

# 杭州西湖藻类动态模型研究\*

裴洪平 马建义 周宏 蔡景现 李共国<sup>1</sup>

(浙江大学, 杭州 310028) (<sup>1</sup> 浙江农技师师专, 宁波 315101)

**摘要:** 该模型按照年度来描述西湖四类藻类(蓝藻门、绿藻门、隐藻门、硅藻门)的动态变化。结果表明,模型作出的状态变量的描述是理想的,并且对于系统强制函数改变能给予合理响应。模型还对引水量,引水或溪流的含磷量及疏浚湖泥量的改变给水体带来的变化进行了预测。

**关键词:** 藻类, 生态模型, 杭州西湖

**中图分类号:** Q949.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2000)02-0143-07

杭州西湖,东面紧倚杭州市区,南、西和北三面环山,湖水面积 5.66km<sup>2</sup>,平均水深 1.56m,流域面积 27.25km<sup>2</sup>,因库容量小,自然补给水源不足,加上流域内经济迅速发展,致使氮、磷等营养物质大量积累,曾一度达到重富营养化程度<sup>[1]</sup>。70年代以来,有关部门采取搬迁、截污、疏浚、引水等一系列整治措施,西湖水体得到了一定改善,但未见明显效果。目前仍属富营养化湖泊。作者试图通过定量研究西湖水环境中有关理化因子与藻类生长间的关系,探讨几种整治措施对藻类群落及其生物量的影响,以评价这些整治措施对改善西湖水质的效果。

## 1 材料和方法

湖内设 8 个站位,入湖的三条溪流各一个站位(图 1)。每月采样一次,水样用采水器采集。水样中总磷,可溶性磷测定采用钼蓝比色法;COD测定采用酸性高锰酸钾法;叶绿素 a 含量测定按 APHA(1976)1002G. 1 的方法,采用 1002G. 3 项公式计算;藻类生物量干重,是根据叶绿素 a 的实测值,按其比例系数(1μg Chla = 0.05mg C)换算;浮游植物磷,根据藻类生物量干重,按其含磷量 1% 求得。将占西湖总藻类生物量 95% 以上的四类藻类(蓝藻门,绿藻门,隐藻门,硅藻门)建立模型,不再

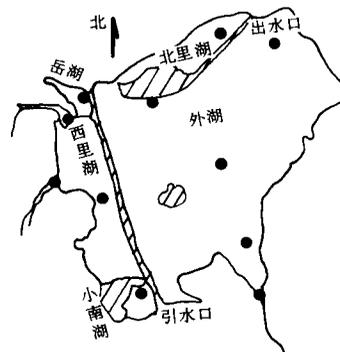


图 1 西湖湖区分布  
Fig.1 Districts of West Lake

收稿日期: 1998-03-05; 修订日期: 1999-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39170169) 和浙江省自然科学基金资助项目 (393190)

作者简介: 裴洪平(1946—), 男, 江苏省宜兴市人, 现任浙江大学副教授, 主要从事水域环境的研究

将其余门的藻类考虑在内;四类藻类生物量计算是根据对样品在显微镜下镜检,计算其数量及其数量比,按体积法,再换算成重量和重量比,然后根据其重量比和总藻碳量计算出四类藻类碳量<sup>[2]</sup>;浮游动物测定是经 25 号浮游生物网过滤,用福尔马林液固定后取 0.1mL 计数(其中小型甲壳动物全部计数),用目微尺测定原生动物的个体大小,按体积法计算其平均湿重,再换算出其生物量,浮游动物含磷量按其生物量的 2% 算得。温度、SD 等均作现场测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的建立

#### 2.1.1 模型结构

模型设有 5 个分室 13 个状态变量(图 2,即蓝藻、绿藻、隐藻、硅藻的生物量(BA1、BA2、BA3、BA4)及其含磷量(PA1、PA2、PA3、PA4),浮游动物生物量(BZ)及其含磷量(PZ),正磷酸盐(PS),碎屑磷(PD)及沉积物磷(PE)。

