

生态工程中食物链组合的环分析

郭中伟 李典谟

(中国科学院动物研究所, 北京, 100080)

Q14

A

摘 要 本文研究了一个用于治理水体生态系统富营养化的生态工程。应用环分析方法对工程中的食物链的组合进行了分析。在这里, 贝类(SF)被用于清除过量的藻类(AL), 种植水生植物(AP)改变营养的流转途径并且放养食植性鱼类(FS)。通过捕捞鱼和贝, 使水体中的有机物(OM)和无机盐(NP)沿着从藻类到贝类和从水生植物到食植性鱼类两条途径由水体生态系统中输出。应用环分析的手段, 可以调整生态工程中食物链的组合结构, 使整个生态工程具有某种特定的功能。

关键词: 环分析, 生态工程, 食物链, 富营养化。

湖泊、水库、内海和河口等水体, 水流缓慢, 停留时间长, 既适合于植物营养素的积聚, 又适合于藻类、水生植物等的繁殖。已经富营养化的水体即使切断外界营养源, 亦很难自净, 这是水体富营养化的重要特征^[1]。

应用生态工程的方法, 对富营养化的水体生态系统的食物链结构进行重新组合, 使水体内的营养素被有效地利用, 是当前治理水体富营养化的有效手段^[2]。目前, 生态工程的设计主要依赖于经验, 对其结构缺少系统地分析。本文将环分析方法应用于生态工程的研究, 是对生态工程设计科学化的一种尝试。

环分析方法在假定系统处于平衡态的条件下, 提供了小扰动下系统稳定性的定性信息^[3]。

假定一个生态系统可用下述一组非线性方程表示:

$$\begin{aligned} dx_j/dt &= f_j(x_1, x_2, \dots, x_n, c_1, c_2, \dots, c_m) \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

这里 c_i 是系统的参数, 通常表示环境的特征, 例如温度、雨量, 或者种群的生长率等。如果在平衡点附近线性化这些方程, 可得到一个群落矩阵 A

$$\begin{aligned} A &= [a_{ij}], i = 1, 2, \dots, n \\ j &= 1, 2, \dots, m \\ a_{ij} &= \partial f_j / \partial x_i | \text{平衡点值} \end{aligned}$$

可以用一个图表示这个系统, 顶点代表变量, 变量之间关系用一个带方向的连接它们的线段表示。所以一个把 x_i 连接到 x_j 的线段表示 x_i 对 x_j 的作用, 这对应于矩阵元素 a_{ij} , 把一个连线或者一系列连线离开再进入同一个顶点的称为环(loop)。

以后 Levins 把这种分析推广到研究平衡态附近群落的进化^[4]。这种进化可以理解为平衡态的水平在不断地变化。由文献[4]的方程 26 得:

$$x_i/c_k = \sum_{j,k} f_j/c_k P_{ij}^{(k)} F_k^{(j)}, i/F_k$$

这里 $P_{ij}^{(k)}$ 是从变量 j 到 i 包含 $(k-1)$ 条连线的开路径; $F_k^{(j)}$ 是由那些不出现在 $P_{ij}^{(k)}$ 中的元素

所组成的互补子系统的反馈。由于 F_s 是整个系统的反馈,当系统是稳定时,它应该是负的。如果互补子系统具有零反馈,那么开路径就没有作用;如果互补子系统具有负反馈,则开路径具有正的作用。

Giavelli 等人曾应用环分析方法,对自然群落的稳定性进行了分析。他们利用计算机模拟了不同的群落结构,分别讨论了它们的稳定性^[3]。Tummala 等将环分析方法用于了农业系统的设计^[6]。

1 富营养化水体生态系统的模拟与分析

在富营养化水体生态系统中,藻类(主要是蓝藻,绿藻)(AL)大量繁殖生长,抑制了水生植物(AP)的生长,因而,食植动物潜在的多种食物来源将受到限制,而且某些鱼类已可能从系统中消失;进入水体的有机物(OM)分解成无机盐(NP),分解过程消耗了大量溶解氧(DO),从而使水体缺氧,进一步破坏了鱼类的生存条件,导致系统中基本无鱼;无机盐促进了植物的生长,死亡的植物又变成有机物,参加循环;系统中还生活着以藻类为食的浮游动物(ZP)。根据以上的描述,建立环分析模型(图 1)。

