

镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化预测初探

刘鸿雁

徐云麟

(北京大学城市与环境学系, 北京, 100871) (北京大学环境科学中心, 北京, 100871)

Q949.208

A

摘要 作者在分析了影响镜泊湖藻类生长的主要因素的基础上, 建立了镜泊湖藻类生长模型, 利用实验数据和有关资料对镜泊湖藻类生长和湖泊富营养化趋势进行了预测。作者认为: 在镜泊湖藻类的生长季节(5—10月), N浓度始终不是主要限制因子; 在藻类生长旺盛的7、8两月, P浓度成为主要限制因子; 在5、6、9、10四个月中, P浓度和温度均可能成为主要限制因子, 但随着P浓度的提高, 温度成为主要限制因子, 客观上对湖泊富营养化的发展起着遏制作用。通过检验, 本文模型的输出能反映镜泊湖藻类生物量随时间变化的一般规律。

关键词: 藻类, 生长模型, 生态因子, 镜泊湖。

PRELIMINARY OBSERVATIONS OF ALGAL GROWTH AND LAKE EUTROPHICATION IN JINGBO LAKE

Liu Hongyan

(Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing, China, 100871)

Xu Yunlin

(Research Centre for Environment Sciences, Peking University, Beijing, China, 100871)

Abstract After analyzing the main factors which affect algae growth in Jingbo Lake, a model for algae growth was constructed and the algal growth and eutrophication was predicted using laboratory and field data. In the algal growing season, N was not a main limiting factor in the lake. In July and August, P was the main limitation. In May, June, September and October, both P and temperature became limiting for algal growth. But with the increasing of P concentration, temperature became the main limitation, which played an adverse role in lake eutrophication. The model testing indicates that output of the model was able to reasonably reflect the regularity of algal growth in Jingbo Lake.

Key words: Algae, Growth model, Ecological factors, Jingbo Lake.

湖泊藻类生长状况是湖泊富营养化程度的直接反映, 它受制于湖泊本身的理化性质和污染状况。镜泊湖位于黑龙江省东南部, 是由火山喷发堵塞牡丹江中游河道而形成的河道型堰塞湖。湖泊南北长45 km, 宽0.5—6 km, 平均水深13.8 m, 最大水深64.5 m, 湖底

收稿日期: 1994 07 22, 修改稿收到日期: 1995 01 25。

基本为石质,湖区南部水产养殖场附近有大约 5—10 cm 厚的底泥。湖区南部以水产养殖为主,中部的的主要功能是水运,北部的主要功能是旅游和发电。近年来,由于湖区周围工业和旅游业的发展,排污量增多,营养盐含量增加较快,促进了藻类的生长,镜泊湖遭受富营养化威胁。本文运用实验数据确定藻类生物量和各生态因子的关系,在此基础上建立藻类生物量随时间变化的模型,利用模型预测镜泊湖藻类的发展和湖泊富营养化程度的变化,旨在为镜泊湖的富营养化控制提供依据。

1 藻类生长模型的建立

藻类生长模型通常可以分为静态模型、动态模型和稳态模型 3 类。本文采用动态模型和静态模型相结合的方法预测镜泊湖藻类生长。

1.1 变量的选择和参数值的计算

影响藻类生物量变化的因素应该从藻类的生长和损失两方面加以考虑。影响藻类生长的因素主要有光照、温度、营养盐浓度 3 个方面,另外,湖泊本身的一些特点,如湖泊形状、垂直混和强度也可能影响到藻类生物量的变化。藻类的损失主要包括死亡、沉降和捕食 3 个方面^[1-3]。为了不使模型过于复杂,应该舍去一些非主要因素。

