

# 稳定塘问题

## 生物稳定塘系统物质转移平衡图研究

文湘华

钱 易 顾夏声

(中科院生态环境研究中心)

(清华大学)

物质转移规律是生态学的重要研究课题之一,物质在环境中的转移、循环及平衡保证了生态系统的稳定性。生物稳定塘是一个比较复杂的半人工生态系统,其中发生着多种多样的物质转移过程,这些过程决定着稳定塘的特性和工作状况。Mckinney<sup>[1]</sup>指出,营养物质的循环是稳定塘内营养物质去除的主要途径,Houng<sup>[2]</sup>指出,稳定塘的良好运转必须以保证塘内营养物质的平衡为前提。鉴于塘内物质转移及平衡的重要性,以往的研究者们在这一领域进行了一些研究工作<sup>[3~6]</sup>,但从生态学角度,系统研究塘内营养物质转移规律的报告尚少。本研究旨在以生态学基本思想为指导,运用稳定塘生态学模型<sup>[7]</sup>,计算并绘制塘内主要营养元素碳、氮、磷转移平衡图,以期形象、深刻地揭示塘系统的工作机理,指导塘系统的设计和运行管理。

### 一、模型简介

笔者在系统试验的基础上建立了生物稳定塘系统内碳、氮、磷转移规律的生态学模型<sup>[7]</sup>,对模型进行了全面参数估值和估值的灵敏度分析,并用实地塘数据对模型进行了检验。分析及检验结果表明模型结构合理,参数适用,解法成功。模型如方程(1)~(12)所示。状态变量的意义及单位如表1所示。方程中角标“i”表示状态变量的进水测值。模型主要由涉及生物增长的Monod方程(参数 $Y, K, \mu$ )和涉及其它生化反应过程如微生物分解( $k_d$ )、自溶( $k_i$ )和沉淀( $k_s$ )等的一级反应方程两种子模型构成。

碳:

$$\frac{C_{bi}}{\theta} - \frac{C_i}{\theta} + (1-Y)\mu_{mBC} \frac{C_0}{K_{BC} + C_0} \cdot C_B/Y + k_{LBC} \cdot C_B + k_{LAC} \cdot C_A - \mu_{mBC} \frac{C_1}{K_{AC} + C_1} \cdot C_A \cdot f(I) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_{bi}}{\theta} - \frac{C_B}{\theta} + \mu_{mBC} \frac{C_0}{K_{BC} + C_0} \cdot C_B - k_{LBC} \cdot C_B = 0 \quad (2)$$

$$\frac{C_{oi}}{\theta} - \frac{C_0}{\theta} + \mu_{mBC} \frac{C_0}{K_{BC} + C_0} \cdot C_B/Y + K_{LC} \cdot C_A = 0 \quad (3)$$

$$\frac{C_{Ai}}{\theta} - \frac{C_A}{\theta} + \mu_{mAC} \frac{C_1}{K_{AC} + C_1} \cdot C_A \cdot f(I) - k_{LAC} \cdot C_A - K_{LC} \cdot C_A - K_{SC} \cdot C_A = 0 \quad (4)$$

氮:

$$\frac{N_{bi}}{\theta} - \frac{N_i}{\theta} + a_N \cdot N_0 + k_{LBN} \cdot N_B + k_{LAN} \cdot N_A - \mu_{mBN} \frac{N_1}{K_{BN} + N_1} \cdot N_B - \mu_{mAN} \frac{N_1}{K_{AN} + N_1} \cdot N_A \cdot f(I) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{N_{bi}}{\theta} - \frac{N_B}{\theta} + \mu_{mBN} \frac{N_1}{K_{BN} + N_1} \cdot N_B - k_{LBN} \cdot N_B = 0 \quad (6)$$

$$\frac{N_{oi}}{\theta} - \frac{N_0}{\theta} - a_N \cdot N_0 + K_{LN} \cdot N_A = 0 \quad (7)$$

$$\frac{N_{Ai}}{\theta} - \frac{N_A}{\theta} + \mu_{mAN} \frac{N_1}{K_{AN} + N_1} \cdot N_A \cdot f(I) - k_{LAN} \cdot N_A - K_{LN} \cdot N_A - K_{SN} \cdot N_A = 0 \quad (8)$$

