

# 墨水湖 N/P 水质模型研究

毛荣生

(武汉水利电力大学河流系, 武汉 430072)

黄平

(中山大学环境科学系, 广州 510275)

**提要** 武汉墨水湖 30 多年来因湖周大量城市污水的排入, 造成湖泊严重富营养化, 急需综合规划治理, 因此需研究墨水湖水体污染变化规律, 开展水质模型的研究。针对墨水湖水文、水质、地貌状况, 把整个湖区划分五块(子湖区), 建立分散结构 N/P 水质模型, 提出了一套可行的模型参数识别方法, 并作了模拟检验, 精度令人满意。在分析中运用系统论方法, 并应用计算机现编程序操作。

**关键词** 墨水湖 水质 N/P 水质模型 参数识别

## 1 前言

墨水湖位于武汉市汉阳区西南, 是一个城市中小型浅水湖泊。近 30 多年以来, 随着工农业、乡镇企业及人口的发展, 湖区四周每天约有  $8 \times 10^4 \text{t}$  污水和工业废水不断排入。其中生活污水带入的总氮、总磷分别占其入湖总量的 74% 和 83.1%, 造成湖泊严重富营养化, 部分湖区水质变黑发臭, 严重威胁城市卫生及人民生活健康。

根据墨水湖富营养化的规划治理的急需, 我们在调查、观测、搜集墨水湖水文、水质、地貌等资料的基础上, 研究了墨水湖富营养化氮(N)、磷(P)数学模型及其参数的识别, 并对此模型进行了模拟检验。本文提出的分散结构 N/P 解析模型, 切合实际、形式简单、参数不多、方法新, 可采用 PC-1500A 微机现编程序操作, 便于推广应用。

## 2 墨水湖水污染、水质监测概况

墨水湖海拔约 50m(黄海高程), 湖长 5.10km, 平均湖宽 0.66km, 平均水深 1.30m, 按湖水位 19.00m 计, 湖面积  $3.35 \text{km}^2$ , 容积  $440 \times 10^4 \text{m}^3$ 。湖区汇水面积  $21.90 \text{km}^2$ , 其汇水区域中 60% 以上位于汉阳城区范围内。在该范围内, 有 100 多家工业企业, 一家医院及 16 万多居民, 湖区农田、菜地、动物园及良禽场等, 每天约有  $8 \times 10^4 \text{t}$  城市污水(工业废水及生活污水)通过暗管、明渠、散排等方式进入湖体。全年污水总量达  $2667 \times 10^4 \text{m}^3$ , 超过天然补给水总量, 造成墨水湖严重污染。

进入墨水湖的主要排污口有十里铺(1<sup>#</sup>)、七里庙(2<sup>#</sup>)、五里墩(3<sup>#</sup>)、五里新村(4<sup>#</sup>)、纳税港(5<sup>#</sup>), 出湖的排污口为公公咀(6<sup>#</sup>)、螺狮堤(7<sup>#</sup>)(图 1), 入湖 TN、TP 浓度及总量如表 1

收稿日期: 1993 年 7 月 5 日, 接受日期: 1993 年 11 月 22 日。

所示。

表1 排污口入湖TN、TP浓度及总量

Tab. 1 Concentration and total amount of TN and TP in inflows at pollutant discharge ports

排 污 口	入湖水量 (m <sup>3</sup> /d)	TN		TP	
		浓度(mg/L)	总量(kg/d)	浓度(mg/L)	总量(kg/d)
十里铺(1*)	4100	22.2	91.0	0.65	2.66
七里庙(2*)	7400	28.2	208.7	0.85	6.29
五里墩(3*)	4000	16.6	66.4	0.99	3.96
五里新村(4*)	7300	36.5	266.4	1.54	11.2
纳税港(5*)	50000	52.8	2640	1.91	95.5
合 计	72800		3272.5		119.6