1.1.1 光照对藻类生长的限制可以用公式(1)表示^[4];

$$P = F(I) \cdot P_{\max} \quad (1)$$

其中: $F(I)$ 为光限制系数, $P_{\max}$ 为最大光合速率, P 为实际光合速率。

$F(I)$ 又可以根据 Smith 方程^[4,5]求得:

$$F(I) = I / (I_p + I)^{0.5} \quad (2)$$

其中: I_p 为光饱和强度。

为了考虑整个水柱的平均光限制作用,方程(2)中的 I 取水柱平均光强 $\bar{I}$ ^[6],

$$\bar{I} = \frac{I_0}{h \cdot k} [1 - \exp(-k \cdot h)] \quad (3)$$

其中: I_0 为表面入射光强度, k 为水柱光衰减系数, h 为水柱深度。

通过光控培养实验,得出镜泊湖藻类的光饱和强度为 1450 lx(不考虑种间差异)。通过实测,得出镜泊湖光衰减系数 $k=2.4$ 。在此基础上,根据镜泊湖附近的光照资料^[6],得出每月的光限制系数(设为 F_1 ,见表 1)。

1.1.2 温度 温度 O' Neill^[7]通过实验总结温度对藻类生长的限制作用关系如下:

$$P_{\max}(T_1) = P_{\max}(T_2) \cdot \exp[\Pi(T_1 - T_2)] \quad (5)$$

其中: $P_{\max}(T_1)$ 为温度 T_1 时的最大光合速率, T_2 为藻类生长的最佳温度, $P_{\max}(T_2)$ 为温度 T_2 时的最大光合速率, Π 为温度常数(取 0.07)。

通过选用镜泊湖有代表性的绿藻门的小球藻进行培养试验,测得其生长的最佳温度为 27℃,那么 $P_{\max}(T_1)/P_{\max}(27^\circ\text{C})$ 即为镜泊湖藻类生长的温度限制系数(设为 F_2),将月均温(水温)^[8]代入可求得各月温度限制系数(见表 1)。

1.1.3 营养盐浓度 对藻类生长有限制作用的营养盐有 N 和 P,其限制作用遵循 Michaelis-Menten 方程^[5]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot C / K_c + C \quad (6)$$

其中: μ 为 N(或 P)浓度等于 C 时的生长速率, $\mu_{\max}$ 为 N(或 P)浓度达到饱和时的生长速率, C 为 N(或 P)的浓度, K_c 为 N 或 P 的 Michaelis 常数(或称半饱和常数)。

通过实验,求得镜泊湖 N 的半饱和常数 K_N 为 0.17 mg/l , P 的半饱和常数 K_P 为 0.075 mg/l 。

由于湖区的污染以非点源污染为主,且营养盐的输入几乎全部来自河道,故根据入湖水量及湖水总量的季节变化来推算营养盐浓度的月变化,进而求算 K_N 和 K_P 。由于近年来数据较缺,故采用 1981 年数据推算。平水年、枯水年、丰水年入湖水量和湖水总量存在差别,需分别考虑。将 1981 年入湖 N 总量 $2.55 \times 10^8 \text{ g}$ 和入湖 P 总量 $2.16 \times 10^8 \text{ g}$ 及各月入湖水量和湖水总量代入公式(6)得出 1981 年各月 K_N 和 K_P 值(见表 1)。

表 1 镜泊湖藻类生长的各种限制系数*

Table 1 Various limiting factor of algal growth in Jingbo Lake

月 份 Month		5	6	7	8	9	10
光限制系数 F_L		0.58	0.52	0.58	0.57	0.47	0.37
Light limiting coefficient							
温度限制系数 F_T		0.34	0.50	0.64	0.60	0.43	0.25
Temperature limiting coefficient							
	按枯水年计算	0.74	0.71	0.73	0.76	0.61	0.44
	Calculated according to low water						
1981 年 N 限制系数 K_N	按平水年计算	0.63	0.62	0.66	0.70	0.53	0.36
Nitrogen limiting coefficient	Calculated according to normal water						
	按丰水年计算	0.54	0.53	0.58	0.63	0.45	0.30
	Calculated according to high water						
1981 年	按枯水年计算	0.71	0.68	0.70	0.73	0.57	0.41
P 限制系数 K_P	按平水年计算	0.59	0.58	0.62	0.66	0.48	0.33
Phosphorus limiting coefficient	按丰水年计算	0.49	0.48	0.53	0.59	0.41	0.26