磷:

$$\frac{P_{bi}}{\theta} - \frac{P_i}{\theta} + k_{LBP} \cdot P_B + k_{LAP} \cdot P_A - \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B - \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(I) + K_{LP} \cdot P_A = 0 \quad (9)$$

$$\frac{P_{B_2}}{\theta} - \frac{P_B}{\theta} + \mu_{mBP} \frac{P_T}{K_{BP} + P_T} \cdot P_B - k_{LBP} \cdot P_B = 0 \quad (10)$$

$$\frac{P_{A_1}}{\theta} - \frac{P_A}{\theta} + \mu_{mAP} \frac{P_T}{K_{AP} + P_T} \cdot P_A \cdot f(I) - k_{LAP} \cdot P_A - K_{LP} \cdot P_A - K_{SP} \cdot P_A = 0 \quad (11)$$

光强函数

$$f(I) = \frac{I_{\infty}}{I_m} \exp\left(1 - \frac{I_{\infty}}{I_m}\right) \quad (12)$$

模型中的变量

表 1

| 名 称      | 符 号   | 单 位  |
|----------|-------|------|
| 无机碳浓度    | $C_i$ | mg/L |
| 菌体含碳浓度   | $C_b$ | mg/L |
| 溶解性有机碳浓度 | $C_o$ | mg/L |
| 藻体含碳浓度   | $C_a$ | mg/L |
| 无机氮浓度    | $N_i$ | mg/L |
| 菌体含氮浓度   | $N_b$ | mg/L |
| 溶解性有机氮浓度 | $N_o$ | mg/L |
| 藻体含氮浓度   | $N_a$ | mg/L |
| 溶解性总磷浓度  | $P_T$ | mg/L |
| 菌体含磷浓度   | $P_b$ | mg/L |
| 藻体含磷浓度   | $P_a$ | mg/L |

## 二、物质转移平衡图的绘制及分析

为了系统认识稳定塘系统的工作机理,笔者运用上述模型对稳定塘的常规运行状态进行了模拟<sup>[7]</sup>(模拟的进水水质见表 2),并根据模

型计算出状态 1 及状态 3 条件下各塘内各状态变量的现存量及转移量,并按一定比例描绘各塘内营养物质的转移量,绘出的物质转移平衡图如图 1~6 所示。图中方框内的数字为各状态变量的现存量,箭头所指为转移量,单位均为 mg/d。下面将分别对各元素的转移平衡图进行分析。

### 1. 碳元素

有机碳与常规有机物测定指标 COD 之间有一定的相关关系。根据 Isao Somiya<sup>[6]</sup>的统计, COD 与有机碳之比在 2.7~3.4 之间,在本研究的试验中这一比值的测值为 3.0。因而,在一定条件下,可以用有机碳( $C_o$ )的测定或计算值表征有机物浓度。

模拟进水水质

表 2

| 状态编号     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5      |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 水质       |       |       |       |       |        |
| $C_{oi}$ | 24.00 | 48.00 | 72.00 | 96.00 | 120.00 |
| $TN_i$   | 14.20 | 19.00 | 23.80 | 28.60 | 33.40  |
| $N_{ii}$ | 2.13  | 2.85  | 3.57  | 4.29  | 5.01   |
| $N_{oi}$ | 12.00 | 16.15 | 20.23 | 24.31 | 28.39  |
| $PT_i$   | 1.47  | 1.97  | 2.46  | 2.96  | 3.46   |

