性磷 (V_{BTP}); (3) 藻利用溶解性磷经光合作用合成藻体 (V_{ATP}); (4) 藻衰亡生成溶解性磷 (V_{ATP}); (5) 藻自溶生成溶解性磷 (V_{LP}); (6) 藻体沉淀 (V_{SP})。

根据上述假设, 可分别对各种元素的各种存在形态列方程 (1) 所示的物料平衡方程, 取其稳态表达式, 经整理即可得到如下 1 组塘内碳、氮、磷转移规律的综合生态学模型。该模型由 12 个非线性方程组成, 主要包括两种子模型, 一是涉及生物生长的 Monod 方程 (μ , K , Y), 另一个是涉及生物衰亡 (k_d)、自溶 (k_l) 和沉淀 (k_s) 等过程的一级反应表达式。模型清晰地反映了塘内主要元素的转移过程。模型中状态变量意义及单位列于表 1, 方程中角标“i”表示进水测值。

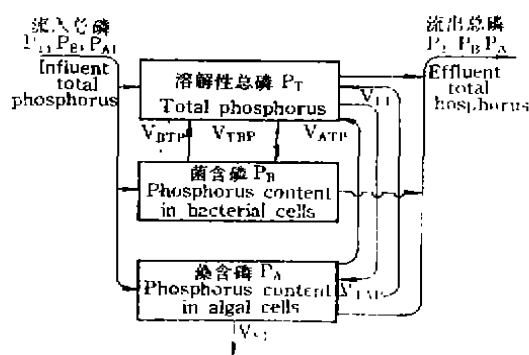


Fig.3 The model of P transference

$$\begin{aligned} \text{磷: } \frac{C_{Pi}}{\theta} - \frac{C_{Pi}}{\theta} + (1-Y) \mu_{nBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B / Y + k_{dBC} \cdot C_B \\ + k_{lAC} \cdot C_A - \mu_{nAC} \frac{C_i}{K_{AC} + C_i} \cdot C_A \cdot f(I) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{C_{Bi}}{\theta} - \frac{C_B}{\theta} + \mu_{nBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B - k_{dBC} \cdot C_B = 0 \quad (3)$$

$$\frac{C_{Ai}}{\theta} - \frac{C_o}{\theta} - \mu_{nBC} \frac{C_o}{K_{BC} + C_o} \cdot C_B / Y + k_{lAC} \cdot C_A = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{Ai}}{\theta} - \frac{C_A}{\theta} + \mu_{nAC} \frac{C_i}{K_{AC} + C_i} \cdot C_A \cdot f(I) \\ - k_{lAC} \cdot C_A - k_{lC} \cdot C_A - k_{sC} \cdot C_A = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

氮:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ii}}{\theta} - \frac{N_I}{\theta} + \alpha_N \cdot N_O + k_{dBN} \cdot N_B + k_{dAN} \cdot N_A \\ - \mu_{mBN} \frac{N_I}{K_{BN} + N_I} \cdot N_B - \mu_{mAN} \frac{N_I}{K_{AN} + N_I} \cdot N_A \cdot f(I) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{N_{Bi}}{\theta} - \frac{N_B}{\theta} + \mu_{mBN} \frac{N_I}{K_{BN} + N_I} \cdot N_B - k_{dBN} \cdot N_B = 0 \quad (7)$$

$$\frac{N_{Oi}}{\theta} - \frac{N_O}{\theta} - \alpha_N \cdot N_O + k_{LN} \cdot N_A = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ai}}{\theta} - \frac{N_A}{\theta} + \mu_{mAN} \frac{N_I}{K_{AN} + N_I} \cdot N_A \cdot f(I) \\ - k_{dAN} \cdot N_A - k_{LN} \cdot N_A - k_{SN} \cdot N_A = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

磷:

$$\begin{aligned} \frac{P_{Ti}}{\theta} - \frac{P_T}{\theta} + k_{dBP} \cdot P_B + k_{dAP} \cdot P_A - \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B \\ - \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(I) + k_{LP} \cdot P_A = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{P_{Bi}}{\theta} - \frac{P_B}{\theta} + \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B - k_{dBP} \cdot P_B = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{Ai}}{\theta} - \frac{P_A}{\theta} + \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(I) \\ - k_{dAP} \cdot P_A - k_{LP} \cdot P_A - k_{SP} \cdot P_A = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

光强函数

$$f(I) = \frac{I_{*v}}{I_m} \exp \left(1 - \frac{I_{*v}}{I_m} \right) \quad (13)$$