* 镜泊湖藻类的生长季节为 5—10 月, 11 月至次年 4 月为冰冻期

Imboden 等认为^[1],当单位湖面的年 P 输入量 L_P 为中等水平(约 $1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{a}$)时,营养盐的内部循环表现为最大值,而 1981 年镜泊湖的 L_P 达到 $4.5 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{a}$,且湖水流动性很大,故可忽略营养盐内部循环的影响。同时,镜泊湖面积大,缺乏底泥,故湖泊形状、垂直混和强度、水—底泥界面的物质交换均可忽略。

以下考虑影响藻类生物量损失的各方面。

1.1.4 沉淀与死亡 Walters 等^[7]的研究表明: $>30 \mu\text{m}$ 的大型浮游植物沉淀、死亡率之和为其生物量的 0.07 倍,小型浮游植物沉淀、死亡率之和是生物量的 0.015 倍。据作者对 1988 年 5—7 月的样品镜检表明,镜泊湖藻类以 $<30 \mu\text{m}$ 的小型种类为主,故取 0.015。

1.1.5 捕食 Walters^[7]的研究表明,浮游动物捕食率是浮游植物生物量和温度的函数,即 $F=f(BP, T)$ 。镜泊湖的浮游动物以滤食性种类为主,其最大潜在捕食率 $F_M=0.6 \text{ mg}$ 浮游植物/ mg 浮游动物 $\cdot \text{d}$ 。对于浮游植物生物量(BP),其半饱和常数为 0.3 mg/l ^[7],即当温度一定,浮游植物生物量为 0.3 mg/l 时,浮游动物捕食率为该温度下最大潜在捕食率的一半。镜泊湖浮游植物生物量一般在 1 mg/l 以上,因此可不考虑 BP 的影响,只考虑温度的影响。温度修正系数根据 Walters^[7]的曲线从图上求得,根据温度修正系数和最大潜在捕食率算出每月的捕食率(见表 2)。

1.2 模型的建立

为建立模型,在变量选择的基础上再提出 3 个假定:(1)样点选在湖泊中央,假定藻类的输入和输入大致平衡;(2)整个湖区只有 7 月份有微弱的温度分层现象,假定温度随深度的变化对藻类生物量的影响可以忽略;(3)假定每月的浮游动物生物量固定。

根据上述假定,采用 Vohara-Lotka 预测方法^[5]:

$$\frac{dA}{dt} = G \cdot A - L \cdot A \quad (7)$$

其中: A 为藻类浓度, G 为藻类生长率, L 为藻类损失率。

下面分别求算 G 值和 L 值。

(1) G 值 IBP 的研究表明^[7],对于湖泊生态系统,其生长的限制系数是各生态因子限制系数的最小值,因此,对于镜泊湖:

$$G = G_{\max} \cdot \min(F_1, F_2, K_N, K_P)$$

其中: F_1 、 F_2 、 K_N 、 K_P 分别为光照限制系数、温度限制系数、 N 浓度限制系数、 P 浓度限制系数; $G_{\max}$ 为最大生长率, D. P. Larsen 等的估值为 2.4/d。

(2) L 值: $L = D + S + E$

$D + S$: 死亡 + 沉淀速率,在 1.1.4 中已讨论。 E : 被捕食部分占该月浮游植物生物量的百分比。根据每月浮游动物生物量和 1.1.5 中单位浮游动物捕食率,可得每月浮游动物捕食量(见表 2)。

表 2 镜泊湖单位浮游动物捕食率及各月捕食量

Table 2 Predatory efficiency of per unit zooplankton and the quantity of predation per month

月 份 Month	5	6	7	8	9	10
月平均水温 Monthly average water temperature (°C)	11.5	17.2	20.7	19.6	14.9	7.0
温度修正系数 Correction coefficient of temperature	0.50	0.83	0.92	0.90	0.75	0.25
单位浮游动物捕食率 Predatory efficiency of per unit zooplankton	0.30	0.50	0.55	0.54	0.45	0.15
浮游动物生物量 Biomass of zooplankton (mg/l)	0.53	0.80	2.44	2.20	1.30	0.53
捕食量 Quantity of predation (mg/l)	0.159	0.40	1.342	1.188	0.585	0.080