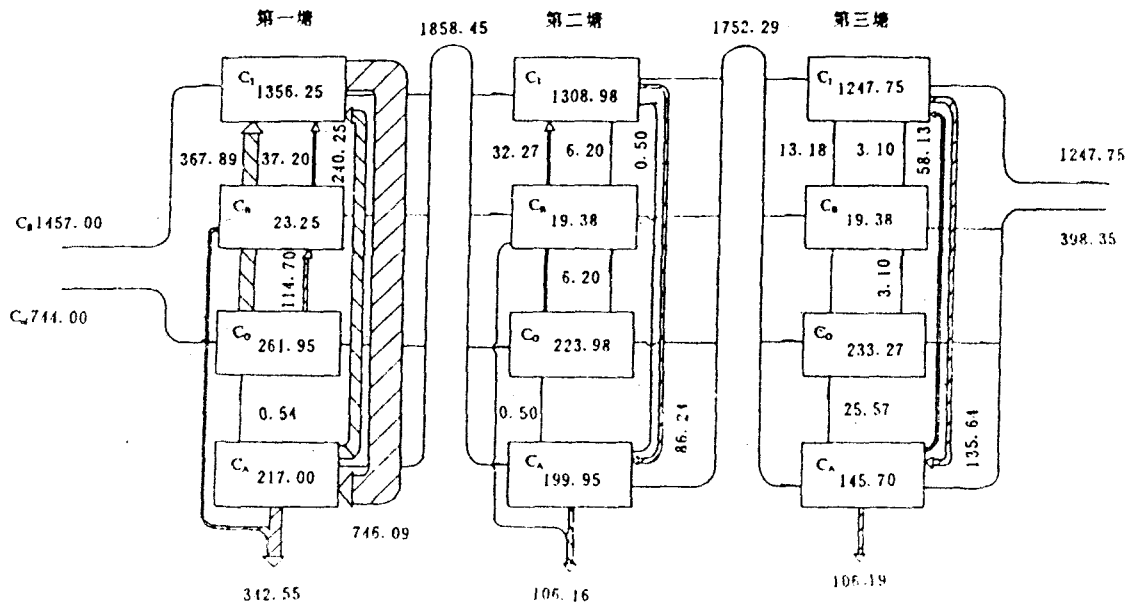


图 1 碳元素转移图(状态 1)

碳元素在状态 1 及状态 3 条件下的物质转移平衡图见图 1、图 2。平衡图表明塘内碳元素

有四种存在形式:溶解性无机碳( $C_i$ );菌含碳( $C_b$ );溶解性有机碳( $C_o$ )和藻含碳。并有七种转

移途径:(1)细菌分解溶解性有机碳并合成菌体细胞;(2)细菌衰亡形成无机碳;(3)溶解性有机碳在细菌作用下分解为无机碳;(4)藻利用无机碳,经光合作用生成藻细胞;(5)藻体衰亡分解形成无机碳;(6)藻体自溶形成有机碳;(7)藻体沉淀。

#### (1)有机碳 $C_o$

状态 1 条件下有机碳共去除 68.65%,第一塘去除了 64.79%;状态 3 有机碳共去除 85.

96%,第一塘去除了 80.51%。从图中可清楚地看出各种碳元素之间的转移通量都在第一塘出现最大值,说明碳元素的转移量与有机碳的去除密切相关。塘内碳元素迁移转化活跃,转移通量大,则有机碳的去除量亦大。状态 1 与状态 3 转移通量的差别也证明了上述论点。状态 3 的转移通量明显比状态 1 的转移通量大,这是因为状态 3 的进水有机碳较状态 1 高,有机碳的去除率也高。

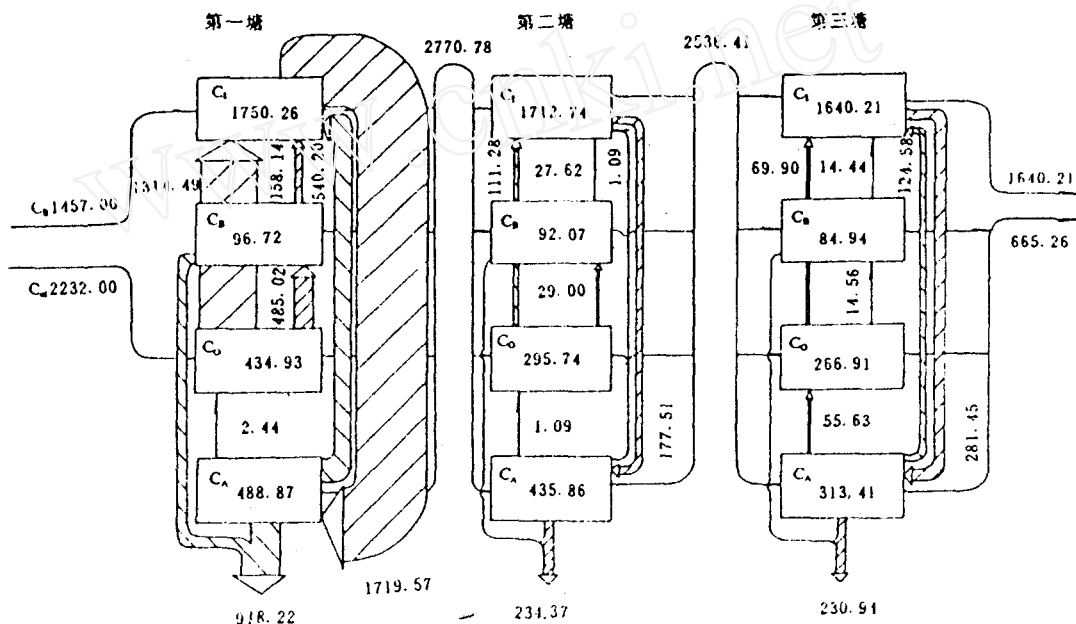


图 2 碳元素转移图(状态 3)