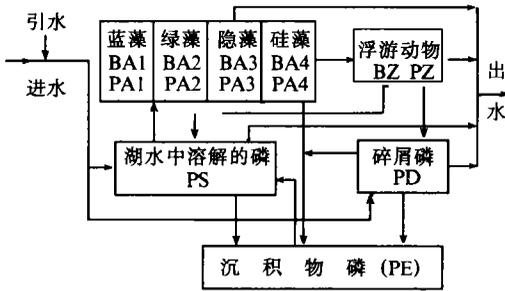


图 2 西湖富营养化模型结构图

Fig.2 Structure of the eutrophication model for the West Lake

模型未将鱼和底栖动物列为状态变量,但从食物链上考虑了它们对浮游动物影响,即模型赋予浮游动物较高死亡率<sup>[3]</sup>。因引水及溪流水中带人的藻类及浮游动物数量很少,因此在建模时忽略不计。1995 年引水

1552 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,径流量 1537 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,

降雨为 1398mm(计 896 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>),泄水 3229 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,蒸发 756 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。年平均日照 1903.9h。水量平衡计算考虑了进水(包括降雨、引水和溪流入湖水三部分)和出水(包括蒸发和泄水两部分)。根据每月进出水总量计算出每月的日均量。磷负荷计算是根据水量乘以月平均浓度计算得每月的日均量。每月按平均量输入,降雨量,蒸发量等亦按相同方法处理。水温按西湖实测数据使用月平均温度。太阳辐射是根据杭州所处地理位置(北纬 30° 12')的最大和最小日辐射量,采用 COS 曲线模拟。模型将西湖做为单元来处理,并假定为完全混合匀质系统。文中各测值均为按五个湖区面积大小所求得的加权平均值<sup>[4]</sup>。

2.1.2 状态方程 每一状态方程描述相关的状态变量、驱动变量及参数的关系<sup>[5,6]</sup>。13 个状态方程分别是:

$$dBA_i / dt = BA_i \times (GROW_i - RES_i - SINK_i - Q / V) - BZ \times GRAZ_i \quad (i = 1,2,3,4)$$

$$dPA_i / dt = UPTAB_i - GRAZP_i - SETPA_i - RESP_i - PA_i \times Q / V \quad (i = 1,2,3,4)$$