捕食量占该月浮游植物生物量百分比 $E = W/A$, 其中 A 为该月浮游植物生物量, 这样 $L = 0.015 + W/A$ 。

将 G 值和 L 值代回方程(7), 得:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= G_{\max} \cdot \min(F_1, F_2, K_N, K_P) \cdot A - 0.015A - \frac{W}{A} \cdot A \\ &= G_{\max} \cdot \min(F_1, F_2, K_N, K_P) \cdot A - 0.015A - W \end{aligned}$$

令 $G_{\max} \cdot \min(F_1, F_2, K_N, K_P) - 0.015 = k$, 则:

$$\frac{dA}{dt} = kA - W \quad (8)$$

k 、 W 随时间而变化。根据前面假定, k 、 W 按月变化, 每月的 k 、 W 值固定。

解方程(8)得:

$$A(n) = \{[k(n-1) \cdot A(n-1) - W(n-1)] \cdot \exp[k(n) \cdot t + W(n)]\} / k(n) \quad (9)$$

概括据式(9)可以由第 $n-1$ 月的 $k(n-1)$ 、 $A(n-1)$ 、 $W(n-1)$ 值及第 n 月的 $k(n)$ 、 $W(n)$ 值得到第 n 月的 $A(n)$ 值。

1.3 模型初值的确定

为了达到预测的目的, 必须给模型确定一个初值 A_0 、 k_r 、 W_0 , 它们代表进入生长季节以前(头年 11 月至该年 4 月)藻类的生长情况。

考虑到预测年份的不连续性以及模型输入的方便, 在模型中用当年 10 月份的 $k(10)$ 、 $W(10)$ 作为初值 k_r 、 W_0 。这样做存在一定误差, 但 10 月份处于冰冻前期, 与解冻时各生态因子状况基本相似, 因此认为是合理的。

A_0 值的计算根据以下方法进行。经过将目前常用的沃伦华达、狄龙、合田健等模型^[10]的计算结果检验后比较, 狄龙模型计算镜泊湖春季营养盐浓度误差最小。狄龙模型的形式如下^[10]:

$$C = L(1 - R)/H(\frac{Q}{V}) \quad (10)$$

其中, C 为春季 N、P 浓度; L 为单位面积上的年度总 N(或 P)负荷; R 为滞留系数, 镜泊湖的监测结果为 $R=0.46$; H 为湖泊平均水深; Q 为年入湖水量, V 为湖泊相应容积。

根据 1981 年数据求算镜泊湖当年 $C_N=0.38$ mg/l, $C_P=0.04$ mg/l。国外研究表明^[10], 当水体中 $C_N:C_P>7:1$ 时, P 为主要限制因子, 而镜泊湖 1981 年的 $C_N:C_P=9.5:1$, 因此用 C_P 计算当年藻类初始浓度 A_0 。

进入生长季节以前(春末夏初)藻类浓度与春季 P 浓度关系如下^[10]:

$$A_0 = \alpha_1 \cdot C_P / \alpha_2 \quad (11)$$

其中: A_0 为春末夏初藻类浓度, C_P 为春季总 P 浓度; α_1 为 P 的扩散率, 在镜泊湖 $\alpha_1=0.44$; α_2 为产生 1 mg/l 藻类所需 P 浓度, 在镜泊湖取 $\alpha_2=0.009$ 。

经计算镜泊湖 1981 年 $A_0=1.96$ mg/l。

1.4 模型检验与分析

当参数值与初值估算出来以后, 利用计算机编写程序, 将某一年度的初值输入即可得出该年度 5—10 月份藻类生物量变化。利用模型进行预测时, 对枯水年、平水年、丰水年分别加以考虑。表 3 给出 1981 年生物量的模型值(按平水年计算)和实测值。