由于有机碳在第一塘的迁移转化最活跃,我们对有机碳在第一塘的转移归宿进行了分析。首先根据平衡图的数据计算出各种转移归宿所占的比例,列于表 3。从表中数据可以看出状态 1 条件下有机碳转移归宿量的关系是:沉积物>藻量>菌量。此时系统中无机碳数量非但没有因为有机碳的转化而有所增加,相反却有减少。其原因是因为菌分解有机碳而产生的无机碳不能满足藻类生长的需要,无机碳蓄库发挥了调节作用,支付出部分无机碳作为藻生长的营养。状态 3 条件下转移归宿量的关系是,沉积物>藻量>无机碳量>菌量。此时无机碳蓄库略有增加。原因是此时细菌分解有机碳所产生的无机碳量大于藻类活动所需的无机碳

量。转移平衡图还明显地表明沉积物的主要来源是藻。状态 1 条件下沉积物中藻占 84.16%,状态 3 条件下沉积物中藻占 74.93%。状态 1 条件下去除的溶解性有机碳有 58.30%转入了藻,状态 3 条件下去除的溶解性有机碳有 52.74%转入了藻。由此可见藻类的生长对生物稳定塘去除废水中有机物起了极其重要的作用,藻体是生物稳定塘中一个最大的能源及营养物贮源。

藻体在进入受纳水体之后,由于营养环境的变化,将会通过自溶分解、腐烂等途径解体,这势必释放大量的营养物质,加快水体的富营养化过程。在夏季水温高时,藻体可通过群体调节,大量繁殖形成水华。因而除藻是采用生物稳

定塘技术时必须给予高度重视的一个步骤。

第一塘有机碳的各种转移归宿 表 3

| 有机碳                  | 归宿    | 状态 1   | 状态 3  | 备注                                      |
|----------------------|-------|--------|-------|-----------------------------------------|
| $\frac{C_{ot}}{100}$ | $C_i$ | -13.53 | 13.14 | ①单位: % ②状态 1 的 $C_i$ 负值表示 $C_i$ 减少量的百分数 |
|                      | $C_b$ | 3.12   | 4.32  |                                         |
|                      | $C_a$ | 23.36  | 21.91 |                                         |
|                      | 沉淀    | 38.31  | 41.14 |                                         |
|                      | 去除    | 64.79  | 80.51 |                                         |

从上面的分析还可以看出生物稳定塘充分利用了菌、藻两种生物的协同效应,这与人工生物处理有许多不同。以碳的转移情况看,人工生物处理系统中有机碳转移的最终归宿主要是细菌体和  $CO_2$ 。通过细菌体(污泥)的沉淀和人工曝气使  $CO_2$  逸出,废水中有机碳得以大大减少,人工曝气主要起着供氧的作用。显然这种人工

系统既消耗了能源又浪费了碳源,还必须设置污泥处理的装置,使增殖的细菌体稳定化。在稳定塘系统中,菌生命活动所需的氧源于藻的生命活动,藻又充当细菌分解有机碳所产生的  $CO_2$  的受体,使碳源的回收成为可能。因此,从  $O_2$  源的提供及  $CO_2$  的归宿上看,稳定塘系统均比人工生物处理系统要经济。从碳转移的食物链看,稳定塘中的食物链比人工生物处理中的食物链长,使稳定塘的运转稳定性要高些。但为了实现废水稳定化的目的,稳定塘系统必须进行藻类的后处理。为了充分发挥稳定塘的经济效益,还应考虑藻的再利用或水生植物、水生动物的养殖。以上论述清楚地说明了稳定塘去除废水中有机物的机理及其与人工生物处理过程机理的差别。