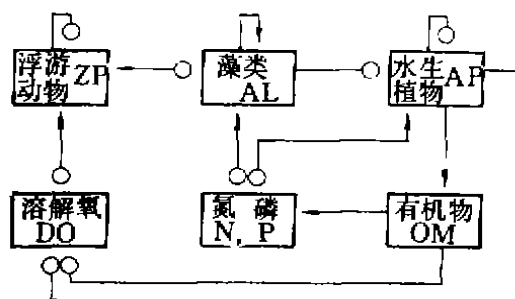


图 1 富营养化水体生态系统中各组份间生态关系的环分析模型

Fig. 1 Model of loop analysis for the ecological relationships between components in eutrophic aquatic ecosystem
AL: Algae; AP: Aquatic Plants;
ZP: Zooplanktons; DO: Dissolved Oxygen;
NP: Nitrogen and Phosphorus;
OM: Organic Matter.
—, Positive interaction;
○—, negative interaction

表 1 富营养化水体生态系统中各组份间生态关系的环分析结果

Table 1 Result of loop analysis for the ecological relationships between components in eutrophic aquatic ecosystem

输入结点 Input node	受影响结点 Affected node					
	AL	DO	DP	AP	NP	OM
AL	—	+	+	0	—	—
DO	+	—	+	0	+	+
DP	—	—	+	0	+	—
AP	+	—	—	0	—	+
NP	+	—	+	0	+	—
OM	+	—	+	—	+	—3
全局反馈 Overall feedback	正 positive			负 negative		
	0			4		

+, 正作用 positive affection;

—, 负作用 negative affection

从模型的模拟结果中(表 1),可以知道:该系统是负反馈的,这样即使对其中某些组份的量进行调节,如减少有机物的输入等,也不易达到净化水体的目的。只有对系统结构进行调整(主要是对食物链的结构进行重新组合),改变其原有的功能,方能达到治理的目的。

2 治理富营养化的生态工程中食物链组合的设计与模拟分析

富营养化的治理,关键是改变无机盐(NP)流转途径,减少其流向藻类(AL)方向的量。本研究利用提高水生植物(AP)的密度,增大该分室对无机盐的容纳量,利用使营养流分流的手段,达到控制藻类密度的目的。

为了提高水生植物的密度,首先要减少过量繁殖的藻类对其生长所造成的不利影响。因此,向系统中引入某一(些)种贝类(SF),利用它们以藻类为食的特性,适量放养可以抑制藻类的生长,降低藻类密度,建立加入贝类组份的系统环分析模型(图 2)。

模型的模拟结果显示(表 2):当系统重新达到平衡状态后,增大贝类(SF)的密度,可以使藻类(AL)的密度降低,由藻类造成的不利于其它生物生存的影响就会相应减弱。这样,就可以通过调整贝类的密度,来控制藻类的密度,进而改变系统中的环境。

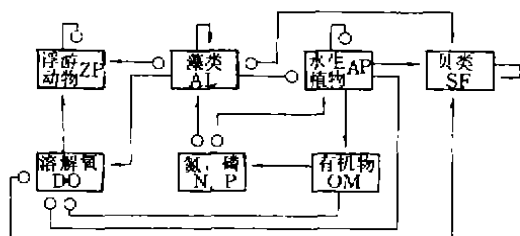


图 2 加入贝类组份的系统环分析模型

Fig. 2 Model of loop analysis for the ecological relationships between components in aquatic ecosystem with the component of shellfish

SF: shellfish.