表 1 模型中的变量
Table 1 Variables in model

名 称 Name	符号 Symbol	名 称 Name	符号 Symbol
无机碳浓度 Inorganic carbon	C_I	溶解性有机氮浓度 Organic nitrogen	N_O
菌体含碳浓度 Carbon content in bacterial cells	C_B	藻体含氮浓度 Nitrogen content in algal cells	N_A
溶解性有机磷浓度 Organic carbon	C_O	溶解性总磷浓度 Total phosphorus	P_T
藻体含碳浓度 Carbon content in algal cells	C_A	菌体含磷浓度 Phosphorus content in bacterial cells	P_B
无机氮浓度 Inorganic nitrogen	N_I	藻体含磷浓度 Phosphorus content in algal cells	P_A
菌体含氮浓度 Nitrogen content in bacterial cells	N_B		

* 表中单位全部为mg/l。

二、模型的参数估值及灵敏度分析

1. 试验设计

测定模型参数的试验方法有 3 种: (1) 稳态条件测定法; (2) 短期间歇试验法; (3) 动态测定法。本研究采用稳态条件测定法, 即维持反应器在一定进水浓度和停留时间下, 连续稳态运行, 测定有关变量, 再改变运行条件取得相应变量, 从而估算出相应的动力学参数。此法结果准确性较好。

进行试验的三级串联室内模拟塘尺寸见表 2。模拟塘放置在恒温室内, 温度控制为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。塘上部以日光灯模拟日光, 塘水面照度约 6000 lx, 每日光照 12h, 水力控制进水流量。试验用水采用以工业葡萄糖, 尿素和磷酸二氢钾按生活污水组成比例配制的合成废水。

表 2 模拟塘尺寸

Table 2 Size of the lab pond

塘号 Pond No.	1	2	3
长 Length(m)	0.785	0.785	0.785
宽 Width(m)	0.400	0.225	0.225
深 Depth(m)	0.495	0.495	0.495
面积 Area(m ²)	0.314	0.177	0.177
容积 Volume(m ³)	0.155	0.087	0.087

在上述模拟塘内进行了 4 组运转试验, 控制条件见表 3。在试验过程中测定了进水及各状态变量的总碳 (TC)、无机碳 (IC)、有机碳 (OC)、总氮 (TN)、无机氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、

表 3 试验控制条件

Table 3 Operation conditions of the experiments

组别 No.	水温 Temp. (°C)	流量 F.R.* (L/d)	停留时间 HRT (d)	COD (mg/L)	TC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
1	20	38.3	8.6	109.72	83.89	14.58	1.63
2	20	34.8	9.4	187.21	110.84	21.91	2.21
3	20	30.0	11.0	246.95	126.58	26.56	2.65
4	20	30.0	11.0	302.81	147.04	33.07	3.36

* Flow rate.

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、有机氮 (ON)、总磷 (TP) 浓度及溶解氧、pH、碱度、总沉淀生物量、附壁生物量等。共获得数千个试验数据。对这些试验数据的常规分析表明本试验反映了生物稳定塘系统的一般特征。

2. 参数估值方法及估值结果

本研究采用整体估值的方法。此法是随着 60 年代信息论、控制论和系统论三大新兴科学的建立及电子计算机的迅速发展应运而生的一种参数估值方法。它的基本思想是将全系统综合考虑, 建立综合系统目标, 运用一系列数学方法, 在计算机上求取使系统目标达到最优的参数值。

本模型估值采用的目标函数是测定值与模型计算值的误差平方和。原则是使目标函数达到最小。选择平方和作为目标函数是因为数学上已经证明这种方法可保证估值无偏。下面以碳元素为例, 说明目标函数的构造过程。将式 (2) — (5) 整理, 引入函数符号 F , 有:

$$C_{1,i} = F_1(\theta, C_1, C_2, C_3, C_4, \mu_{nBC}, \mu_{nAC}, K_{BC}, K_{AC}, k_{dBC}, k_{dAC}, Y, f(I)) \quad (14)$$

$$C_{2,i} = F_2(\theta, C_2, C_3, \mu_{nBC}, k_{dBC}, K_{BC}) \quad (15)$$

$$C_{3,i} = F_3(\theta, C_2, C_3, C_4, \mu_{nBC}, K_{BC}, k_{dBC}, k_{dLC}, Y) \quad (16)$$

$$C_{4,i} = F_4(\theta, C_1, C_4, \mu_{AC}, K_{AC}, k_{AC}, k_{LC}, k_{SC}, f(I)) \quad (17)$$