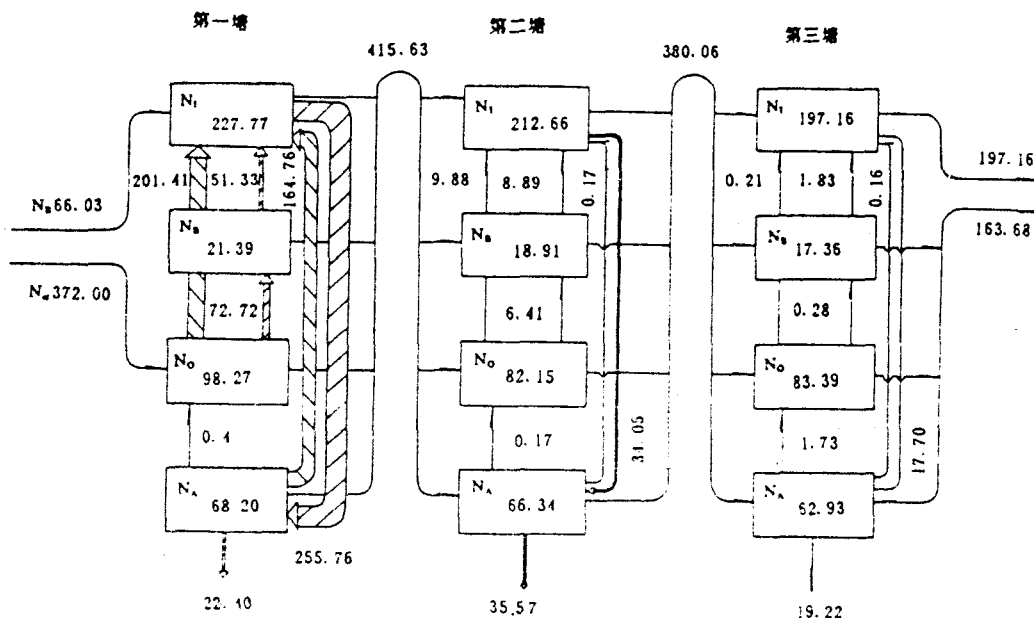


图 3 氮元素转移图(状态 1)

## (2) 无机碳 $C_i$

从转移图可以看出状态 1 条件下无机碳蓄库略有减少,状态 3 条件下无机碳蓄库略有增加,原因已经在前面的讨论中进行了分析,但总的说来无机碳蓄库是相对稳定的。无机碳蓄库的稳定,说明在生物稳定塘系统中处于迁移转化过程中的碳比较活跃,藻类生命活动所利用

的  $CO_2$  主要源于细菌对有机碳的分解,  $CO_2$  的授受关系正是菌、藻之间发生联系的重要一环。

## 2. 氮元素

氮元素的迁移转化过程非常复杂,尚存在许多盲点。本研究利用平衡图对氮的转移过程作一些初步的分析。氮元素的转移平衡图见图 3 及图 4。我们假设塘内的氮元素有四种存在形

式:溶解性无机氮( $N_i$ );菌含氮( $N_b$ );溶解性有机氮( $N_o$ )和藻含氮( $N_A$ ),并有七种转移途径:  
(1)细菌分解溶解性有机氮生成无机氮;(2)细菌利用无机氮合成菌体;(3)菌体衰亡生成无机氮;(4)藻利用无机氮经光合作用合成藻体;(5)藻衰亡生成无机氮;(6)藻自溶形成有机氮;(7)藻体沉淀。

### (1)有机氮 $N_o$

对碳元素的分析说明处于迁移转化过程中的元素比较活跃,氮元素亦如此,因为氮元素的迁移转化与碳元素密切相关,生物体在吸收碳营养的同时,会按一定比例吸收氮营养。有机氮在第一塘减少最多,按照上面的分析,将有机氮在第一塘的转移归宿计算列表,见表4。