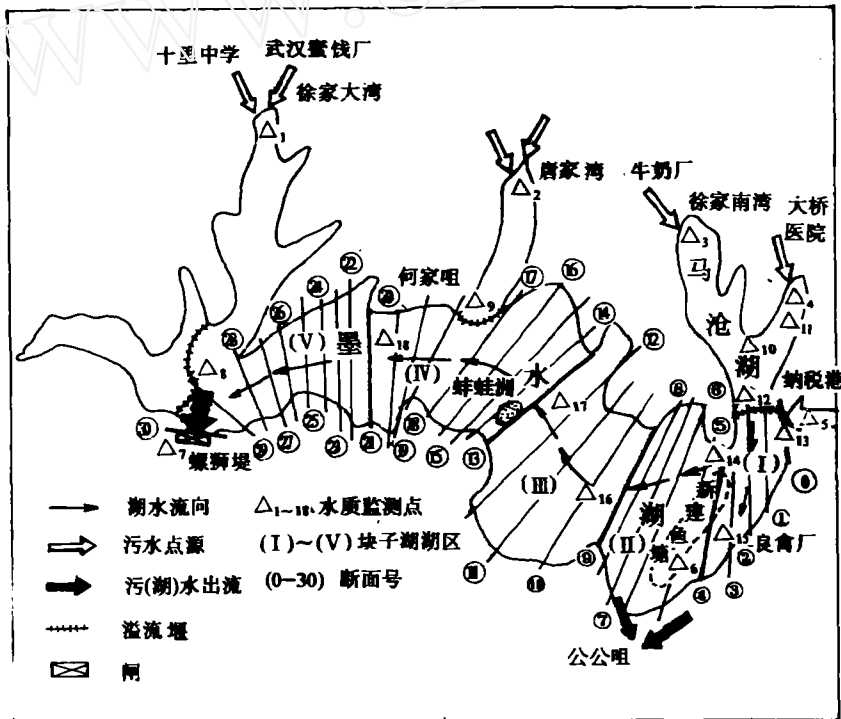


图1 墨水湖水域、水质监测点、湖区分块、断面布设示意图

Fig. 1 Diagram of monitoring stations, lake area, divisions and sectional layouts in Moshui Lake

依据墨水湖污染源分布、水环境特点、湖流流向以及规划治理的要求,从污染物的输入(1\*—5\*入湖排污口),湖水流场分布和输出(6\*、7\*出湖排污口)共布设18个监测点(Δ<sub>1-18</sub>) (图1)。水质监测项目有TN、TP、温度……等,从1984年起按季度进行观测。为建模的需要,并补充加测了若干次水质监测,实测数据按水文、水质作业规范进行。同时还进行了墨水湖现场查勘调查,收集并观测了部分水文、地形资料,如墨水湖水域地形图、湖容曲线,湖区分块(五块)子区容积曲线,进出口流量观测等。

### 3 墨水湖 N/P 水质模拟

N/P 是反映墨水湖富营养化程度的重要指标。N/P 水质模拟的主要内容有: N/P 基本模型的建立; N/P 模型的参数识别; 基本模型的检验等。

#### 3.1 N/P 基本模型的建立

墨水湖属狭长形浅水湖泊, 湖流趋势明显(图 1)。一个方向是从纳税港(5<sup>#</sup>)至公公咀(6<sup>#</sup>), 另一方向则是沿湖的长轴方向, 由纳税港(5<sup>#</sup>)流至螺狮堤(7<sup>#</sup>)。

由于湖泊管理单位要求预测模型简单易掌握, 且应用机型为 PC-1500A, 再加上湖泊为狭长形, 主要入流与出流点在湖泊的头与尾上, 以及水质资料情况等, 故选择一维模型。

根据模拟的需要, 并综合考虑墨水湖的形状、水力条件及实测水质资料等, 拟采用一组对流扩散方程来模拟 N/P 沿长轴方向上的变化过程, 其方程模式为:

$$\left. \begin{aligned} u \frac{dP}{dx} &= D \frac{d^2P}{dx^2} - KP + P_s \\ P(0) &= P_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $u$  表示流速;  $P$  为湖中 N(或 P) 的浓度;  $x$  为湖长;  $D$  为紊动扩散系数;  $K$  为 N(或 P) 的沉淀、降解系数;  $P_s$  为面源负荷;  $P_0$  为 N(或 P) 的起始浓度。

当  $u$ 、 $D$ 、 $P_s$ 、 $K$  为常数时, (1) 式的解为:

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 \cdot \exp(\beta x) + \frac{P_s}{K} [1 - \exp(\beta x)] \\ \beta &= \frac{u}{2D} (1 - \sqrt{1 + 4DK/u^2}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但是, 因墨水湖各区段间的水力条件差异,  $u$ 、 $D$ 、 $K$  等实随湖长( $x$ )而变的, 为简化模型计, 根据该湖监测点的布置, 把墨水湖分为五个子湖区(即  $\Delta_5 - \Delta_{14}$ ,  $\Delta_{14} - \Delta_{16}$ ,  $\Delta_{16} - \Delta_{17}$ ,  $\Delta_{17} - \Delta_{18}$ ,  $\Delta_{18} - \Delta_{27}$ )及 30 个区段(断面  $i \sim i+1$ ,  $i=0, 1, 2, \dots, 29$ ) (图 1), 并令一个子湖区内,  $D$ 、 $K$ 、 $P_s$  为常数, 则不同的子湖区可以有不同的  $D$ 、 $K$ 、 $P_s$ , 流速  $u$  则也随区段而变。经过这样处理, 能较合理地反映流速  $u$  及参数  $D$ 、 $K$ 、 $P_s$  的沿程变化状况。

值得指出的是, 由于出湖流量主要集中在螺狮堤处, 公公咀处占的比例相对很小, 故只考虑湖水 N、P 沿湖长方向的浓度变化。

以下所建立各子湖区首尾断面的浓度关系式, 按两种情况考虑:

#### 3.1.1 旁侧无污染点源排入 子湖区 $\Delta_4 - \Delta_{14}$ , $\Delta_{14} - \Delta_{16}$ , $\Delta_{16} - \Delta_{17}$ 属这种情况。

设  $P_0$  为某子湖区起始断面上的 N(或 P) 浓度,  $P_N$  为该子湖区最末断面的浓度值, 于是按式(2)有:

$$\begin{aligned} \text{第 1 断面: } P_1 &= P_0 \exp(\beta_1 x_1) + \frac{P_s}{K} [1 - \exp(\beta_1 x_1)] \\ \text{第 2 断面: } P_2 &= P_1 \exp(\beta_2 x_2) + \frac{P_s}{K} [1 - \exp(\beta_2 x_2)] \\ &\dots\dots\dots \\ \text{第 } N \text{ 断面: } P_N &= P_{N-1} \exp(\beta_N x_N) + \frac{P_s}{K} [1 - \exp(\beta_N x_N)] \end{aligned}$$

以上式中,  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$  表示断面  $i-1$  至  $i$  的距离;  $\beta_i = \beta|_{x_{i-1}, x_i}$  为断面  $i-1$  至  $i$  之间的流速; 而  $D, K$  分别为该子湖区的扩散系数及沉淀、降解系数。

根据以上递推关系, 可得:

$$P_N = P_0 \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) + \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{K} [1 - \exp(\beta_i x_i)] \cdot \exp\left(\sum_{j=i+1}^N \beta_j x_j\right) \quad (3)$$

当  $i=N$  时, 式中的  $\exp\left(\sum_{j=i+1}^N \beta_j x_j\right)$  规定为 1。

### 3.1.2 旁侧有污染源排入子湖区 $\Delta_{17}-\Delta_{18}, \Delta_{18}-\Delta_7$ 存在这种情况。

设  $P_0$  为某子湖区起始断面的 N(或 P) 浓度, 通过该子湖区起始断面的流量为  $Q_0$ , 而  $P'$  为该子湖区的旁侧入污染浓度, 相应入流为  $Q'$ , 并令其在第  $M$  个区段中流入。于是, 根据以上的推导方法, 不难求得:

$$P_N = \frac{Q'}{Q_0 + Q'} P' \exp\left(\sum_{i=M}^N \beta_i x_i\right) + \frac{Q_0}{Q_0 + Q'} P_0 \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) + \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{K} [1 - \exp(\beta_i x_i)] \cdot \exp\left(\sum_{j=i+1}^N \beta_j x_j\right) \quad (4)$$

