维普资讯 http://www.cqvip.com

第18卷第6期 生 态 学 报 Vol. 18, No. 6
1998年11月 ACTA ECOLOGICA SINICA Nov., 1998

杭州西湖引水后生态系统中磷循环模型*

裴洪平 王维维 何金土 周 宏
(杭州大学 杭州 310028)

摘要 报道了杭州西湖截污和引灌钱塘江水后的一个富营养化模型。它按照年度描述西湖生态系统中的磷循环。状态变量有浮游植物磷、正磷酸盐、碎屑磷和沉积物磷。模型校准和检验结果表明，对于系统给定的强制函数(引水量和水温等)的改变，模型作出的状态变量的描述是合理的，并且利用该模型模拟在不同引水量及挖泥量下西湖水质变化。模型对引水及挖泥的效益所作出的评估可供综合治理时参考。

关键词: 富营养化模型，磷循环，引水，杭州西湖。

A PHOSPHORUS CIRCULATION DYNAMICS MODEL IN THE ECOSYSTEM FOR THE WEST LAKE AFTER DRAWING, HANGZHOU

Pei Hongping Wang Weiwei He Jingtu Zhou Hong
(*Hangzhou Universuty, Hangzhou, 310028, China*)

Abstract Focuses the researches on a eutrophication model after drainage of waste water and drawing water from the Qiantang River to the West Lake, the state variables in the model are phosphorus in algae cells, orthophosphate, phosphorus in detritus and phosphorus in sediment. The model describes phosphorus circulation in the ecosystem of the West Lake. The results of model calibration and verification show that the model can reasonably respond to the changes of forcing functions for drawing quantity and temperature of water. The model has been used to make the forecasts of water quality in the different drawing quantity. The predictions given by the model are also believed to the useful to comprehensively harness the West Lake.

Key word: eutrophication model, phosphorus circulation, drawing water, the West Lake.

湖泊富营养化是一个极为复杂的生态过程。根据目前研究结果表明[1~6]，影响富营养化的因子众多，如富营养性物质磷、氮、碳等。所谓富营养化实质上是指初级生产力异常增大的现象。支配这种初级生产力的营养性物质，是富营养化的极为重要的指标，也是主要控制因子。限制藻类生产量的主要物质是磷、氮。西湖中总氮与总磷之比高于20，远大于7，表明磷是西湖的限制性营养因子。因此控制水体中的磷含量是防治

* 国家自然科学基金项目(39170169)和浙江省自然科学基金资助项目(3931190)。
收稿日期：1996-04-06，修改稿收到日期：1997-04-25。

维普资讯 http://www.cqvip.com

西湖富营养化的关键。本模型试图通过对引水后的磷循环动态变化的描述,进行水质变化预测,以研究引水和疏浚湖泥的效益,为进一步综合治理西湖提供数据资料。

1　湖泊的基本概况

西湖是位于杭州市城区西侧的小型浅水湖泊。水面积为5.66km²,平均水深1.56m。湖内白堤和苏堤把西湖分隔成外湖,北里湖,岳湖,西里湖,小南湖等5个湖区(图1)。由于长期的营养盐累积,水质日益富营养化,藻类过度繁殖,影响了水色和透明度以及它的旅游价值。为改善西湖水质,已建立了截污工程和钱塘江引水工程。根据杭州西湖水域管理处提供的资料估算,西湖截污后,平均进水量约为1.9616×10⁷m³/a,扣除蒸发量4.1710×10⁶m³/a。在不引水的情况下,其泄流量为1.5445×10⁷m³/a。总磷(扣除渔获物所移出的磷)平均输入量为2.4t/a,正磷酸盐输入量约为0.88t/a。自1986年引水工程建成后,年平均引水量约为1.3×10⁷m³。