$$dBZ / dt = BZ \times (ASIM - ZRES - ZMOR - Q / V)$$

$$dPZ / dt = GRAZP - ZRESP - ZROMP - PZ \times Q / V$$

$$dPS / dt = LPS + MINPD + EXCHP - UPTAB + RESP + ZRESP - PS \times Q / V$$

$$dPE / dt = SETPA + SETPD - EXCHP$$

$$dPD / dt = LPD + ZROMP - MINPD - SETPD - PD \times Q / V$$

**2.1.3 模型参数** 模型参数共 62 个,部分系西湖实测值,部分根据文献选用参考范围<sup>[5,6]</sup>。如表 1 所示:

表1 模型参数值  
Tab.1 Model parameter values

符号	含义	单位	数值	符号	含义	单位	数值
Umax1	蓝藻的最大生长率	d <sup>-1</sup>	3.30	Kst4	硅藻沉降速度	m/d	0.017
Umax2	绿藻的最大生长率	d <sup>-1</sup>	2.35	R1	蓝藻被捕食的选择系数	—	0.18
Umax3	隐藻的最大生长率	d <sup>-1</sup>	2.43	R2	绿藻被捕食的选择系数	—	1.0
Umax4	硅藻的最大生长率	d <sup>-1</sup>	2.37	R3	隐藻被捕食的选择系数	—	1.0
DPs1	蓝藻摄磷的米氏常数	g/m <sup>3</sup>	0.027	R4	硅藻被捕食的选择系数	—	1.0
DPs2	绿藻摄磷的米氏常数	g/m <sup>3</sup>	0.016	RO1	0℃时蓝藻呼吸速率	d <sup>-1</sup>	0.007
DPs3	隐藻摄磷的米氏常数	g/m <sup>3</sup>	0.016	RO2	0℃时绿藻呼吸速率	d <sup>-1</sup>	0.003
DPs4	硅藻摄磷的米氏常数	g/m <sup>3</sup>	0.018	RO3	0℃时隐藻呼吸速率	d <sup>-1</sup>	0.003
LOP1	蓝藻生长最佳光辐射量	lx	310	RO4	0℃时硅藻呼吸速率	d <sup>-1</sup>	0.003
LOP2	绿藻生长最佳光辐射量	lx	340	TCOEF	Q10系数	d <sup>-1</sup>	0.038
LOP3	隐藻生长最佳光辐射量	lx	350	GRMAX	浮游动物最大捕食率	d <sup>-1</sup>	0.09
LOP4	硅藻生长最佳光辐射量	lx	310	ZMOR	浮游动物死亡率	d <sup>-1</sup>	0.04
TOP1	蓝藻生长最佳水温	℃	30	Fmin	可捕食浮游植物最小浓度	g/m <sup>3</sup>	0.05
TOP2	绿藻生长最佳水温	℃	23	Fs	捕食浮游植物的米氏常数	g/m <sup>3</sup>	0.25
TOP3	隐藻生长最佳水温	℃	20	ZRO	浮游动物呼吸速率	d <sup>-1</sup>	0.03
TOP4	硅藻生长最佳水温	℃	21	ZRM	浮游动物呼吸倍增率	—	0.040
Pinmin1	蓝藻最小含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.005	UZmax	浮游动物最大生长率	d <sup>-1</sup>	0.19
Pinmin2	绿藻最小含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.005	Kml	碎屑磷的矿化率	d <sup>-1</sup>	0.01
Pinmin3	隐藻最小含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.005	Sml	碎屑磷矿化的温度系数	—	0.8
Pinmin4	硅藻最小含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.005	Kex	沉积物与水柱间磷交换系数	d <sup>-1</sup>	0.030
Pinmax1	蓝藻最大含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.015	Km2	沉积物磷的矿化率	d <sup>-1</sup>	0.178
Pinmax2	绿藻最大含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.020	Sm2	沉积物磷矿化的温度系数	—	1.08
Pinmax3	隐藻最大含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.015	rs	沉积物中溶解有机磷所占分数	—	0.12
Pinmax4	硅藻最大含磷量	g/m <sup>3</sup>	0.015	rd	碎屑中溶解有机磷所占分数	—	0.38
PUPmax1	蓝藻最大吸磷速率	d <sup>-1</sup>	0.07	VS	沉积物沉降速度	m/d	0.125
PUPmax2	绿藻最大吸磷速率	d <sup>-1</sup>	0.10	K1	水的消光系数	d <sup>-1</sup>	1.5
PUPmax3	隐藻最大吸磷速率	d <sup>-1</sup>	0.07	K2	浮游植物的消光系数	d <sup>-1</sup>	1.0
PUPmax4	硅藻最大吸磷速率	d <sup>-1</sup>	0.07	LMIN	最小光辐射量	lx	268
Kst1	蓝藻沉降速度	m/d	0.025	LMAX	最大光辐射量	lx	783
Kst2	绿藻沉降速度	m/d	0.016	D	湖泊深度	m	1.56
Kst3	隐藻沉降速度	m/d	0.016	V	湖泊体积	m <sup>3</sup>	9.0×10 <sup>6</sup>

**2.1.4 模型结构分析** 速率方程是定量描述水生生物生长、生殖、死亡及分解等代谢过程。模型有速率方程 54 个。

(1) 浮游植物的生长 浮游植物的生长一方面受湖中营养物水平的制约,即按米氏(Michalis-Menten)运动学吸收营养盐,另一方面也受浮游植物细胞内的物质浓度的影响。

$$GROW_i = UMAX_i \times f(Li) \times f(Ti) \times f(Pi), (i = 1,2,3,4)$$

式中  $f(Li)$ ,  $f(Ti)$ ,  $f(Pi)$  分别表示光、温度和磷酸盐对四类藻生长的制约函数。表达式如下:

$$f(Ti) = T / Topi \times \exp(1 - T / Topi), (i = 1,2,3,4);$$

$$f(Pi) = PS / (DPsi + PS), (i = 1,2,3,4);$$

$$f(Li) = L / LOPi \times \exp(1 - L / LOPi), (i = 1,2,3,4);$$

$$L = I \times (1 - \exp(-K \times D)) / (K \times D);$$

$$K = K1 + K2 \times (BA1 + BA2 + BA3 + BA4);$$

$$I = LMIN + ((LMAX - LMIN) / 2)(1 - \cos(6.2832 / 360 \times N))$$

式中:  $K$  为总消化系数,  $I$  为光辐射量。

$$(2) \text{ 浮游植物的沉降 } SINK_i = Kseti / D, (i = 1,2,3,4)$$

$$(3) \text{ 浮游植物的呼吸 } RES_i = RO_i \times \exp(TCOEF \times T), (i = 1,2,3,4)$$

$$(4) \text{ 浮游动物对浮游植物的捕食 } GRAZ_i = GRMA \times (F - Fmin) / (Fs + F - Fmin) \times Ri \times BA_i / F, (i = 1,2,3,4), F = (R1 \times BA1 + R2 \times BA2 + R3 \times BA3 + R4 \times BA4)$$

$$(5) \text{ 浮游动物的生长 } ASIM = UZmax \times (F - Fmin) / (Fs + F - Fmin)$$

$$(6) \text{ 浮游动物的呼吸 } ZRES = ZRO \times \exp(TCOEF \times T) + ZRM \times GRAZ$$