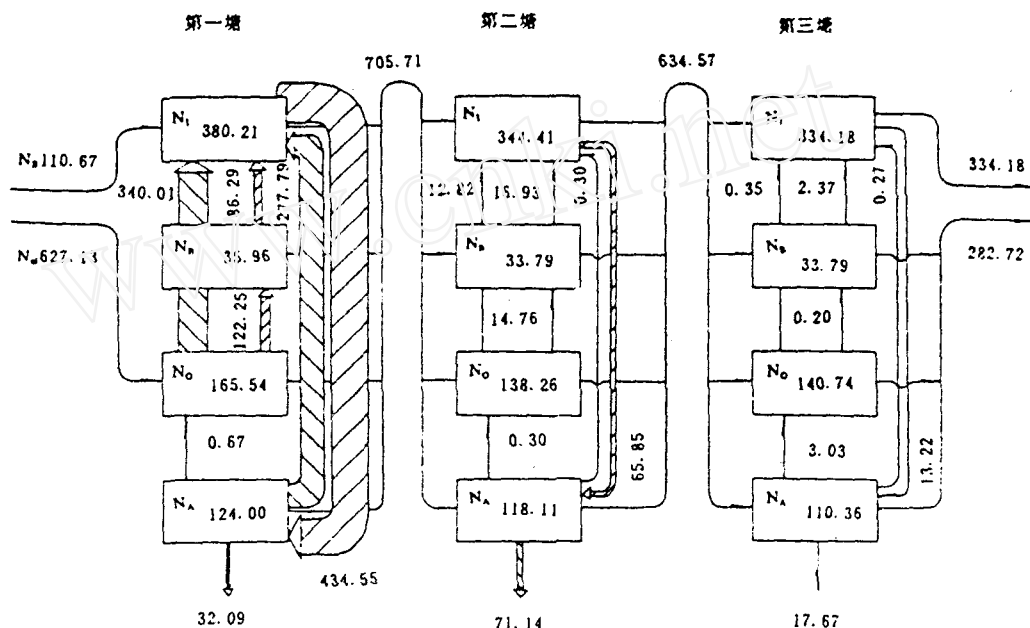


图4 氮元素转移图(状态3)

第一塘有机氮的转移归宿

表4

| 有机氮                  | 归宿    | 状态1   | 状态3   | 备注    |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{N_{oi}}{100}$ | $N_i$ | 43.49 | 42.98 | 单位: % |
|                      | $N_b$ | 5.76  | 5.73  |       |
|                      | $N_A$ | 18.34 | 19.77 |       |
|                      | 沉淀    | 5.99  | 5.12  |       |
|                      | 去除    | 73.58 | 73.60 |       |

从表中可以看出第一塘中有机氮有43%左右转移至无机氮蓄库,此时无机氮大量盈余,没有氮营养限制的情况。溶解性有机氮转移的另一条途径是转移至生物体,转移至藻体及沉积物的量占25%左右,为一个较大的有机氮转移归宿,通过除藻可达到减少废水中氮含量的目的。

### (2)无机氮 $N_i$

从转移平衡图可以清楚地看出无机氮蓄库

在第一塘中增大,在后级塘中无机氮逐步减少。但从整体看系统出水的无机氮浓度高于进水的无机氮浓度。说明尽管管内氮可通过迁移转入生物体而减少,但由于生物的吸收能力有限,因此一般稳定塘不可能有太高的氮去除量。尤其是在进水总氮浓度比较高的情况下,出水中含氮浓度将较高。

### 3. 磷元素

图5及图6是磷元素转移平衡图。我们假设塘中的磷元素有三种存在形式:溶解性总磷( $P_T$ );菌含磷( $P_b$ )和藻含磷( $P_A$ ),并有六种转移途径:(1)细菌利用溶解性磷合成菌体;(2)菌体衰亡生成溶解性磷;(3)藻利用溶解性磷,经光合作用生成藻体;(5)藻体分解形成溶解性磷;(6)藻体沉淀。溶解性总磷在第一塘中的转移归宿列于表5。

