

141-146

太湖磷迁移过程的研究(一)

Ge —— 磷迁移模型的建立

p 343-3

黄文钰 舒金华 吴延根 舒振文*

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要 通过太湖磷的来源途径(入湖河道、湖区径流、湖面沉降、养殖投饵、底泥释放)和湖体各要素(水体、浮游植物、大型水生植物、鱼类等)中磷迁移过程调查资料的分析,建立了描述磷在上述各要素中迁移过程的数学模型,经实测资料验证,模型的计算值与实测值的平均相对误差在9.9%—18.6%,基本反映了磷的迁移过程及动态变化规律,对该湖磷浓度预测及磷资源合理利用具有重要的意义。

关键词 磷, 迁移过程, 模型, 太湖

动态变化规律

迁移模型

太湖位于常州市西南约13km处,是苏南太湖湖群的重要组成部分,湖泊面积164km²,平均水深1.26m,水草覆盖面积(除网围养殖湖区外)93%以上,是一个典型的草型湖泊。近年来,随着湖区经济的迅速发展和人口的急剧增加,大量工业废水和生活污水未经任何处理即排入湖内,加之湖面网围养殖业迅速发展(约占湖泊总面积20%左右),人工投饵量不断增加,致使湖泊污染日益加重,其中以磷污染所带来的富营养化问题尤为关注。本文在该湖磷来源途径和湖泊底泥、水体、生物各要素中磷的变化状态调查的基础上,采用数学模拟的方法,描述可溶性磷和颗粒磷的迁移过程,为该湖富营养化防治对策的制订及磷资源的合理开发利用提供科学依据。

1 磷迁移模型的建立

1.1 磷迁移示意图

根据太湖主要环境特征(草型浅水湖泊)分析,磷在湖体内各要素中的迁移转化过程,可简要地归纳为图1所示。

1.2 磷迁移方程的建立

鉴于磷在湖体各要素中迁移转化的过程十分复杂,影响因素甚多^[1-3],故在模型方程建立的过程中,对诸多的影响因子作了简化处理,仅以图1所示的主要迁移过程为依据,分别建立总可溶性磷(TDP)、颗粒磷(PP)、叶绿素a(A₁)、水草^[6,7](A₂)和鱼类^[8,9](A₃)等五个简单生态模型来描述磷在湖体各要素中的动态变化,按物质平衡原理分析,将各模型方程的表达式归纳如下。

* 国家自然科学基金资助项目(编号:49571056)。

** 河海大学硕士研究生。

收稿日期:1995-5-19;收到修改稿日期:1996-12-25。

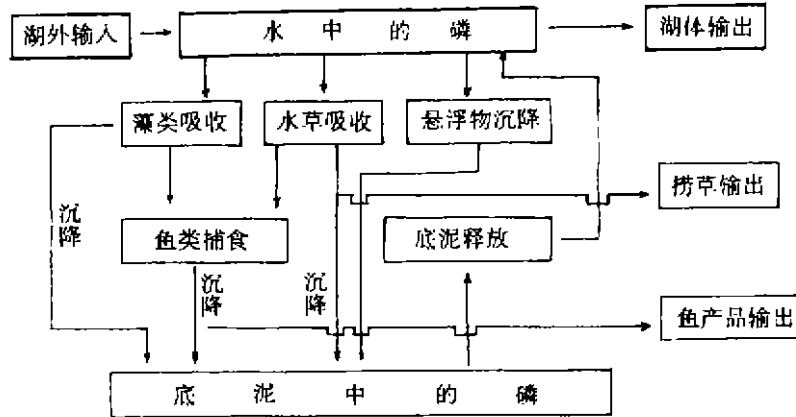


图 1 磷在湖泊环境中的主要迁移途径示意图

Fig. 1 The main ways of phosphorus transportation in Gehu Lake

$$(1) \text{TDP} \quad \frac{d(\text{TDP})}{dt} = \frac{Q_0 \cdot \text{TDP}_0 + Q_1 \cdot \text{TDP}_1 + Q_2 \cdot \text{TDP}_2 + Q_3 \cdot \text{TDP}_3 - Q_5 \cdot \text{TDP}}{Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_5} + \frac{I_1 \cdot S}{Q_0} - A_1 \cdot r_1 \cdot A_{1P} - A_2 \cdot r_2 \cdot A_{2P} \cdot k_2 + \text{PP} \cdot k_1^{T-20} \quad (1)$$