式中各项未加说明的符号同(3)式。

## 3.2 模型参数识别

在式(3)或(4)中, 需识别的参数有: 各子湖区的  $D, K$  及  $P_i$ 。为降低识别维数, 减少计算工作量, 我们对墨水湖进行了调查分析, 发现  $\Delta_{17}-\Delta_{18}$  子湖区中面源  $P_i$  影响较大, 而在其它子湖区可以忽略。于是参数识别亦可分为两种情况:

### 3.2.1 不计面源 $P_i$ 的影响 此种情况适合 $\Delta_5-\Delta_{14}, \Delta_{14}-\Delta_{16}, \Delta_{16}-\Delta_{17}, \Delta_{18}-\Delta_7$ 等子湖区。

设某子湖区在始、末断面上有  $NN$  次实测资料, 第  $i$  次始、末断面的实测值分别为:  $PP_0(i)$  及  $PP_N(i) (i=1, 2, \dots, NN)$ , 则该区的参数  $D, K$  便可用以下公式推行优选:

$$\min E = \sum_{i=1}^{NN} [(PP_N(i) - P_N(i))]^2 \quad (5)$$

$$\text{式中: } P_N(i) = \begin{cases} PP_0(i) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) & \text{当识别 } \Delta_5-\Delta_{14}, \Delta_{14}-\Delta_{16}, \Delta_{16}-\Delta_{17} \text{ 三个区的参数时} \\ \frac{Q'}{Q_0 + Q'} P' \exp\left(\sum_{i=M}^N \beta_i x_i\right) + \frac{Q_0}{Q_0 + Q'} PP_0(i) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) & \text{当识别 } \Delta_{18}-\Delta_7 \text{ 区的参数时} \end{cases}$$

$PP'(i)$  表示第  $i$  次旁侧入污浓度的实测值, 其余符号同(4)式的说明。

优选方法程序如下:

首先固定(2)式中的  $D$  值, 然后不断变化  $K$  值, 再固定另一  $D$  值, 再不断变化  $K$  值; 便可得到按(5)式计算的一系列目标函数值  $E, \dots$  最后, 可按最小的  $E$  值来选定  $D$  与  $K$  的值。但在计算中发现, 使目标函数值  $E$  最小的并不是一个点, 而是一条线(图 2, 图中数字为  $E$  值)。因此, 要在此线上寻找所需要的点, 尚应结合参数的物理意义来确定。

本文中的  $D$  为紊动扩散系数, 其量级一般在  $10^{-2}-1\text{m}^2/\text{s}$ ; 沉降系数  $K = v/H$  ( $v$  为沉降速率,  $H$  为水深), 文献[5]给出的沉降速率范围是  $0.1-0.5\text{m}/\text{d}$ , 而墨水湖水深约  $1.0\text{m}$  多,

