

大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的结构分析*

王寿松 冯国灿

(中山大学数学系, 广州 510275)

夏综万 史键辉

(国家海洋局南海分局, 广州 510300)

齐雨藻 吕颂辉

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

提要 根据 1990—1992 年期间对大鹏湾所发生的夜光藻赤潮的大量研究资料, 从气象、海况、化学、生物等 4 方面筛选出大鹏湾夜光藻赤潮发生环境的 22 种基本要素, 并利用演绎结构模拟(ISM)方法, 分析各要素之间的直接(因果)关系和间接关系, 推导出大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的整体关联结构图, 从 6 个先后层次上直观地反映出赤潮发生的全过程, 为建立赤潮发生机理的动态数学模型打下基础, 且可为研制赤潮预测预报系统提供若干参考依据。

关键词 赤潮 夜光藻 演绎结构模拟 发生要素 结构分析

从 1990 年开始, “中国东南沿海赤潮发生机理”研究课题组在南海大鹏湾海域建立了水文气象、浮游动植物等变化的观测站, 取得了大量的有关数据(冯国灿等, 1993), 并对大鹏湾夜光藻赤潮的环境因素分析发表了大量的研究结果。这些分析结果对研究赤潮发生的机理无疑是非常重要的。但这些研究工作往往是个别地去寻求某些因素对赤潮发生的相关关系或从若干因素中找出其主成分因素。事实上, 有关赤潮发生的因素群不是同时起作用的, 而是随时间不同逐个连锁状相互作用而产生赤潮的。池田三郎等(1987)应用演绎结构模拟(Interpretive Structural Modelling, ISM)方法, 从众多因素中找到这种连锁过程, 明确这个过程中的先驱因素, 并试图用于赤潮发生的预测预报。本文利用 ISM 方法对大鹏湾(盐田)夜光藻赤潮的发生要素进行了整体结构分析的探讨。

1 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的因果分析

根据 ISM 方法(高桥诚, 1989), 要研究一个复杂系统的整体结构形式, 首先必须明确构成系统的各个要素之间的直接(因果)关系, 再利用图表理论找出任意要素之间存在的间接关系, 从而弄清楚整体系统的关联结构关系。赤潮发生过程是一个复杂动态系统, 从赤潮生物的出现到增殖、聚集以致形成赤潮有一连串的运动发展过程, 要真正跟踪乃至完全了解到一次赤潮发生的全过程是相当不容易的。

大鹏湾海域的主要赤潮生物有夜光藻、反曲原甲藻、多纹膝沟藻、海洋褐胞藻等, 而夜

* 国家自然科学基金资助, 9389008 号。

收稿日期: 1993 年 7 月 23 日, 接受日期: 1993 年 11 月 30 日。

光藻为大鹏湾最主要的赤潮生物,几乎每年都要暴发夜光藻赤潮,在1990—1991年期间曾发生大小赤潮7次,1992年3—5月间也发生4次(吕颂辉等,1992;谢健等,1993)。

大鹏湾是一个半封闭型的弱潮流海区,水流缓慢,没有大的河流注入,潮波在湾内呈不规则半日潮。涨潮流把香港大埔水道的污染物推向大鹏湾沿岸海域,而落潮流以偏东为主导方向,使盐田一带的污染物对东部产生影响。潮流的作用使沿岸有机物随潮流的反复回荡,使底部富营养物质也翻到表层,又被推到沿岸,加剧了氮、磷在沿岸的积聚,同时沿岸微量元素也易于进入海域,为赤潮生物生长提供了所需的营养物质。数据分析也表明当地流况和海潮的影响,致使夜光藻向岸边迁移和聚集而形成赤潮(黄伟建等,1993)。

表1 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素之间的因果关系

Tab. 1 Causality existed among different factors associated with the *Noctiluca scintillans* red tide in the Dapeng Bay