$$(2) \text{PP} \quad \frac{d(\text{PP})}{dt} = \frac{Q_0 \cdot \text{PP}_0 + Q_1 \cdot \text{PP}_1 + Q_2 \cdot \text{PP}_2 + Q_3 \cdot \text{PP}_3 + Q_4 \cdot \text{PP}_4 - Q_5 \cdot \text{PP}_5}{Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_5} + A_1 \cdot r_1 \cdot A_{1P} + A_2 \cdot r_2 \cdot A_{2P} \cdot k_3 - I_2 \cdot S/Q_0 - \text{PP} \cdot k_2^{T-20} \quad (2)$$

$$(3) A_1 \quad \frac{d(A_1)}{dt} = r_1 \cdot A_1 \cdot \left(1 - \frac{A_1}{N_1} - \alpha \cdot \frac{A_2}{N_1} - \epsilon \cdot \frac{A_3}{N_1}\right) \quad (3)$$

$$(4) A_2 \quad \frac{d(A_2)}{dt} = r_2 \cdot A_2 \cdot \left(1 - \frac{A_2}{N_2} - \beta \cdot \frac{A_1}{N_2} - \delta \cdot \frac{A_3}{N_2}\right) \quad (4)$$

$$(5) A_3 \quad \frac{d(A_3)}{dt} = r_3 \cdot A_3 \cdot \left(1 - \frac{A_3}{N_3} + \sigma \cdot \epsilon \cdot \frac{A_1}{N_3} + \lambda \cdot \delta \cdot \frac{A_2}{N_3}\right) \quad (5)$$

在上述微分方程中:

$$r_1 = r_{1\max} f(T_1) \cdot \frac{\text{TDP}}{K_{\text{mf}} + \text{TDP}} \cdot \frac{0.5D}{K_r H} \cdot \exp\left(-\frac{I_s}{I_s} \cdot \exp(-K_e H) - \exp(-\frac{I_s}{I_s})\right) \quad (6)$$

$$r_2 = r_{2\max} \cdot f(T_2) \cdot \frac{0.5D}{K_{ec}} \cdot \ln \frac{2 + (I_m/I_k) \cdot \exp(-k_m Z)}{2 + (I_m/I_k) \cdot \exp(-K_m Z - K_{ec} h)} \quad (7)$$

$$r_3 = r_{3\max} \cdot f(T_3) \quad (8)$$

其中 $f(T_i) = \begin{cases} 0 & \text{当 } T < T_{\min} \text{ 时} \\ \exp\left(-2.3 \cdot \left(\frac{T_{\text{lopt}} - T}{T_{\text{lopt}} - T_{\min}}\right)^2\right) & \text{当 } T_{\min} \leq T \leq T_{\text{lopt}} \text{ 时} \\ \exp\left(-2.3 \cdot \left(\frac{T - T_{\text{lopt}}}{T_{\max} - T_{\text{lopt}}}\right)^2\right) & \text{当 } T > T_{\text{lopt}} \text{ 时} \end{cases}$

$$f(T_2) = \begin{cases} 0 & \text{当 } T < T_{2\min} \text{ 时} \\ \exp\left(-2.3 \cdot \left(\frac{T_{2\text{opt}} - T}{T_{2\text{opt}} - T_{2\min}}\right)^2\right) & \text{当 } T_{2\min} \leq T \leq T_{2\text{opt}} \text{ 时} \\ \exp\left(-2.3 \cdot \left(\frac{T - T_{2\text{opt}}}{T_{2\max} - T_{2\text{opt}}}\right)^2\right) & \text{当 } T > T_{2\text{opt}} \text{ 时} \end{cases}$$

$$f(T_3) = \begin{cases} 0 & \text{当 } T < T_{3\min} \text{ 时} \\ \exp\left(-2.3 \cdot \left|\frac{T - T_{3\text{opt}}}{T_{3\max} - T_{3\text{opt}}}\right|\right) & \text{当 } T \geq T_{3\min} \text{ 时} \end{cases}$$