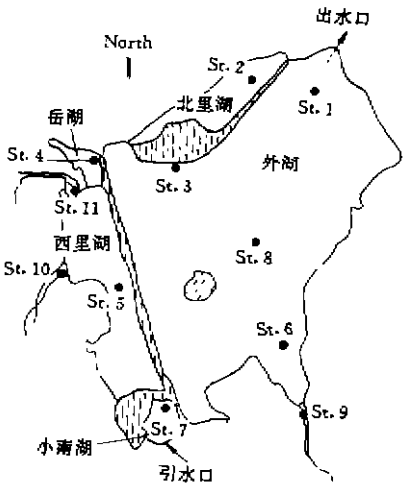

图1　西湖湖区及采样点的分布

Fig. 1　Distribution of the basins of West Lake

2　模型结构

本模型以西湖生态系统为研究对象,对营养盐磷的循环作定量描述。模型由状态变量、强制函数、状态方程、速率方程以及参数组成。状态变量共设4个,即浮游植物磷(*PC*)、正磷酸盐(*PI*)、碎屑磷(*PD*)和沉积物磷(*PS*)。模型对西湖磷循环的描述,按图2所示线路进行。强制函数为引水量、水温和营养物的输入量。引水量资料由西湖泵站提供,每月按日平均量输入,水温按湖泊实测数据,使用月平均温度。模型将西湖作为1个单元来处理。本文各项实测值均为5个湖区面积大小所求的加权平均值。

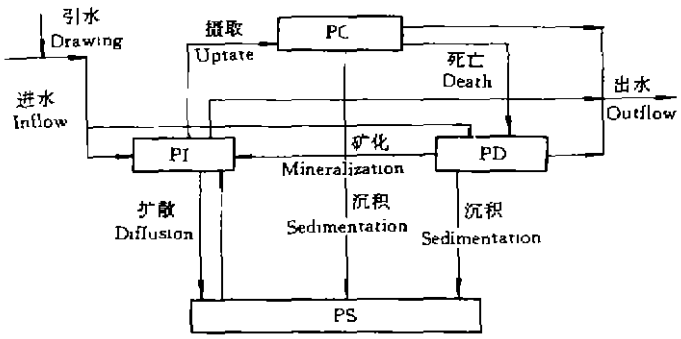

图2　西湖生态系统中磷循环模型的结构

Fig. 2　Structure of phosphorus circulation model in ecosystem of West Lake

2.1　状态方程

状态方程是模型中用以描述磷循环系统中物理、化学和生物过程的方程式。它们是按物质守恒定律建立的确定性微分方程所组成。每个方程描述一个状态变量与强制函数以及参数间的关系。其方程组为:

$$dPC/dt = UP \times PHYT - MORTPC - SETPC - PC \times (Q1+Q2)/V \quad (1)$$

$$dPI/dt = DPI + LPI + MINPD + EXCHP - UP \times PHYT - PI(Q1+Q2)/V \quad (2)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$dPD/dt = DPD + LPD + MORTPC - MINPD - SETPD - PD \times (Q1 + Q2)/V \quad (3)$$

$$dPS/dt = SETPC + SETPD - EXCHP \quad (4)$$

其中Q1、Q2分别为湖泊不引水情况下的泄流量和引水量。*LPI* 和 *LPD* 分别为不引水情况下湖泊单位体积的正磷酸盐和碎屑磷的负荷量。*DPI* 和 *DPD* 为引水量带来的湖泊单位体积的正磷酸盐和碎屑磷的负荷量。

2.2 速率方程

2.2.1 磷的提取($UP \times PHYT$) 浮游植物的生长是湖泊富营养化的关键。磷是能限制浮游植物生长的主要营养盐之一，这关系可用 Michaelis-Menten 动力学公式描述，即按照藻类细胞的营养盐水平稳定不变的假定，把藻类的生长作为环境营养物浓度的函数来描述。其公式是：

$$UP = UP_{max} \times FP1 \times FP2 \quad (5)$$

$$FP1 = (FPA_{max} - FPA)/(FPA_{max} - FPA_{min}) \quad (6)$$

$$FP2 = PI/(PI + KP) \quad (7)$$

$$FPA = PC/PHYT \quad (8)$$

其中 *UP* 是藻类细胞对磷的摄取率。*FP*1和 *FP*2分别是藻类细胞含磷量和湖水磷浓度对其最大摄取率的制约函数，*PHYT* 为藻类生物量。由于假设浮游植物细胞内营养物稳定不变，*PHYT* 可用浮游植物磷 *PC* 来表示。一般认为，浮游植物磷可按浮游植物生物量干重的含磷量为0.1%算得，故 *FPA* 为1%，即0.01。