引入函数符号 J , 目标函数为:

$$J(\mu, K, k, Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^M (F_K - C_{K,i})^2 \Rightarrow 0 \quad (18)$$

式中

$C_{1,i}$: $C_{1,i}$; $C_{2,i}$: $C_{2,i}$; $C_{3,i}$: $C_{3,i}$; $C_{0,i}$: $C_{0,i}$; $C_{4,i}$: $C_{4,i}$; $C_{A,i}$: $C_{A,i}$; C_1 : C_1 ; C_2 : C_2 ; C_3 : C_3 ; C_0 : C_0 ;
 C_4 : C_4 ; N : 试验数组; M : 状态变量个数; $C_{K,i}$: 进水各状态变量测定值。

氮、磷模型均按同样步骤构造目标函数。由于多级塘各塘内的生物群落, 营养水平及生物化学水平等均不同, 各塘的动力学参数亦不同。运用本试验获得的数据, 将碳、氮、磷模型对各塘分别进行估值。

本模型为一非线性且包含超越函数的方程组, 所估参数均应大于零, 故采用约束变尺度法对模型进行参数估值, 约束条件见式(19), 估值结果见表4、5、6。

$$\mu, K, k, Y > 0 \quad (19)$$

表4 碳模型参数
Table 4 Parameters of carbon model

参数 Parameters	第1塘 Pond 1	第2塘 Pond 2	第3塘 Pond 3
Y	0.323	0.195	0.185
μ_{BC}	1.003	0.126	0.090
μ_{AC}	12.975	3.407	7.456
K_{BC}	0.001	0.001	2.689
K_{AC}	0.129	0.123	0.051
k_{ABC}	0.327	0.120	0.068
k_{BC}	0.221	0.001	0.159
k_{LC}	0.001	0.001	0.071
k_{SC}	0.200	0.203	0.297

表5 氮模型参数
Table 5 Parameters of nitrogen model

参数 Parameters	第1塘 Pond 1	第2塘 Pond 2	第3塘 Pond 3
μ_{BN}	0.574	0.080	0.001
μ_{BN}	0.680	0.697	0.195
μ_{AN}	12.026	13.649	2.152
K_{BN}	0.001	10.414	2.529
K_{AN}	0.001	9.953	8.811
k_{ABN}	0.981	0.313	0.001
k_{AN}	0.412	0.001	0.011
k_{LN}	0.001	0.001	0.001
k_{BN}	0.001	0.346	0.104

3. 灵敏度分析

由于试验过程中存在着许多不确定因素, 这些不确定因素会给所估参数的可靠性带来问题。为了对估值的可靠性进行评价, 应用了灵敏度分析的方法。

灵敏度分析是近几十年来发展起来的一种系统工程的方法。主要用于研究在系统最优化及最优控制中种种不确定因素的影响。

灵敏度分析的结果表明, 第1塘绝大多数变量及其运行状态是合理的, 估出的参数可靠。第2、第3塘多数参数的灵敏度曲线属于不敏感曲线, 出现这样的结果亦是合理的。因为稳定塘系统的运行状态很复杂, 后级塘状态变量的变化情况直接受制于前级塘的运行状况, 因而后级塘状态变量变化的可预见性比前级塘要低。在下面将讨论的模型检验中, 可看到本模型的参数估值结果是基本合理且适用的。

表6 磷模型参数
Table 6 Parameters of phosphorus model

参数 Parameters	第1塘 Pond 1	第2塘 Pond 2	第3塘 Pond 3
μ_{BP}	0.369	0.316	0.052
μ_{AP}	8.686	0.167	0.011
K_{BP}	6.962	0.001	0.009
K_{AP}	0.001	0.001	0.001
k_{ABP}	0.001	0.001	0.001
k_{BP}	0.028	0.001	0.001
k_{LP}	0.028	0.001	0.001
k_{SP}	0.161	0.191	0.144

三、模型检验

1. 模型的求解

本模型中碳及氮模型的求解均需解四维非线性方程组,磷模型求解则需解三维非线性方程组。由于非线性方程组除一些特例外没有解析解法,故模型求解只能采用数值方法。本文采用修正的 Marquardt 法求解模型。该法是专门为解平方和形式表达式的最小值问题而设计的一种数值算法。下面以碳模型为例说明表达式的构造方法。先对式(2)~(5)进行整理,整理为式(14)~(17)的形式,则目标函数可表达为式(20)的形式。

$$Z(C_1, C_2, C_3, C_4) = \sum_{t=1}^M (F_t - C_{t,i,m})^2 \Rightarrow 0 \quad (20-1)$$