上述模型方程式符号的含义如表 1 所示。

表 1 模型方程中符号的含义及数值的识别

Tab. 1 The mean and value of equation's symbols

符号	单位	含 义	参数识别	
			数值	来源
TDP	mg/L	湖水中年总可溶性磷浓度	0.029	实测
t	d	模拟计算的时段	30	/
Q_0	10^6m^3	起始时湖泊的容积	2.0664	实测
Q_1	m^3/d	入湖河道入湖的水量	3410958	实测
Q_2	m^3/d	湖区径流入湖水量	36712	实测
Q_3	m^3/d	湖面降水量	438904	实测
Q_4	t/d	投饵料的数量	0.22	实测
Q_5	m^3/d	湖泊出湖水量	3246575	实测
TDP ₀	mg/L	起始时湖水中可溶性磷浓度	0.028	实测
TDP ₁	mg/L	入湖河道水中可溶性磷浓度	0.049	实测
TDP ₂	g/kg	入湖径流中可溶性磷浓度	0.046	实测
TDP ₃	g/kg	湖面降水中可溶性磷浓度	0.03	实测
TDP ₄	g/kg	出湖水中可溶性磷浓度	0.029	实测
f_1	$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	底泥可溶性磷的释放速率	0.32	实测
f_2	$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	湖水中颗粒磷沉降速率	1438	实测
S	10^6m^2	湖底的面积	1.64	实测
A_1	mg/m^3	湖水中Chla的浓度	2.25	实测
A_2	kg/m^2	湖水中水草的现存量	2.0	实测
A_3	kg/m^2	湖水中鱼类的现存量	0.035	实测
r_1	1/d	Chla的增长率	/	计算中间值
r_2	1/d	水草的增长率	/	计算中间值
r_3	1/d	鱼类的增长率	/	计算中间值
A_{1P}	g/kg	Chla的含磷量	12.0	实测校正
A_{2P}	g/kg	水草的含磷量	0.54	实测校正
A_{3P}	g/kg	鱼体的含磷量	6.70	实测校正
N_1	mg/m^3	Chla的最大可能现存量	10.0	实测校正
N_2	kg/m^2	水草的最大可能现存量	10.0	实测校正
N_3	kg/m^2	鱼的最大可能现存量	0.10	实测校正
k_1	1/d	颗粒磷向可溶磷的转化系数	0.05	实测校正
k_2	%	水草从水中吸收磷的系数	10.0	实测校正
k_3	%	水草向颗粒磷的转化系数	0.02	实测校正
K_{mP}	1/d	藻类对磷的吸收系数	0.02	文献

续表

PP	mg/L	湖水中颗粒磷浓度	0.019	实测
PP ₀	mg/L	起始时湖水中颗粒磷浓度	0.016	实测
PP ₁	mg/L	入湖水中颗粒磷浓度	0.059	实测
PP ₂	mg/L	湖区径流中颗粒磷浓度	0.046	实测
PP ₃	mg/L	湖面降水中颗粒磷浓度	0.05	实测
PP ₄	%	饵料中磷的含量	5.20	实测
PP ₅	mg/L	出湖水中颗粒磷浓度	0.019	实测
α		水草对藻类影响的负效应系数	1.69	文献
ϵ		鱼对藻类的捕食系数	100.0	校正
β		藻类对水草影响的负效应系数	0.31	文献
δ		鱼类对水草的捕食系数	100.0	校正
σ		鱼类对藻类的利用系数	10.0	文献
λ		鱼类对水草的利用系数	10.0	文献
T	C	水温	11.9	实测
D	h	平均日照长度	5.50	实测
H	m	湖泊平均水深	1.26	实测
h	m	水草高度	0.45	实测
Z	m	水草顶部至水面距离(H-h)	0.81	实测
I _s	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	藻类半饱和光照强度	850.0	文献
I _k	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	水草半饱和光照强度	300.0	文献
I ₀	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	日平均光照强度	387.3	实测
I _m	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	地方正午最大光照强度	1438.3	实测
K ₁	1/m	无水草水体的消光系数	2.01	实测
K _{es}	1/m	水草群落顶部的消光系数	2.05	实测
K _{ec}	1/m	水草群落内部的消光系数	2.36	实测
r _{1max}	1/d	藻类最大比生长率	3.30	校正
r _{2max}	1/d	水草最大比生长率	0.126	校正
r _{3max}	1/d	鱼类最大比生长率	0.015	校正
T _{1opt}	C	藻类生长最适温度	25.0	文献
T _{2opt}	C	水草生长最适温度	25.0	文献
T _{3opt}	C	鱼类生长最适温度	25.0	文献
T _{1max}	C	藻类生长率下降90%时的最高温度	33.0	文献
T _{2max}	C	水草生长率下降90%时的最高温度	33.0	文献
T _{3max}	C	鱼类生长率下降90%时的最高温度	35.0	文献
T _{1min}	C	藻类生长率下降90%时的最低温度	10.0	文献
T _{2min}	C	水草生长率下降90%时的最低温度	10.0	文献
T _{3min}	C	鱼类生长率下降90%时的最低温度	10.0	文献