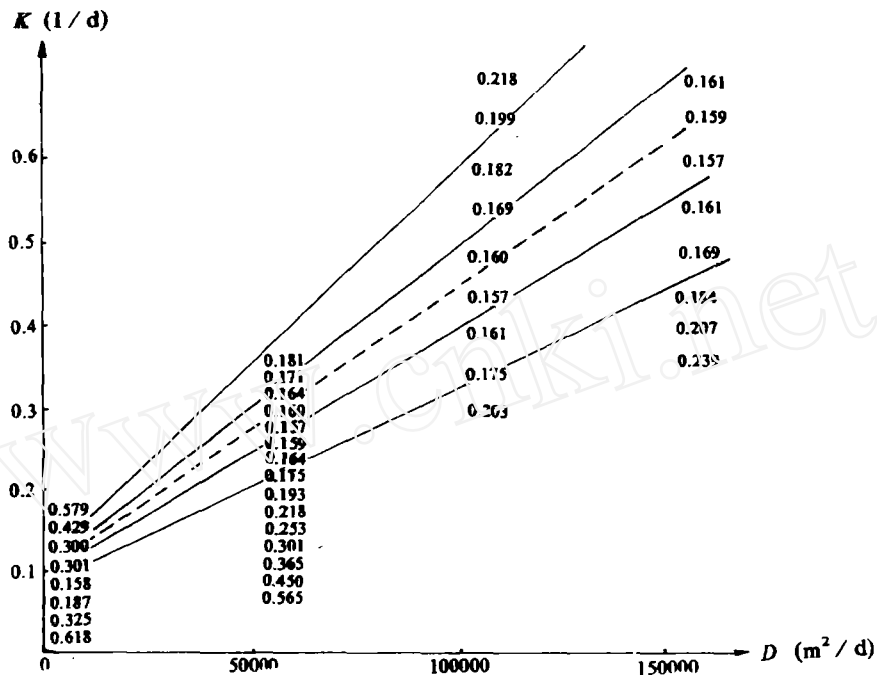


图2 磷模型(I)区目标函数响应面图

Fig. 2 Response plane of objective function of P model in subarea (I)

故沉降系数大致也应在该范围内。文献[5]还给出了P的降解系数为 $10^{-2}(1/d)$ 以下,与沉降系数相比,可忽略不计。

据以上做法,得各区的D、K值如表2所列。

表2 墨水湖分散结构N/P模型参数识别结果

Tab. 2 The results of parameter identification of N/P models with scattered structure in Moshui Lake

湖区分区(子湖区)		(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	马沧湖
		$\Delta_5-\Delta_{14}$	$\Delta_{14}-\Delta_{16}$	$\Delta_{16}-\Delta_{17}$	$\Delta_{17}-\Delta_{18}$	$\Delta_{18}-\Delta_7$	$\Delta_{12}$
P模型	D(m <sup>2</sup> /s)	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
	K(1/d)	0.5	0.21	0.07	0.07	0.04	0.4
	$P_0(g/d \cdot m^3)$	0	0	0	0.026	0	0
N模型	D(m <sup>2</sup> /s)	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
	K(1/d)	0.6	0.16	0.009	0.0004	0.0004	0.25
	$P_0(g/d \cdot m^3)$	0	0	0	0.030	0	0

3.2.2 考虑面源 $P_0$ 的影响 子湖区 $\Delta_{17}-\Delta_{18}$ 属于这种情况。其参数识别按下式进行:

$$\min E = \sum_{i=1}^{NN} [(PP_N(i) - P_N(i))]^2 \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } P_N(i) = & \frac{Q'}{Q_0 + Q'} PP'(i) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) + \frac{Q_0}{Q_0 + Q'} PP_0(i) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^N \beta_i x_i\right) \\ & + \sum_{k=1}^N \frac{P_k}{k} [1 - \exp(-\beta_k x_k)] \cdot \exp\left(\sum_{j=i+1}^N \beta_j x_j\right) \end{aligned}$$

各项符号意义同于上面各式。

在(6)式中,需对  $D$ 、 $K$ 、 $P_0$  三个参数进行识别,但由于前面提到的  $D$ 、 $K$  之间存在着相互补偿的关系,故可参考其它子湖区事先将  $D$  定下来,而对  $K$ 、 $P_0$  进行识别,这样可减少工作量,且可保证参数优选的合理性。例图 3 是 N 模型(IV)区的  $K$ 、 $P_0$  响应面图。这里应加说明的一点是,一般  $P_0$  是作为已知值输入的,但墨水湖的  $P_0$  无实测值,只能将其作为一个参数估计。从估计值来看,是合理的。

墨水湖分散结构 N/P 模型参数按以上方法及原则进行优选,结果见表 2。从表可知,墨水湖 N/P 模型沉淀降解系数  $K$  值沿程(从 I 区至 V 区)由大逐渐变小,这说明污染物输移最初主要是沉淀作用,以后沉淀作用慢慢减弱,这种规律性的变化符合墨水湖的实际。马沧湖( $\Delta_{12}$ 区)位于子湖区(I)的前部,而前者的  $K$  值却低于后者,这主要是因为影响较大的入污口纳税港排污的结果。总之,模型参数识别成果合理,又与墨水湖的实际相符合。

### 3.3 N/P 模型的检验

以若干测次的水质监测资料,分别对各子湖区(I—V)N/P 模型进行检验计算,例见图 4(在图 4 中,测次序号 1—6 的观测数据用于参数识别,序号 7—9 的数据用于预测检验)。