从表 3 可以看出: 模拟结果中藻类生物量的变化趋势及变化速率与实测结果大体一致, 峰值均出现在 8 月份, 这对湖泊富营养化预测十分有利, 所不同的是模拟值较实测值偏小, 原因可能有:

(1) 初值 A_0 偏低。但增加 A_0 输入后, 虽然 5、6 两个月的生物量提高了, 但其它结果受到影响, 且峰值出现的月份发生变化, 故不改变 A_0 值;

(2) 温度限制的复杂程度考虑不够。由于实验本身的复杂性, 仅以小球藻的最适温度(27℃)作为所有藻类的最适温度, 这对温度限制较强的 5、6 月份是造成其生物量偏低的又一原因。

(3) 湖泊生态系统是个复杂的统一体, 本模型中假定月内浮游动物生物量固定。事实上, 浮游植物和浮游动物的消长是相互制约的, 此外, 鱼类对浮游植物生物量的影响未能考虑进去, 这些均影响模型的精确性。提高精度的途径是进行大量的模拟实验, 这将有待

表 3 1981 年藻类生物量模拟值与实测值(mg/l)

Table 3 Simulated and real value of algal biomass in 1981

月 份 Month	5	6	7	8	9	10
模拟值 Simulated volume	2.12	3.21	9.71	11.39	5.96	2.70
实测值 Measured volume	9.6	9.9	12.2	14.2	10.3	缺少数据

今后进一步探讨。

然而,评价一个模型是否合理,不能仅看其能否复制每一个监测数据,而应该看它能否表达总体状况和一般变化规律,从这个角度说,本模型是合理的。

2 藻类生长与湖泊富营养化预测

2.1 湖泊排污状况预测

黑龙江省环保所^[11]根据 80 年代初的数据对 1990 和 2000 年的 N 输入进行预测,预计入湖总 N 量 1990 年为 31.86×10^8 g/a, 2000 年为 56.08×10^8 g/a, 根据 80 年代初的 N:P=9.5:1, 以总 N 负荷估算总 P 负荷, 预计 1990 年总 P 负荷 3.35×10^8 g/a, 2000 年总 P 负荷为 5.90×10^8 g/a。

2.2 藻类生长预测

根据上述模型,得出 1990 年和 2000 年镜泊湖藻类生物量(见表 4)。

表 4 1990 年和 2000 年镜泊湖藻类生物量预测值(mg/l)

Table 4 Predicted algal biomass of Jingbo Lake in 1990 and 2000

年 份 Year	月 份 Month					
	5	6	7	8	9	10
1990 年按枯水年预测	2.47	3.25	10.05	10.89	5.62	3.33
Estimated according to low water						
按平水年预测	2.47	3.25	10.05	10.89	5.62	3.33
Estimated according to normal water						
按丰水年预测	2.47	3.33	10.05	10.88	5.88	3.51
Estimated according to high water						
2000 年按枯水年预测	3.87	4.31	11.36	13.80	7.46	7.24
按平水年预测	3.87	4.31	11.36	13.80	7.46	7.24
按丰水年预测	3.87	4.31	11.36	13.80	7.46	7.24

2.3 预测结果分析

从 2000 年的预测值来看,藻类生物量不随水期(枯水年、平水年、丰水年)而变化,即生长期营养盐浓度变化对藻类生物量变化不产生影响,出现这种现象,需要从不同年份的光照限制系数、温度限制系数、N 浓度限制系数、P 浓度限制系数的比较中进行分析(表 5)。

从表 5 可以看出:(1) N 浓度始终不是主要限制因子;(2) 在藻类生长旺盛的 7、8 两月, P 浓度成为主要限制因子;(3) 在 5、6、9、10 四个月中, P 浓度和温度均可能限制藻类生长,但当 1990 年、2000 年 P 浓度提高后,这几个月内温度成为主要限制因子。