2 模型方程的求解

2.1 模型方程求解的原理

以上描述磷在湖体内各要素中迁移过程的数学模型,实质上是由五个一阶微分方程、三个代数方程和八个约束方程所组成的一个较为复杂的生态模型.关键部分是五个微分方程求解的计算.

目前求解微分方程的方法甚多,其中以四阶龙格-库塔法的计算精度较高,且又具有较好的稳定性,故本文采用它作为微分方程求解法.

上述微分方程组中的各项参数,分别为实际测定数值、实测校正数值、分析计算数值、文献

资料参考数值等。本文计算中,以日为计算时段,求得五个生态变量的逐月动态变化,预测某些参数发生变化时,其它参数组分可能发生的变化。

2.2 计算程序

模型中五个生态变量的关系十分密切,彼此之间相互关联,加之整个系统中参数和变量的数量甚多,因而使得模型的调试过程十分复杂。为此,我们在计算过程中,将微分方程按其变量间相互关系进行了计算顺序的安排,并在一步迭代中采用了逐个方程顺序求解的方法,经实际应用,取得了较好的效果。

2.3 模型参数的识别

2.3.1 现场调查测定 模型中的大多数参数,如出入湖河道、湖区径流、湖面降水、养殖投饵、水草现存量、鱼现存量,湖内水文、水质、生物、底质状况及光照条件等,均是采用现场调查方法,逐月测定各项参数的年内变化,各参数的具体数值如表1所示。

2.3.2 室内试验测定 底泥中磷的释放率,是将采集有代表性的底泥样品,在实验室内模拟现场的pH值、温度、氧化还原电位等条件,进行底泥中磷释放量的测定(表1)。

2.3.3 文献资料校正确定 如鱼类、水草、藻类生长的最适温度,最大比生长率,藻类和水草半饱和光照强度等,均是在查阅有关文献^[1-3,10-12]资料的基础上,结合涡湖的实际情况进行校正,或是直接选用文献值(表1)。

表2 可溶性磷、颗粒磷、叶绿素、水草、鱼类等模型计算值与实测值的比较
Tab. 2 A comparison of the observed values and the model calculated values of TDP, PP, Chla, macrophyte, fish in Gehu Lake

月份	TDP			PP			A ₁			A ₂			A ₃		
	计算值 (mg/L)	实测值 (mg/L)	误差 (%)	计算值 (mg/L)	实测值 (mg/L)	误差 (%)	计算值 (mg/m ²)	实测值 (mg/m ²)	误差 (%)	计算值 (kg/m ²)	实测值 (kg/m ²)	误差 (%)	计算值 (kg/m ²)	实测值 (kg/m ²)	误差 (%)
1	0.024	0.031	-22.6	0.017	0.016	6.3	1.46	1.50	-2.7	1.39	1.45	-4.1	0.0065	0.0066	8.3
2	0.029	0.028	3.6	0.017	0.015	13.3	1.42	1.20	18.3	1.39	1.35	3.0	0.017	0.016	6.3
3	0.040	0.025	20.8	0.015	0.016	-6.3	1.42	1.54	-7.6	1.42	1.71	-17.0	0.018	0.018	0.0
4	0.038	0.041	-7.3	0.020	0.018	11.1	1.44	1.53	-11.7	1.39	1.60	-13.1	0.020	0.020	0.0
5	0.024	0.031	-22.6	0.016	0.016	0.0	2.34	2.50	-6.4	1.72	1.61	6.8	0.031	0.026	19.2
6	0.026	0.023	13.0	0.026	0.026	0.0	2.38	2.16	10.2	1.84	1.60	15.0	0.037	0.034	8.8
7	0.027	0.025	8.0	0.020	0.017	17.6	2.38	2.31	3.0	2.50	2.87	-12.9	0.044	0.046	-4.3
8	0.029	0.021	31.8	0.019	0.017	11.8	2.43	2.92	-16.8	2.96	3.50	-15.4	0.052	0.060	-13.3
9	0.028	0.019	47.4	0.023	0.020	15.0	2.40	3.82	-37.2	3.37	3.65	-7.7	0.065	0.074	-12.2
10	0.034	0.032	6.3	0.032	0.028	14.3	2.13	3.21	24.3	2.54	2.31	10.0	0.057	0.058	-1.7
11	0.036	0.038	0.0	0.037	0.041	-9.6	1.93	2.00	-3.5	1.84	1.88	-2.1	0.043	0.039	10.3
12	0.039	0.032	21.9	0.021	0.018	16.7	2.43	2.24	-4.3	1.84	1.78	3.4	0.029	0.027	7.4
年均	0.031	0.029		0.022	0.021		2.01	2.25		2.02	2.11		0.035	0.035	