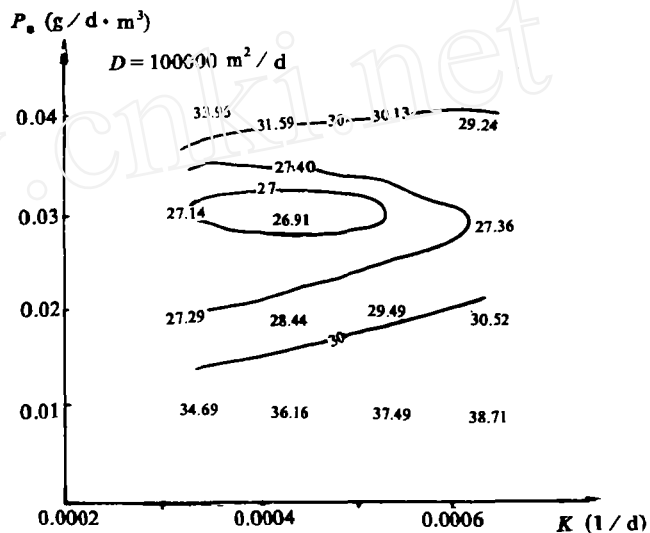


图 3 N 模型(IV)区目标函数响应面图

Fig. 3 Response plane of objective function of N model in subarea (IV)

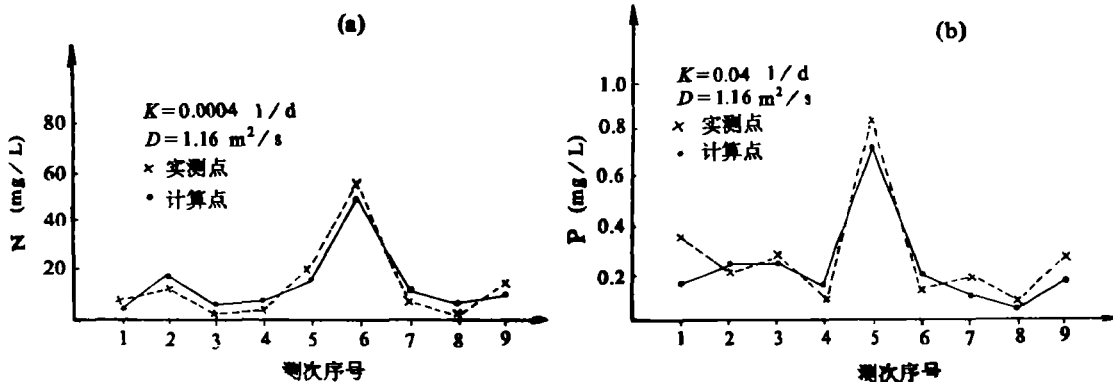


图 4 N 模型(a),P 模型(b)在(V)子湖区检验

Fig. 4 Test of N model (a) and P model in subarea (V) of Moshui Lake

同时我们还以若干测次的水质资料,对全湖区用 N/P 模型进行连续演算检验。即在进口给定初值  $P_0$  及旁侧入污浓度  $P_s$  后,从断面序号 1 直接演算至断面序号 30 的计算检验,