藻类密度降低后,系统内的环境条件改变了。因具有相近的生态位,水生植物(AP)开始占据原来属于藻类的生存空间。辅之以必要的人工手段(如:引种),水生植物的密度提高了,增大了(AP)分室对无机盐(NP)的容纳量。这个阶段,水生植物在系统中处于自促进(self-accelerating)状态(即较高的密度,导致较高的繁殖率)。建立相应的环分析模型(图 3)。

模型的模拟结果表明(表 3):在系统处于平衡状态时,增大水生植物(AP)的密度,藻类(AL)的密度和无机盐(NP)的浓度就会相应减少。这样,以水生植物的密度为控制变量,就可以对系统内藻类的密度和无机盐的浓度进行控制。

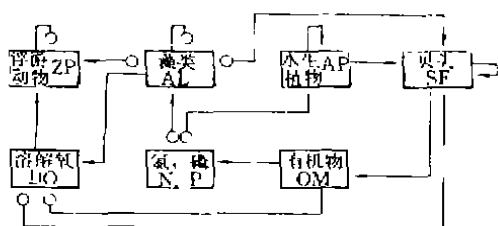


图 3 水生植物处于自促进状态时系统的环分析模型

Fig. 3 Model of loop analysis for the ecological relationships between components in aquatic ecosystem in which aquatic plant is self-accelerating

表 2 加入贝类组份的系统环分析结果

Table 2 Model of loop analysis for the ecological relationships between components in aquatic ecosystem with the component of shellfish

输入 结点 Input node	受影响结点 Affected node						
	SF	AL	DP	AP	DO	NP	OM
SF	?	-	+1-3	0	+1-3+21-	-	-
AL	?	-	?	0	+1-2+1-3	-	-
DP	0	0	+21-	0	0	0	0
AP	?	+	?	0	+1-2+1-2	+	+
DO	+	?	+1-3	0	-	+	?
NP	+	?	+1-3	0	-	+	+1-3
OM	+31-+21-	?	+1-2+1-2+21-	?			
全局反馈		正 positive			负 negative		
Overall feedback		2			5		

?: 正, 负混合 Positive and negative mixing

表 3 水生植物处于自促进状态时系统的环分析结果

Table 3 Result of loop analysis for the ecological relationships between components in aquatic ecosystem in which aquatic plant is self-accelerating

输入 结点 Input node	受影响结点 Affected node						
	AP	SF	AL	DP	DO	NP	OM
AP	?	0	-	?	+21-	-	-
SF	0	0	0	+1-2	+1-2	0	0
AL	?	0	+	?	+1-2	?	+
DP	0	0	0	+21-	0	0	0
DO	+	0	-	+1-2	?	-	?
NP	+	0	-	+1-2	?	-	-
OM	+21-+1-2	?	?	?	+1-2+21-		
全局反馈		正 positive			负 negative		
Overall feedback		1			2		

当水生植物达到一定的密度后,放养食植性鱼类(FS),其目的有 2:既可以通过食植性鱼类来控制水生植物的密度,又可以对系统内的能量和物质加以利用。这样,治理水体生态

系统富营养化的生态工程的食物链结构就被组合成了。要求该工程具有以下几种功能:(1)通过调控,可以使系统内各组份的量之间保持适当的比例;(2)系统内的物质,能量可被利用,使整个工程具有一定的经济效益;(3)系统具有一定的稳定性。建立该生态工程的分析模型(图4)。

经过计算机模拟,了解到该生态工程在其系统内处于平衡状态时的行为(表4):当食植性鱼类(FS)的密度变动时,促使藻类(AL)和浮游动物(ZP)的密度出现相同的变动。而导致水生植物(AP)和贝类(SF)的密度出现相反的变化趋势。贝类(SF)的密度的变化产生的影响正好同食植性鱼类的相反。

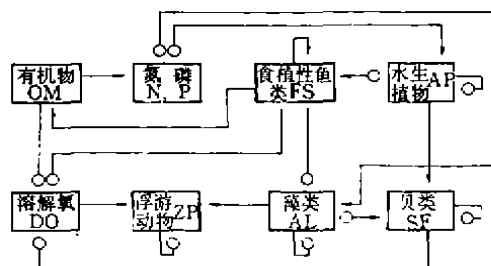


图4 生态工程系统的环分析模型

Fig. 4 Model of loop analysis for the ecological relationships between components in ecological engineering
FS, gramivorous fish.