2.4 模型的验证

上述模型参数的数值确定以后,输入各参数、变量的初始值,通过计算机运行计算,结果如表2所示,可以看出,计算值与实测值之间有较好的一致性,全年12组数据相关系数统计分析结果均有显著性的相关关系,其中,可溶性磷的相关系数0.63,平均误差为18.6%;颗粒磷的相关系数0.96,平均误差为11.7%;叶绿素a的相关系数0.84,平均误差为12.4%;水草的相关系数0.96,平均误差为10.1%;鱼类的相关系数0.98,平均误差为9.90%,表明采用该模型对湖水中可溶性磷、颗粒磷、叶绿素a、水草、鱼类等要素动态变化的预测,均取得了较为满意

的效果,模型具有较好的实用价值.可溶性磷因藻类和水草等的吸收利用,模拟中出现较大波动,有待进一步研究.

致谢 湖泊水量平衡由王洪道等协助完成,底泥释放由范成新协助完成,特此致谢.

参 考 文 献

- 1 顾丁锡,舒金华.湖泊污染预测与防治规划方法.北京:中国环境科学出版社,1989.57-74
- 2 屠清瑛等.巢湖——富营养化研究.合肥:中国科技大学出版社,1990.101-117
- 3 Sven-Olof Ryding 等著.湖泊与水库富营养化控制.北京:中国环境科学出版社,1992.90-115
- 4 金相灿等.中国湖泊富营养化.北京:中国环境科学出版社,1991.36-46
- 5 孙顺才,黄锦平.太湖.北京:海洋出版社,1993.206-208
- 6 崔启武等.生物种群增长的营养动力学.北京:科学出版社,1991.26-33
- 7 刘建康.东湖生态学研究(一).北京:科学出版社,1990.379-382
- 8 胡传林,黄祥飞.保安湖渔业生态和渔业开发技术研究文集.北京:科学出版社,1991.43-46
- 9 赵志模,郭依泉.群落生态学原理与方法.北京:科学技术文献出版社,1989
- 10 牛文元等.农田生态系统能量物质交换.北京:气象出版社,1987.115-122
- 11 合田健等.水环境指标.思考社(日本),1979
- 12 服部明彦.湖沼污染的诊断和对策.日刊工业新闻社(日本),1988
- 13 吉村信吉.湖沼的科学.地人书馆(日本),1931

PHOSPHORUS TRANSPORTATION PROCESSES IN GEHU LAKE(I): MODEL BUILDING

Huang Wenyu Shu Jinhua Wu Yangen Shu Zhenwen

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

Phosphorus transportation processes in Gehu Lake are described with dynamic models. Phosphorus fluxes into or out of the lake were measured which stem from river inflow and outflow, land runoff, cage aquaculture, artificial food, release from sediments, atmospheric precipitation, fish and aquatic plants harvest, irrigation and other water resource utilization to or from the Lake. In the model, five differential equations are used to calculate soluble phosphorus, particulate phosphorus, macrophytes, phytoplankton and fish. The solutions of the equations are given, based on the parameters from observation, documentation, or identified data. To verify the model, the data observed in Gehu Lake are used to compare with the calculated results. The model can be used to predict the phosphorus concentration and to rationally utilize the phosphorus resources in the lake.

Key Words phosphorus, transportation processes, modelling, Gehu Lake