(7) 浮游植物对磷酸盐的吸收 藻类细胞的营养物含量往往变动大,且藻类生长可延续到水中营养物耗尽之后,为此一些作者将藻类生长和营养物分开考虑,同时把藻类生长率作为细胞营养物水平的函数来描述,结果给出更准确预报。因此本模型也按两步过程来描述。  $UPTBA_i = PUPmax_i \times (Pinmax_i - (PA_i / BA_i)) / (Pinmax_i - Pinmini) \times PS / (DPsi + PS) \times BA_i (i = 1,2,3,4); UPTBA = UATBA1 + UATBA2 + UATBA3 + UATBA4$

$$(8) \text{ 被捕食的浮游植物的磷量 } GRAZPi = BZ \times GRAZ_i \times PA_i / BA_i (i = 1,2,3,4)$$

$$(9) \text{ 沉降浮游植物所含的磷量 } SETPA_i = Kseti / D \times PA_i (i = 1,2,3,4)$$

$$(10) \text{ 浮游植物的呼吸所耗磷量 } RESP_i = RES_i \times PA_i (i = 1,2,3,4)$$

$$(11) \text{ 浮游动物的呼吸所耗磷量 } ZRESP = ZRES \times PZ$$

$$(12) \text{ 死亡浮游动物所含的磷量 } ZROMP = ZROM \times PZ$$

$$(13) \text{ 水柱与沉积物界的磷交换 } EXCHP = Kex \times (Km2 \times (Sm2)^{(T-20)} \times (1 - rs) \times PE - PS)$$

$$(14) \text{ 碎屑的沉降: } SETPD = (vs / D) \times (1 - rd) \times PD; MINPD = Km1 \times (Sm1)^{(T-20)} \times PD$$

(15)  $LPS$ 、 $LPD$  分别为外部输入正磷酸盐和其它形态的磷。 $Q$  为泄水量,  $T$  为湖水温度。

## 2.2 模型实施与校准

模型用 QBASIC 编制程序,由微机 Dell486 执行运算。采用 Runge-Kutta 数值积分方法,根据生态学模型一般所要求的精度,运算按步长一天来进行。其状态变量初值是 1994 年 12 月的实测值给定(表 2)。模型按 1995 年 1 月至 12 月逐月实测值校准。各指标的模拟

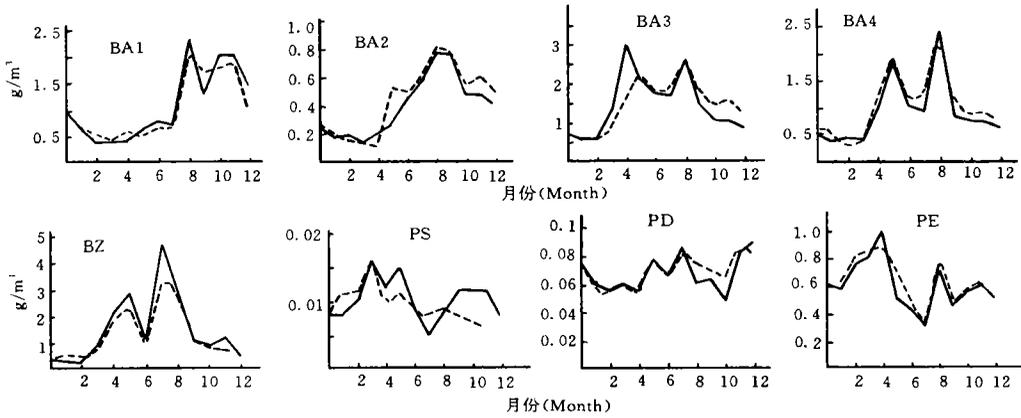


图 3 一些状态变量的实测值与模拟的比较

Fig.3 Comparison between observed and simulated values of some state variables in the model

表2 模型状态变量的初值(g/m³)及校准指标(%)

Tab. 2 Initial values and calibration indicators of the state variables in the model