表4 生态工程系统的环分析结果
Table 4 Result of loop analysis for the ecological relationships between components in ecological engineering

输入结点 Input node	受影响结点 Affected node							
	FS	AL	AP	DP	SF	NP	OM	DO
FS	0	+	-	+	-	-	0	+,-3
AL	0	+	-	+	?	-	0	?
AP	0	-	+	-	?	?	0	?
DP	0	0	0	+2,-	0	0	0	0
SF	0	-	+	-	+	+	0	?
NP	0	+2,-	+2,-	+2,-	?	+2,-	0	+,-3
OM	+,-2	?	+2,-	?	?	?	+2,-	?
DO	0	+2,-	+2,-	+2,-	?	+2,-	+2,-	+,-3
全局反馈				正 positive		负 negative		
Overall feedback				2		4		

可以通过对食植性鱼类(FS)和贝类(SF)的适量捕捞,达到调控其它组分的密度,使它们之间保持一个适当的比例的目的。这样,系统内的物质和能量也可沿着水生植物(AP)→食植性鱼类(FS)和藻类(AL)→贝类(SF)两条途径被利用。

从模拟结果,还可以发现,有机物(OM)的增多可能造成食植性鱼类(FS)的密度的下降,其原因主要是由于有机物的分解,消耗了系统中的溶解氧(DO),因而,使食植性鱼类因缺氧而密度下降。如果要求系统能从外部接纳一定量的有机物,就要注意使系统内的溶解氧维持足够的含量。

该系统的全局反馈中,负反馈多于正反馈,这表明它具有较高的稳定性。当受到一定程度的干扰后,就有可能较快地恢复到平衡状态。

上面的分析说明:所设计的生态工程具备了本研究提出的3点要求。

3 模式的实验验证与分析

上面,本文对治理水体生态系统富营养化的生态工程中食物链组合的结构和功能进行了理论上的推论。现在,对这一推论进行验证与分析。

在京郊选择一个水面积为479.3m²的池塘作为实验塘。由于含有较多的有机物的生活和生产废水的流入,致使该池塘聚集了较高浓度的有机物和无机盐,而呈现“富营养化”。6月上旬测定塘内藻类密度达7—9cm³/m²,其中主要是蓝藻,绿藻和硅藻等浮游植物,在水面形成“水花”。塘内有少量的苦草(*Vallisneria spiralis* L.)等水生植物,并有少量的浮游动物和底栖动

物,无鱼。

依照前述的方法和步骤,进行试验。所用材料均取自当地。首先向塘内投放无齿蚌(*Anodonta*)密度为 1—2 个/ m^2 。39d 后,藻的密度下降到 $3.27\text{cm}^3/\text{m}^2$,水草的密度增大到 22.5 株/ m^2 。这时,再向塘中放养 2 龄草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*),密度为 $0.7\text{kg}/\text{m}^2$ 。到第 66d 时,鱼的密度增大到 $1.07\text{kg}/\text{m}^2$,藻的密度为 $4.24\text{cm}^3/\text{m}^2$,贝的密度为 1.79 个/ m^2 ,水草的密度为 12.8 株/ m^2 (表 5)。这时,实验塘内的“水花”基本消失,“富营养化”程度减弱。

表 5 试验塘中藻、贝、草和鱼的密度的动态变化

Table 5 The dynamic change of densities of Algae, Shellfish, Aquatic plant and Fish in experiment pool

时间 Time (d)	藻 Algae (cm^3/m^2)	贝 Shellfish (个/ m^2)	草 Quaticplant (株/ m^2)	鱼 Fish (kg/m^2)
3	8	1.5	3	0
6	8	1.5	3	0
9	8	1.5	3.2	0
12	7.8	1.5	3.5	0
15	7.3	1.5	4.3	0
18	7	1.6	5	0
21	5.7	1.6	6.5	0
24	5	1.7	9.1	0
27	4.3	1.7	12.8	0
30	3.8	1.75	15.3	0
33	3.5	1.78	20.5	0
36	3.3	1.78	21.4	0
39	3.27	1.78	22.5	0
42	3.2	1.79	22.3	0.73
45	3.3	1.79	22	0.76
48	3.25	1.79	20	0.80
51	3.12	1.79	18	0.84
54	3.53	1.79	17	0.88
57	3.6	1.79	15.5	0.92
60	3.9	1.79	14	0.97
63	4.2	1.79	13	1.02
66	4.24	1.792	12.8	1.07