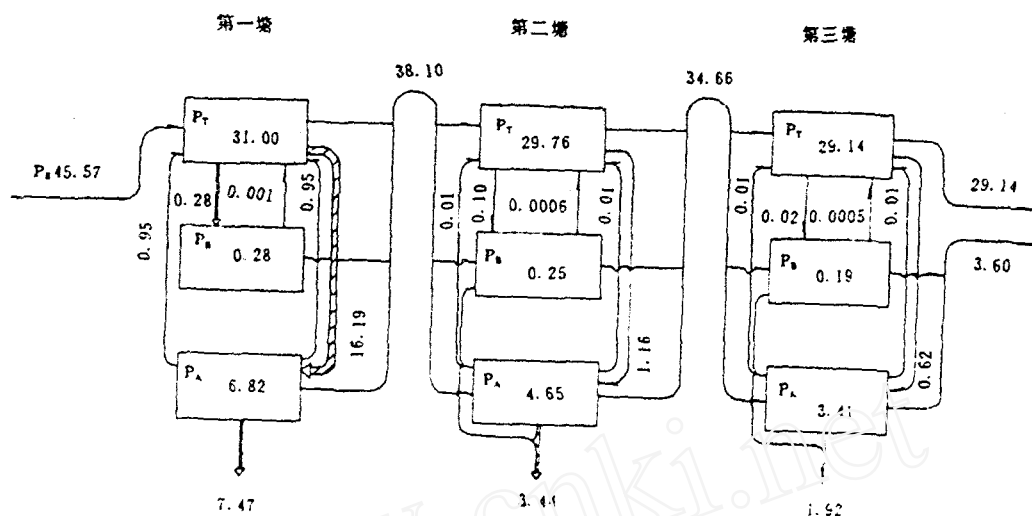


图5 磷元素转移图(状态1)

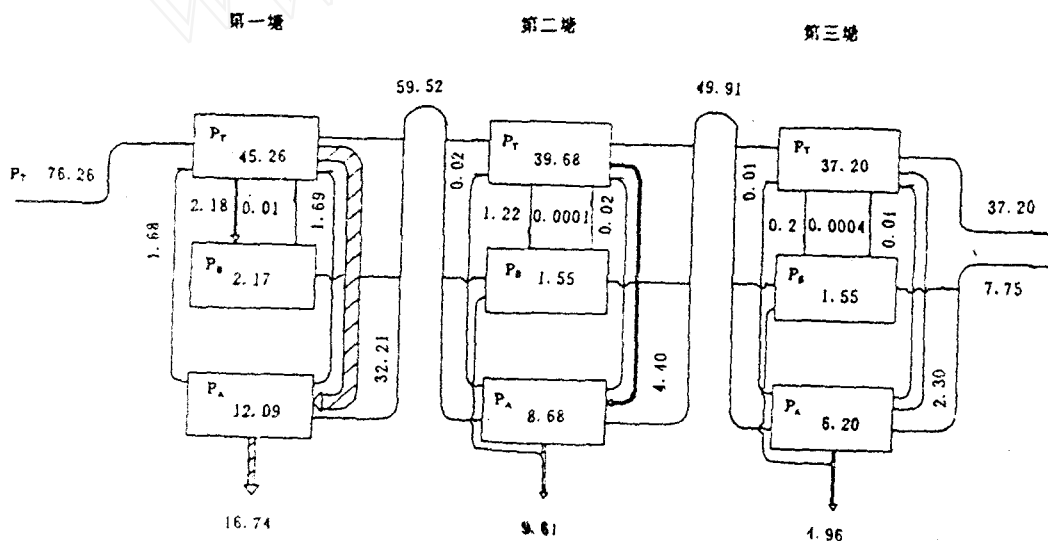


图6 磷元素转移图(状态3)

第一塘溶解性总磷的转移归宿 表5

| 有机碳                  | 归宿    | 状态 | 状态1   | 状态3   | 备注    |
|----------------------|-------|----|-------|-------|-------|
|                      |       |    | 状态1   | 状态3   |       |
| $\frac{P_{T1}}{100}$ | $P_B$ |    | 0.63  | 2.87  | 单位: % |
|                      | $P_A$ |    | 14.95 | 15.84 |       |
|                      | 沉淀    |    | 16.39 | 21.94 |       |
|                      | 去除    |    | 31.97 | 40.65 |       |

从图及表中均可以看到溶解性总磷大部分仍留在自身蓄库中,去除的总磷大部分转入藻体,占31~38%左右,无疑藻也将是磷的一个最大贮源。溶解性总磷只能通过生物的同化作用去除,由于生物的同化能力有限,不能期望塘

系统有过高的磷去除量。

### 三、结论与建议

从上面稳定塘系统物质转移平衡图的分析得到以下几点重要结论与建议:

1. 塘内碳元素的转移量与有机碳的去除量密切相关。当塘内的碳迁移转化活跃,转移通量大时,则有机碳的去除率相应也大。

2. 通过对有机碳转移归宿的分析,深刻揭示了生物稳定塘的工作机理及其与人工生物处理过程机理的不同。生物稳定塘的工作机理主要体现为菌、藻的协同工作及 $O_2$ 和 $CO_2$ 的授受