2.2.2 浮游植物磷的丢失($MORTPC$)及碎屑和沉积物磷的矿化($MINPD$、$MINPS$) 在建立模型时，未将消费者生物列为状态变量，而是将各级消费者生物所摄取的磷全部归入浮游植物磷的损失。为此，本模型赋予浮游植物较高死亡率。浮游植物死亡造成浮游植物磷的失去以及碎屑和沉积物磷的矿化过程均受温度制约。按照 Van't Hoff 方程采用标准温度20℃，其速率方程为：

$$MORTPC = Kd \times \theta d^{(T-20)} \times PC \quad (9)$$

$$MINPD = Km1 \times m1^{(T-20)} \times PD \quad (10)$$

$$MINPS = Km2 \times m2^{(T-20)} \times (1 - rs) \times PS \quad (11)$$

2.2.3 浮游植物磷($SETPC$)和碎屑磷($SETPD$)的沉降 浮游植物磷和碎屑磷的沉降是指除去风力或其它因素引起再悬浮后的平均沉降作用。因全湖水深相差不大，故西湖采用同一沉降速率方程。其方程为：

$$SETPC = PC \times (VS1/D) \quad (12)$$

$$SETPD = PD \times (1 - rd) \times (VS2/D) \quad (13)$$

2.2.4 水与沉积物之界面磷交换($EXCHP$) 磷在水与沉积物中同时有沉降作用和分解作用(即动态平衡)。本模型对这过程的描述以磷在沉积物或水中某种存在状态沿着浓度梯度扩散所进行的转移过程为依据，其过程受温度制约，速率方程为：

$$EXCHP = KEX \times (MINPS - PI) \quad (14)$$

2.3 参数

模型所采用参数共17个，其中部分系西湖实测值，部分则根据文献选用参考范围，并采用参数调试推导法算得(表1)。

3 模型实施与校准

模型采用 Runge-ketta 数值积分法，用 FORTRAN 语言由 Dell 486微型计算机执行运算，按生态模型一般采用的1d 为步长。

模型按照西湖1989年实测数据逐月校准。其状态变量的初值采用1988年12月的实测值(表2)。其中浮游植物磷由浮游植物生物量求得，浮游植物的生物量则由叶绿素 a 的实测值按0.05mg 碳＝1μg 叶绿素 a 换算所得。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

符号 Symbol	含义 Meaning	单位 Unit	数值 Value	符号 Symbol	含义 Meaning	单位 Unit	数值 Value
UP_{max}	藻类细胞对磷的最大摄取率	1/d	0.01	$FPAma$	藻类细胞最高含磷量	g/m^3	0.0143
KP	藻类摄磷的 Michaelis 常数	g/m^3	0.022	$FPAmi$	藻类细胞最低含磷量	g/m^3	0.002
rd	碎屑磷中溶解有机磷所占比率	—	0.38	$\theta m1$	$Km1$的温度系数	—	1.15
KEX	水与沉积物间磷交换系数	1/d	0.02	$VS1$	藻类沉降速度	m/d	0.05
$Km2$	20℃时沉积物磷的矿化率	1/d	0.0025	$VS2$	碎屑沉降速度	m/d	0.13
$\theta m2$	Kd 的温度系数	—	1.15	$Km1$	20℃时碎屑矿化率	1/d	0.022
rs	沉积物磷中不可交换磷所占比率	—	0.18	V	湖泊体积	m^3	1.1×10^7
Kd	20℃时藻类死亡率	1/d	0.35	D	湖泊水深	m	1.56
θd	20℃时藻类死亡的温度系数	—	1.02				

各项指标的模拟值和实测值见图2,其中透明度(SD)的模拟值是按照西湖透明度与总磷(TP)间的统计经验公式 $\ln(SD)=8.777-1.025\ln(TP)$算得。从图2中可见,模型较好地描述了西湖引水后的生态系统中磷循环动态变化过程。虽然有些指标的模拟值和实测值不完全拟合,但两者变动的趋势基本上是一致的。这可以用3个校准指标来说明,即校验期状态变量校对误差(Y)。平均状态变量校对误差(R)和最大状态变量校对误差(A)定量表示,其公式为:

$$Y(\%)=\{(\sum(Y_c-Y_m)^2)^{1/2}/n\}/\overline{Y}_m\times100\% \tag{15}$$

$$R(\%)=(\overline{Y}_c-\overline{Y}_m)/\overline{Y}_m\times100\% \tag{16}$$

$$A(\%)=(Y_{c,max}-Y_{m,max})/Y_{m,max}\times100\% \tag{17}$$

式中:Y_c、Y_c、$Y_{c,max}$分别为校验期模拟值,平均模拟值和最高模拟值,Y_m、$\overline{Y}_m$、$Y_{m,max}$分别为校验期实测值、平均实测值和最高实测值。