从限制系数的比较中可以推测,当 7、8 两月的 P 浓度发展到一定程度后, P 即失去其主要限制因子的作用,此时在整个生长季节温度、光照成为主要限制因子。在同一地区,光照、温度条件随年份变化很小,而镜泊湖又是中高纬度高山湖泊,温度限制作用明显,因此镜泊湖藻类随营养盐浓度的增加而增加到一定程度后不会再继续发展。同时,镜泊湖又是一河道型湖泊,水流动性强,客观上也限制了富营养化的发展。镜泊湖富营养化只能发展到一定程度,具体需要在进一步搜集资料的基础上进行更准确的预测。

3 结论与讨论

3.1 N 浓度始终不是镜泊湖藻类生长的主要限制因子;在藻类生长旺盛的 7、8 两月, P 浓度成为主要限制因子;在 5、6、9、10 四个月, P 浓度和温度均可能限制藻类生长。

表 5 不同年份限制系数比较(以平水年为标准)*

Table 5 Comparison of limiting coefficient of different years(Based on normal hydrological condition)

项 目 Item	年份 Year	月 份 Month					
		5	6	7	8	9	10
N 浓度限制系数 Nitrogen limiting coefficient	1981	0.63	0.63	0.67	0.70	0.53	0.53
	1990	0.69	0.68	0.71	0.75	0.59	0.43
	2000	0.80	0.79	0.81	0.84	0.72	0.57
P 浓度限制系数 Phosphorus limiting coefficient	1981	0.40	0.47	0.51	0.56	0.38	0.24
	1990	0.59	0.58	0.62	0.66	0.48	0.33
	2000	0.72	0.70	0.74	0.77	0.62	0.46
光照限制系数 Light limiting coefficient	—	0.58	0.52	0.58	0.57	0.57	0.37
温度限制系数 Temperature limiting coefficient	—	0.34	0.50	0.64	0.60	0.43	0.25

* 在对应的年份和月份中, 限制系数最小者为主要限制因子, 其余为非主要限制因子

3.2 随着污染物排放增加, P 浓度提高到一定程度后, P 即失去其主要限制因子的作用, 温度成为主要限制因子, 有利于遏制湖泊富营养化的发展。

3.3 从预测结果看, 本文建立的模型基本合理, 能较好地发挥预测作用, 但由于客观条件的限制, 该模型尚需进一步精确化、合理化。

致谢 本文的资料和实验数据均来源于北京大学“镜泊湖湖泊富营养化研究”课题组。与作者一起参加野外工作的还有邵庆山、周立琼、姜艳萍、宋杰远、韩东光、洪志明、赵智杰、向丹梅、刘建军、何若愚等同志, 姜艳萍、洪志明、赵智杰、向丹梅等同志完成了大量实验室工作; 牡丹江市环境科学研究所提供了大量有关镜泊湖的背景资料, 陈兴同志指导镜检工作, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Rose K A *et al.* Stepwise iterative calibration of a multi-species phytoplankton-zooplankton simulation using laboratory data. *Ecological Modeling*, 1988, 42(1): pp. 1—32
- 2 Ravera O. *Biological aspects of freshwater pollution*. London: Pergamon Press. 1979, 93—111
- 3 Bartell S M *et al.* *Ecological risk estimation* Chelsea: Lewis publishers, 1992, 43—64
- 4 Moss E. *Ecology of freshwaters*. Oxford: Blackwell Scientific publication. 1980, 38—86
- 5 Welch E. *Ecological effects of waste water*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981, 16—181
- 6 北京气象中心资料室. 中国太阳辐射资料. 北京: 气象出版社. 1982—1985, 12—40
- 7 Lecren E D and R H Lowe-Mcconnell. *The function of freshwater ecosystems*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1980, 455—477
- 8 北京气象中心资料室. 中国地面气象记录月报. 北京: 气象出版社. 1981, 10—35
- 9 王骥, 沈国华. 武汉东湖浮游植物初级生产力及其与若干生态因素的关系. *水生生物学集刊*, 1981, 7(3): 295—310
- 10 中科院南京地理所. 我国主要湖泊水污染现状与趋势预测. *环境污染与防治(增刊)*. 1988, 58—100
- 11 中国水产科学院黑龙江水产研究所等. 黑龙江省渔业资源. 哈尔滨: 黑龙江朝鲜民族出版社. 1984, 24—26