例见图 5。

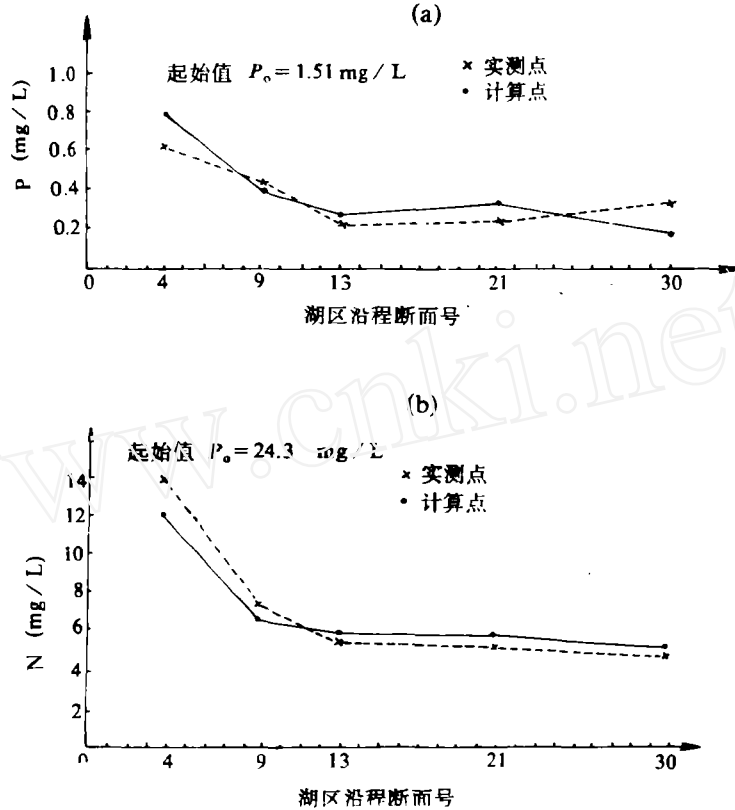


图 5 P 模型(a),N 模型(b)连续演算检验

Fig. 5 Test of P model (a) and N model (b) under continuous calculation

从墨水湖分区计算检验以及连续演算检验的结果可见:多数测次中的大多数的水质监测点据之拟合情况是满意的,证实所提出的 N/P 模型精度较好。

## 4 结 语

(1) 通过调查、监测分析,湖泊严重富营养化是墨水湖污染的主要问题之一。因此,重点研究 N/P 水质模型,对墨水湖规划富营养化的防治及管理具有重要意义。

(2) 结合墨水湖自然地理、水文水质、污染物和污染源的分布,建立分散结构 N/P 解析模型,并作了模拟检验,说明模型切合实际,精度满意,计算湖内任一处的浓度值是有效的。

(3) 本文提出了一套可行的模型参数识别方法,并应用计算机系统识别模型中各参数,方法新颖,具有特色,计算便捷。

(4) 墨水湖系城市中小湖泊水污染典型之一,本文研究提出的墨水湖一整套建模、模型参数识别方法,以及可利用 PC-1500A 微机操作实施,科学合理,简明实用,可供分析城市类似湖泊富营养化模型参考。

## 参 考 文 献

- 1 W·金士博. 水环境数学模型. 北京:中国建筑工业出版社,1987.
- 2 付国伟等. 水污染控制系统规划. 北京:清华大学出版社,1985.
- 3 吴熊勋等. 城市水环境污染控制. 南京:东南大学出版社,1989.
- 4 顾丁锡等. 湖泊水污染预测及其防治规划方法. 北京:中国环境科学出版社,1988.
- 5 W.S. Lung, R. P. Carale and P. L. Freedman. Phosphorus models for eutrophic lakes. *Water Research*, 1976, 10(12): 1107, 1108, 1111—1113.

## STUDY ON N/P WATER QUALITY MODELS IN MOSHUI LAKE

Mao Rongsheng<sup>1</sup> Huang Ping<sup>2</sup>

(1 Department of Rivers, Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072;

2 Department of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

## Abstract

Located in the southeast of Hanyang Prefecture of Wuhan, Moshui Lake is a small-median-size lake with an area of 3.35 km<sup>2</sup>. Being important water resources in local areas, it plays a key role in aquatic farming, irrigation and water supply. In the past 30 years, nearly 8000 tons of waste water per day was discharged into the lake as a result of industrial, agricultural development and population increase. The water quality in the lake is seriously deteriorated, which leads to growing eutrophication. Some parts of the lake are even getting dark or stench. The neighboring people's health and the entertainments of Wuhan Zoo are threatened consequentially.

To meet the urgent needs of comprehensive regulation, control and planning for Moshui Lake, we set up here a N/P water quality model after the pollution sources in Moshui Lake surveyed and its water quality assessed. First Moshui Lake is divided into 5 subareas, each of which contains several small parts. Then in each subarea a scattered structure of N/P model is built, and the parameters of each model are identified respectively. The accuracy of calculation by means of PC-1500A is satisfactory. Finally the systematical theory is introduced in the analysis. The whole calculation is operated by programming computer language.

The model building and parameter identification are advantageous in this method, so it is hopefully convenient for more practical applications.

**Key Words** Moshui Lake, water quality, N/P water quality model, parameter identification