变量	初值	Y%	R%	A%	变量	初值	Y%	R%	A%	变量	初值	Y%	R%	A%
BA1	0.847	10.8	0.6	-2.8	PA2	0.003	8.1	1.2	1.0	PS	0.008	7.4	1.3	15.6
BA2	0.290	10.9	2.5	14.2	PA3	0.006	12.9	-2.4	-18.4	PD	0.078	2.1	-0.1	-5.4
BA3	0.624	10.3	0.5	23.3	PA4	0.004	13.0	-1.6	12.7	PE	0.575	5.3	-0.6	-16.3
PA4	0.648	12.6	1.9	-5.3	BZ	0.359	22.1	-2.9	-42.8					
PA1	0.009	14.6	-2.3	20.3	PZ	0.008	21.5	2.4	-37.1					

表3 模型状态变量的初值(g/m³)及校准指标(%)

Tab. 3 Initial values and calibration indicators of the state variables in the model

	蓝藻门(%)			绿藻门(%)			隐藻门(%)			硅藻门(%)			TP(%)		
	1996	1997	1998	1996	1996	1997	1998	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
CASE1	-2.6	0.5	0.2	1.6	-3.7	-6.5	-8.2	-0.7	-2.9	1.5	2.4	5.3	-0.6	-2.2	-2.7
CASE2	-5.3	-5.5	-5.4	5.5	-10.9	-18.8	-24.4	4.1	-1.1	2.3	7.1	13.3	-2.6	-5.7	-6.9
CASE3	-0.1	0.5	1.8	-0.0	-0.8	-1.2	-1.4	-0.8	-1.2	0.1	0.4	-0.3	-0.1	-0.1	-0.4
CASE4	-0.3	1.6	6.2	0.1	-1.9	-3.4	-4.4	-1.4	-3.2	0.3	0.5	-1.7	-0.2	-0.7	-1.5
CASE5	-1.8	-0.8	-0.6	-1.9	0.9	1.7	2.5	-1.9	-1.8	2.2	1.4	0.9	1.4	1.3	1.4
CASE6	-6.0	-3.9	-3.6	-1.5	3.1	4.6	6.2	-2.7	-4.4	4.6	3.9	4.5	2.8	2.7	3.4
CASE7	10.2	26.7	31.0	-2.6	-4.4	-2.7	-1.6	-4.4	-6.7	-4.0	-16.0	-19.9	-3.7	-6.3	-4.5
CASE8	2.4	15.3	19.6	-0.4	-13.3	-9.8	-7.5	-2.6	-4.1	4.9	-2.5	-7.0	-7.0	-10.2	-8.6
CASE9	-10.9	-5.8	-5.4	2.7	-25.8	-21.4	-18.1	1.0	-3.1	17.0	17.4	19.1	-9.0	-12.6	-10.7

值和实测值见图 3。

由图 3 可见,模型较好地描述了西湖水体和底泥营养盐及 4 种藻类动态变化。虽有些

指标的模拟值和实测值不完全拟合,但二者变动趋势基本一致。这也可用三个校准指标,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<sup>[5]</sup>。

$$Y(\%) = \{(\sum(Y_c - Y_m)^2)^{1/2} / n\} / \bar{Y}_m \times 100\% \quad R(\%) = (\bar{Y}_c - \bar{Y}_m) / \bar{Y}_m \times 100\%$$

$$A(\%) = (Y_{c,max} - Y_{m,max}) / Y_{m,max} \times 100\%$$

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

表 2 的数据显示,尽管 BZ 和 PZ 的 Y 值为 22.1% 和 21.5%,是有些偏高,13 个变量的 Y 平均值仅为 11.1%,因此,这是可以接受的。13 个变量的 R 的绝对值均不超过 3%,是较为理想的。浮游动物生物量(BZ)及其含磷量(PZ)的 A 的绝对值为 42.8% 和 37.1%,有些偏高以外,其余 11 个状态变量的 A 绝对值介于 1.0%—23.3% 之间。从模型反映各状态变量预测值变化趋势与实测值变化趋势的比较来看,这也是可以接受的。因此,该模型比较好地反映了各变量的变化趋势。