平衡,溶解性有机碳转移的最终归宿主要是藻体。人工生物处理中 $O_2$ 要靠人为耗能提供, $CO_2$ 没有生物受体。较长的食物链和对生物能源较为充分的利用,正是生物稳定塘比人工生物处理优越之处。

3. 通过对无机氮转移情况的分析表明:无机碳蓄库相对稳定。藻类生命活动所利用的 $CO_2$ 主要源于细菌对有机碳的分解,证明迁移转化过程中的碳比较活跃,易于被生物利用。 $CO_2$ 的授受关系是菌藻关系的重要一环。

4. 对氮及磷的分析表明:氮及磷的去除主要靠生物同化作用完成,由于生物同化能力有限,因而不能期望生物稳定塘有太高的氮、磷去除能力。

5. 藻最终将是一个很大的碳、氮、磷营养元素贮源。同人工生物处理中要对沉淀污泥进行

后处理类似,生物稳定塘系统应把除藻视为重要的后处理工作,并应考虑对藻的利用。

6. 应进一步开展生物稳定塘系统物质转移平衡图的研究。

### 参考文献

- [1] McKinney, R. E. "Ponds as a Wastewater Treatment Alternative", P317, Univ. of Texas (Austin), 1976
- [2] Hough, H. J. & E. F. Gloyna, J. of Environ. Eng. Div, ASCE., 110(3): 550-561, 1984
- [3] Buhr, H. O. & S. B. Miller, Water Res., 17(1): 29-37, 1983
- [4] Frite, J. J., JV/PCF., 51(11): 2743-2724, 1979
- [5] Ferrara, R. A. & D. P. Harleman, J. Environ. Eng. Div, ASCE, 106(E61): 37-54, 1982
- [6] Isao Somya & Shigeo Fujii, water Res. 18(3): 325-333, 1984
- [7] 文湘华"生物稳定塘系统内碳、氮、磷转移规律的研究",清华大学环境工程系申请博士学位论文, 1990. 11

### 会议·信息

## 《第二次全国城市环境保护工作会议》在吉林市召开

第二次全国城市环境保护工作会议于1991年8月15日至19日,在吉林市召开。这次会议是经国务院批准,由国务院环境保护委员会委托国家环保局和建设部联合召开的。李鹏总理对这次会议非常关心,为大会发了贺信;邹家华副总理到会作了重要讲话;国务委员、国务院环境保护委员会主任宋健同志也为大会发了贺信。出席这次会议的有化工部、广播电影电视部、中科院、吉林省、山东省、辽宁省、北京、天津、上海市政府的领导同志。参加会议的共计321名正式代表,其中有27个省、自治区的环保局长、建设厅长或建委主任,67个城市的市长、副市长、秘书长、副秘书长,近60个城市的环保局长、城建局长或建委主任,15个部委局的同志,19个新闻单位的45名记者;列席代表111人。

会议由建设部部长侯捷同志主持致开幕词,并宣读了李鹏总理和宋健国务委员给会议的贺信。会议期间大家认真学习讨论了李鹏总理和宋健国务委员的贺信,

认真听取并讨论了邹家华副总理的重要讲话;讨论了国家环保局长曲格平同志代表国家环保局和建设部所作的工作报告和《关于加强城市环境综合整治工作的若干意见》;听取了辽宁省、山东省、北京、天津、吉林、大连、杭州、兰州、南通、太原、上海、广州、济南、哈尔滨、重庆、安阳等19个省、市在环境综合整治方面的经验;参观了环境综合整治搞得好的吉化公司污水处理厂、染料厂、化肥厂和哈达湾地区的吉林炭素厂、铁合金厂、造纸厂等企业,代表们观看了各厂环境保护工作的录像,参观了重点污染源的防治设施;会议期间代表们还看了吉林市和各地准备的展览图板,会议还交流了各种资料83份。会上还表彰了第一批86个全国城市综合整治优秀项目。

建设部副部长周干峙同志代表国家环保局和建设部在总结中,对今后的工作强调提出:一要进一步加强对搞好城市环境综合整治工作重要性和迫切性的认识;二要制定和完善综合整治规划,并通过落实目标责任制以保证规划的实施;三要加强城市基础设施建设,促进城市环境进一步改善;四要依靠科技进步,促进城市环境的综合整治;五要拓宽资金渠道,扩大资金来源;六要加强立法和执法队伍建设,建立健全城市环境管理体系。

建设部城建司 张淑敏