表3给出了模型中3个主要状态变量校验指标 Y、R 和 A 值,从表3中可以看出,在3个校验指标中,这3个状态变量没有一个达到10%。这表明此模型有作为预测工具的价值。

4 模型对引水工程及疏浚效益的评价

为了作出对西湖引水效益的估计,研究引水后富营养化的发展趋势。本文还假设不引水和增加1989年引水量的1倍两种情况,按1989年的初值条件进行模型的模拟计算,并与1989年的模拟结果作比较(见表4)。模拟计算表明,引水对提高透明度较明显。每年引水1.33×10^7t 或2.66×10^7t 入西湖比不引水情况下平均透明度分别提高2.9cm 和4.2cm,即分别提高5.7%和8.3%。特别是在5月,可分别提高7.8cm。能在春季较大幅度提高透明度是十分理想的。但在另一个旅游旺季——秋天,透明度提高不明显。

表2 模型状态变量的初值(g/m^3)

Table 2 Initial values of the state variables in the model

PC	PI	PD	PS
0.0351	0.0065	0.1041	138.92

表3 3个主要状态变量校准指标(%)

Table 3 Three main calibration indexes of state variables

状态变量	Y	R	A
PC	4.70	0.13	1.29
PI	7.29	9.22	6.15
PD	7.25	−8.03	4.02

从计算表明还可以看出,引水1.33×10^7t/a 和2.66×10^7t/a,叶绿素 a 含量比不引水情况下平均分别降低1.4μg/l 和2.0μg/l,分别下降了2.2%和2.6%。叶绿素 a 降低最明显的月份是7月,分别降低了3.0μg/l

维普资讯 http://www.cqvip.com

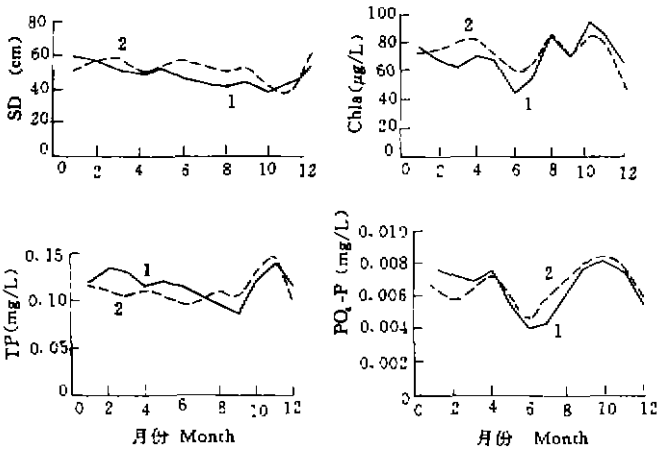

图3 西湖1989年叶绿素a、总磷和正磷酸盐的观测值与模拟值的比较

Fig. 3 Comparison between observed (——) and simulated (……) values of transparency, chlorophylly a, total phosphorus and orthophosphate in the West Lake, 1989

和4.2μg/l，但就总体而言，引水能降低水体的叶素绿a含量，但效果并不理想。这可能与钱塘江水中正磷酸盐偏高有直接的关系。

由于钱塘江水中正磷酸盐过高，使引水后的西湖水体正磷酸盐的含量升高。年引水量达到1.33×10^7t或2.66×10^7t时，水体中正磷酸盐浓度比未引水情况时分别升高0.00058mg/l和0.00084mg/l，即分别升高了9.4%和13.6%。一般认为，溶解的正磷酸盐是被植物吸收的最主要形式。这表明，它是浮游植物增长的潜在因素之一。