通过上面的试验,可以看到当贝的密度增大时,藻的密度相应减少了,而水草的密度随之相应增大了;当贝的密度稳定后,藻的密度变化受水草的密度变化的影响;当鱼被加入到池内后,鱼的密度又影响着水草的密度。这样通过调整鱼的密度,就可以控制水草的密度,进而控制藻的密度。试验结果验证了前面的推论。

4 结论

利用生态工程的方法,对一个生态系统进行改造,主要是通过对原有系统内的组分的种类和它们之间的比例进行调整,使不利因素转变成有利因素而被利用。这里,所谓的改造就是利用。上面所讨论的富营养化问题中,关键是由于过量的有机物和无机盐的聚积,诱发了藻类的大暴发。这时,过量的有机物和无机盐对系统是不利因素。通过建立新的食物链组合,向系统中加入新组分,调整组分间的比例,提高水生植物对无机盐的容纳量,改变无机盐原有的流转途径,使其最终沿着水生植物→食植性鱼类和藻类→贝类的两条渠道被利用。这样,有机物和无机盐就转化

成提高捕捞量的有利因素。寓改造于利用之中,是生态工程的核心。

生态工程的组建是一个系统工程。同物理系统一样,良好的系统控制机制的形成,是建立在正确的系统分析与辨识的基础上的。同时,由于其组分主要是生物,所以又具有许多特殊性。由于生物的生长周期长短不同,并且易受环境条件的影响,所以正确地掌握与利用它们的生长和繁殖规律以及其与环境条件之间的关系是重要的,这也决定了组建过程应该分阶段进行。

调整食物链的组合结构是组建生态工程的重要手段。利用食物链来实施控制;利用食物链引导系统内的物质和能量流。

利用环分析方法分析生态工程中食物链的结构与功能、指导食物链的重新组合是可行的。它揭示了系统的许多重要而又不易观察到的性质,有利于生态工程组建手段的程序化和科学化,并且为定量分析提供了依据。

参 考 文 献

- [1] Higgins T J and Burns R G. *The Chemistry and Microbiology of Pollution*. Acadmic Press, 1975, 106—108
- [2] 马世骏. 生态工程--生态系统原理的应用. 生态学杂志, 1983, 4, 20—22
- [3] Levins R. Qualitative analysis of partially specigical systems. *AnnNY. Acad. Sci.*, 1974, 231, 123—138
- [4] Levins R. Evolution in communities near equilibrium. In: M L Cody and J M Diamond (Editors), *Ecology and Evolution of Communities*. Harvard University Press, Cambridge, 1975, MA, 16—49
- [5] Giavelli G, Rosslo and Siri E. Stability of natural communities, loop analysis and computer simulation approach. *Ecol. Modelling*, 1988, 40, 131—143
- [6] Tummala L and Li Dianmo. Design of stable agricultural ecosystems. Proceeding of International Conference on Applied System Research, WestGermany, 1984

LOOP ANALYSIS FOR THE COMBINATION OF FOOD CHAINS IN ECOLOGICAL ENGINEERING

Guo Zhong-Wei Li Dian-Muo

(Institute of Zoology, Academia Sinica, Beijing 100080)

An ecological engineering for treating eutrophication is studied. Loop analysis is used for analysing the combination of food chains in the ecological engineering. In the engineering, shellfishes(SF) are used for cleaning excessive algae(AL). For changing the parghway of nutrients transferring, aquatic plants(AP) are cultured and are consumed by the farmed fishes(FS). By catching shellfish and fish ,organic matter(OM) and inorganic salts(NP) in the water body can be exported along the pathways of algae(AL) to shellfishes(SF) and aquatic plants(AP) to fishes(FS). By loop analysis, the structure of food chain in ecological engineering can be appropriately regulated so that the ecological engineering holds a certain specific function and materials and energy can beeffectively utilized.

Key words: loop analysis, ecological engineering, food chain, eutrophication.