### 2.3 模型预测

鉴于西湖富营养状态及其污染源输入特点,预测为以下几种假设:CASE1,2 分别为引水除磷 1/4,3/4;CASE3,4 分别为溪流除磷 1/4,3/4;CASE5,6 分别为引水量增加 1/4,3/4;CASE7,8,9 分别为底泥释磷量减少 1/8,3/8,5/8 等情况,分别探讨引水除磷,溪流除磷,增加引水量,减少底泥释磷等对策效果;评价包括:藻类群落及其生物量及总磷等变化。假定实施时间为 1996 年 1 月至 1998 年 12 月,并假定各气候条件,如日辐射量,日照时间,水温等与 1995 年相同。表中数据均为同一年中各方案与未实施时各项水质指标比较。表 2 的数据表明,湖水总磷尤其是正磷酸盐浓度升高,会刺激蓝藻和硅藻生长,使其所占比例升高,相对使隐藻和绿藻比例下降。因此,不同藻类生物量与湖水磷尤其是正磷酸盐浓度有关。从对抑制藻类的生长及改善水质来看,西湖底泥释磷作用量大,降低引水磷浓度和溪流磷浓度也具有较大作用,但引水量的增加没有多大作用。

## 3 讨论

3.1 众多的湖泊富营养化模型都是把磷作为重要限制因子。西湖水体中  $N/P > 14$ ,按照一般判定氮、磷限制作用的标准,西湖中的磷也是藻类生长的限制因子,因此,本模型仅考虑磷的影响。把磷作为限制因子描述西湖中藻类动态变化,基本上是合理的。

3.2 本模型对西湖藻类等生长及磷循环的动态描述,是以每月一次的监测结构为依据的。从模型校准和检验结果看,个别模拟值未能很好地拟合实测值,可能有两个原因:其一,模型对于系统的确定性描述在某些方面做了简化,没有将鱼类、贝类和西湖中少量大型水生植物考虑进去。其二,引水量等是根据每月的日平均量输入模型的,这同实际情况有一定的出入。但各指标的模拟值与观测值变化趋势是基本一致的。

3.3 西湖水质预测结果表明,再增加引水量不会使水质有显著改善。而减少底泥释磷的作用最大。因此可把注意力放到如何减少底泥释磷力度上。其次,溪流除磷对抑制西湖富营养化具有一定作用,可考虑在溪流种植水生植物或采用氧化池技术对溪流水除磷。第三,由于钱塘江水中可溶性磷浓度高,因此,增加引水量反而刺激藻类生长。如果能对

引水进行除磷处理,将会大量地减少外源磷负荷进入西湖。因此,引水除磷将是保护西湖水体的重要措施之一。从预测结果看,如果大量地疏浚底泥或在不影响景观和旅游的情况下种植沉水植物以固化底泥等措施,使底泥释磷速率减少一半以上,西湖就有可能从目前的富营养化转变到中等富营养化程度。如果再对引水含磷量除去 3/4 以上,同时对溪流除磷,西湖可望达到中等营养化水平。

### 参 考 文 献

- [1] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛等. 中国湖泊富营养化 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 442—472
- [2] 李明德. 水生生物与养殖 [M]. 天津: 南开大学出版社, 1990, 78—91
- [3] 阮景荣,蔡庆华,刘建康. 武汉东湖的磷-浮游植物动态模型 [J]. 水生生物学报, 1988, 12(4): 289—307
- [4] 裴洪平,王维维,俞大维. 西湖生态系统中磷循环动态模型 [M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1992, 49—58
- [5] 宋永昌,王云,戚仁海. 淀山湖富营养化及其防治研究 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1992, 157—180
- [6] 刘鸿雁. 镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化预测初探 [J]. 生态学报, 1996, 16(2): 195—200

## THE DYNAMIC MODEL OF ALGAE IN WEST LAKE OF HANGZHOU

PEI Hong-ping, MA Jian-yi, ZHOU Hong, CAI Jing-xian and LI Gong-guo<sup>1)</sup>  
(Zhejiang University, Hangzhou, 310028)<sup>1)</sup> (Zhejiang Rural Teacher's College of Technology, 315101)

**Abstract:** The model describes the dynamics of the four main algae (Cyanophyta, Chlorophyta, Cryptophyta, Bacillariophyta) and zooplanktons in West Lake on the yearly time scales. The result of the model calibration is satisfactory, and the model can reasonably respond to the changes of forcing functions in the ecosystem. The model has been used to forecast some changes in the four main algae with changes in the quantity of drawing water from Qiantang River, and in the phosphorus content of drawing water or stream water and the removal quantity of sediment. The effect of improving water quality with the measure of harnessing was evaluated.

**Key words:** Algae, Ecological model, West Lake