从模型的分析知道，主要原因在于系统内作为营养物贮存库的沉积物磷所起的作用。许多湖泊的调查资料表明，湖泊外部污染源被控制以后，由于沉积物中营养盐的内负荷的存在，仍然可以发生富营养化。为此，本文设想，将西湖沉积物移出其现存量的1/3或1/2以后，仍按1989年引水量引水，进行模型的模拟计算。计算结果(表5)表明，和1989年的指标比较，在移出1/3或1/2沉积物后，透明度的年平均值分别提高24.9%和43.4。叶绿素a的浓度年平均值分别下降20.5%和29.2%，正磷酸盐浓度分别下降11.9%和19.4%，总磷浓度分别下降了20.5%和30.1%。由此可见，挖泥对于改善水质的效果是十分明显的。

表4 3种引水量下水质状态变量的变化预测

Table 4 The predictions of water quality in three quantity of drawing water

	Chla (μg/l)	PO_4-P (mg/l)	*TP* (mg/l)	*SD* (cm)
Ⅰ	78.2	0.0061	0.115	50.5
Ⅱ	76.5	0.0067	0.108	53.4
Ⅲ	76.2	0.0070	0.106	54.7

注：Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ分别表示不引水、引水1.33×10^7t/a和2.66×10^7t/a。引水量的单位是t/a。

表5 不同挖泥量对西湖水质状态变量的变化预测

Table 5 The prediction of water quality in the different quantity of sediment removed

	Chla (μg/l)	PO_4-P (mg/l)	*TP* (mg/l)	*SD* (cm)
未挖泥	76.5	0.0067	0.1096	53.4
移出1/3沉积物	60.8	0.0059	0.0871	66.7
移出1/2沉积物	54.2	0.0054	0.0766	76.6

注：均以1989年的引水量计算。

5 讨论

5.1 本模型仅注重于磷对浮游植物的限制作用，是考虑到磷为可能的限制性营养盐。本模型的模拟结果

维普资讯 http://www.cqvip.com

显示,按照磷的循环来反映西湖水体的变化,基本上是合理的。但也不能完全排除在某段时间内存在其他营养物质限制的可能性。

5.2 本模型对西湖磷循环动态的描述,基本上是以每月4次的观测结果的平均值作为当月观察值(叶绿素a的观测次数为每月1~2次)。每次样本包括9个观测点的有关资料。因此,观测数据还是基本可信的。但引水量是根据每月的总引水量求得该月的日平均引水量输入模型的。这同实际情况有一定的出入,另一方面,模型对于生态系统的确定性描述在某些方面可能过于简化,可能还有其它一些因素存在,使不少模拟值未能很好地拟合实测值。但从模型校准和检验的指标看,特别是模拟值与实测值的趋势基本一致。

5.3 由于钱塘江水体中的悬浮物主要是泥沙,特别在潮讯和雨水期间,大量的悬浮泥沙影响了引水,根据测定知道,1年中约有135d钱塘江水的透明度达90cm以上,因此,虽然日抽水能力可达30万吨,因种种原因,每年的最高引水量估计在2.5×10^7~3.0×10^7t,文中将1989年的引水量增加1倍正处于这区间内,所以,取2.66×10^7t/a作为高引水量年份的状况以考察引水的效益。表4中可以看出,提高1倍的引水量,即从1.33×10^7t提高到2.66×10^7时,水质指标在这期间里提高缓慢。原因是多方面的,模型的分析以及表5中可以看出,影响西湖水体富营养化的最主要的原因是底泥。西湖底泥含磷量甚高,对于水柱营养物浓度的变动有重要影响。将底泥的沉积物移出对西湖水质的变化影响极为显著。因此,要进一步提高西湖水质,仅靠引水是不够的。要大幅度提高水质,疏浚底泥是必要的。

参 考 文 献

1 金相灿,等. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社,1990. 31~50

2 金相灿,等. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社,1990. 303~317

3 阮景荣,等. 水生生物学报. 1988,12(4):289~307

4 Jogensen S E. An eutrophication model for a lake. *Ecol Modelling*,1976(2),147~165

5 Jogensen S E. Fundamental of ecological modelling. *Elsevier*,1986,220~245

6 Schnoor J L. A steady state eutrophication model for lakes. *Water Research*,1980,(14):1651~1665