式中

M : 状态变量个数;

C_1 : C_{11} ;

C_2 : C_{21} ;

C_3 : C_{31} ;

C_4 : C_{41} ;

$K_{k,i,m}$: 各状态变量的进水测值

约束条件:

$$C_1, C_2, C_3, C_4 > 0 \quad (20-2)$$

2. 模型检验

建立数学模型的完整过程应包括:(1)模型的建立;(2)模型的参数估值;(3)模型的检验。

建立模型的目的是为了揭示生物稳定塘的本质,为设计和管理提供有益的信息。由于各种环境因素如光强、温度等因素的影响,室内塘与室外塘会有很多差别,因而建立在试验基础上的模型能否较好地描述实地塘的特征,应采用实地塘的数据加以检验。

本研究中采用比较模型计算值与实测值之差的方法对模型进行检验。模型检验所使用的数据取自西南市政设计院的室外实验塘及武汉墨水湖中试塘。在模型检验中,求解模型时对有关参数进行了温度和光强修正。

模型检验结果表明,多数模型计算值与实测值吻合较好,证明模型构造合理,参数适用,解法成功,很好地体现了物质守恒定律。将模型用于室外塘春、夏、秋、冬四季运转情况的模拟取得了良好的结果,说明本稳态模型有能力表现塘运转的动态规律。

检验结果还表明模型用于实地塘模拟时,有机碳模拟值较实测值低,经分析这是由于未考虑底泥再分解过程造成的。

四、模型的应用

前面的分析表明,本模型能较全面地反映塘内主要生物及生物化学反应特征,更清楚地描述生物稳定塘处理废水的机理。除此之外,模型也可应用于实际工作。首先,模型可应用

于设计,模型还可用于预测多种条件下水质参数的变化情况,以供稳定塘运行管理时参考。

五、结论与建议

1. 本研究首次较系统地在试验基础上建立了生物稳定塘系统内碳、氮、磷营养物质转移规律的综合生态学模型,并对模型进行了全面参数估值。

2. 参数的灵敏度分析及用实地塘数据对模型的检验结果表明:(1)模型构造合理,总体上能够反应碳、氮、磷在生物稳定塘正常运转状态下的迁移转化规律,反应塘内生物及生物化学反应的本质;(2)模型解法合理成功,模型较好地体现了物质守恒定律;(3)本模型虽是稳态模型,但有能力表现稳定塘工作的动态规律。把一年四季划分为4个时间段,在每个时间段上应用本模型进行塘运行状态的描述是成功的。(4)模型考虑的微观过程比较细致,描述各个过程的参数受制因素较少。应用实地塘数据所进行的检验说明以试验为基础所估出的参数基本适用;(5)应用实地塘数据所进行的检验说明,本模型的主要缺陷是未考虑底泥的再分解过程。建议在获取更多的实验数据的基础上,对模型进行进一步检验和修正,使其更加完善。

参 考 文 献

- [1] Buhr, H.O. & S.B. Miller, *Water Res.*, 1983, 17(1):29—37.
- [2] Fritz, J.J., *JWPCF.*, 1979, 51(11):2724—2743.
- [3] Ferarra, R.A. & D.R.F. Herleman, *J. Environ. Eng. Div., ASCE.*, 1982, 108(EE1):37—54.
- [4] Odum, E.P., 《生态学基础》, 人民教育出版社, 1981.

AN ECOLOGICAL MODEL FOR BIOLOGICAL STABILIZATION POND

Wen Xiang-Hua

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing, 100086)

Qian Yi Gu Xia-Sheng

(Environmental Engineering Department, Qinghua University, Beijing)

This study systematically dealt with an ecological model which describes the transformation of carbon, nitrogen and phosphorus in a biological stabilization pond system, based on experimental data. Parameter sensitivity analysis and model verification using field pond operation data have been done. It was showed that the model is reasonal in configuration and capable of reflecting the pond characteristics accurately, and the parameters in model are appropriate for pond system. The study also showed that the model may have a wide perspective of application.

Key words: biological stabilization pond, ecological model, transformation of carbon, nitrogen and phosphorus.