要素(s_i)	气象						海况				化学						生物							
	气温(升)	水温(升)	日照量(增)	风速(增)	西南风(大)	东南风(大)	潮流(大)	潮流(小)	上升流	垂直混合(增)	盐度(增)	总氮N(高)	总磷P(高)	硅Si(增)	微量元素(增)	维生素(增)	浮游动物(减)	竞争藻种(减)	食饵藻种(增)	增殖速度(增)	现存量(增)	聚集		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
气温(升)	1	1																						
水温(升)		2																			1			
日照量(增)			3																					
风速(增)				4						1														
西南风(大)					5					1														
东南风(大)						6					1												1	
潮流(大)							7				1													
潮流(小)								8															1	
上升流									9			1	1	1	1	1								
垂直混合(增)										10		1	1	1	1	1								
盐度(增)											11										1			
总氮N(高)												12								1				
总磷P(高)													13							1				
硅Si(增)														14						1				
微量元素(增)															15					1				
维生素(增)																16					1			
浮游动物(减)																	17				1			
竞争藻种(减)													1	1	1	1	1							
食饵藻种(增)																						1		
增殖速度(增)																							1	
现存量(增)																								1
聚集																								1

表中第*i*行第*j*列位置上用“1”表示第*i*要素对第*j*要素有因果关系。

夜光藻缺乏自营养方式,并不能直接吸收无机营养盐,但赤潮期间的高营养盐却可促进夜光藻的主要食物——硅藻等的大量繁殖。微量元素 Fe, Mn 等及维生素 B₁, B₁₂ 对浮游植物的生长都有一定的促进作用。水温与夜光藻也密切相关,其最适水温是 19—22℃ (谢健等, 1993)。

根据上述资料分析,从气象、海况、化学、生物等 4 方面筛选出大鹏湾夜光藻赤潮发生的 22 种要素,它们之间的因果关系见表 1。

2 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的结构分析

虽已列出了所有要素之间的因果关系表,但人们却未能立即明瞭这众多要素之间的整体结构关系,而 ISM 方法将可作为认识系统结构的辅助手段。ISM 方法的最终目标是使组成要素的结构图表化,它的理论基础是可以“1”或“0”表示是否有关系的布尔代数,以及根据直接关系探求间接关系的图表理论。为了方便实现 ISM 方法应用于赤潮发生要素结构分析的研究,采用更严格的数学形式叙述 ISM 方法的运作过程,并制作了计算机实施软件。由于要素较多,往往只要修改或增减一、二个要素之间的因果关系,就会使整个系统结构大为改观,这要用人工制表分析是相当困难的。经实践检验,计算机实施软件对于修正要素结构关系的结果分析是非常迅速有效的。

将 ISM 方法实施程序应用于大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的结构分析过程与结果列下。

2.1 建立要素关联矩阵 M_0 。 对应因果关系表中有“1”的行列位置,在矩阵 M_0 的相应

表 2 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的可达矩阵 M' 的元素

Tab. 2 Elements of the Connected Matrix M' of the essential factors associated with the *Noctiluca scintillans* red tide in the Dapeng Bay

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

22×22

行列位置上赋予“1”值,其余位置(包括对角线)上赋予“0”值,即得到有 22 行 22 列的关联矩阵 M_0 ,它是由 0 和 1 组成的两值方阵。

2.2 计算可达矩阵 M^n 在 M_0 上加入单位矩阵 E 得到邻接矩阵 M , 即 $M_0 + E = M$ (布尔和)。进行布尔积运算: $M \times M = M^2$, 反复运算该步骤,直至 $M^n = M^{n+1}$, 所求得的 M^n 即为可达矩阵, 它包含着直接关系和间接关系。对应于因果关系表 1 所求得的可达矩阵为 M^5 , 其元素见表 2。

2.3 编制要素群集合分析表 将可达矩阵 M^5 第 i 列(纵向)中有“1”元素所对应的诸要素组成先行集合 P_i 。将可达矩阵 M^5 第 i 行(横向)中有“1”元素所对应的诸要素组成到达集合 R_i 。

求交集 $P_i \cap R_i = Q_i$ 。分别将 P_i, R_i, Q_i 对应于要素 s_i ; 编制出要素群集合分析表(见表 3)。例如, $P_2 = \{s_1, s_2, s_3\}, R_2 = \{s_2, s_{20}, s_{21}\}, Q_2 = \{s_2\}; P_{22} = \{s_6, s_8, s_{22}\}, R_{22} = \{s_{22}\}, Q_{22} = \{s_{22}\}$, 等等。

2.4 决定关联结构层次 根据分析表 3 从 R_i 和 Q_i 中抽出有完全相同元素所对应的要素即为第 1 层次的要素。

在分析表 3 中删去第 1 层次的所有要素及这些要素所对应的整列集合, 得到新的分析表, 对其重复第 1 层次的步骤, 即从新表里的 R_i 和 Q_i 中抽出有完全相同元素所对应的

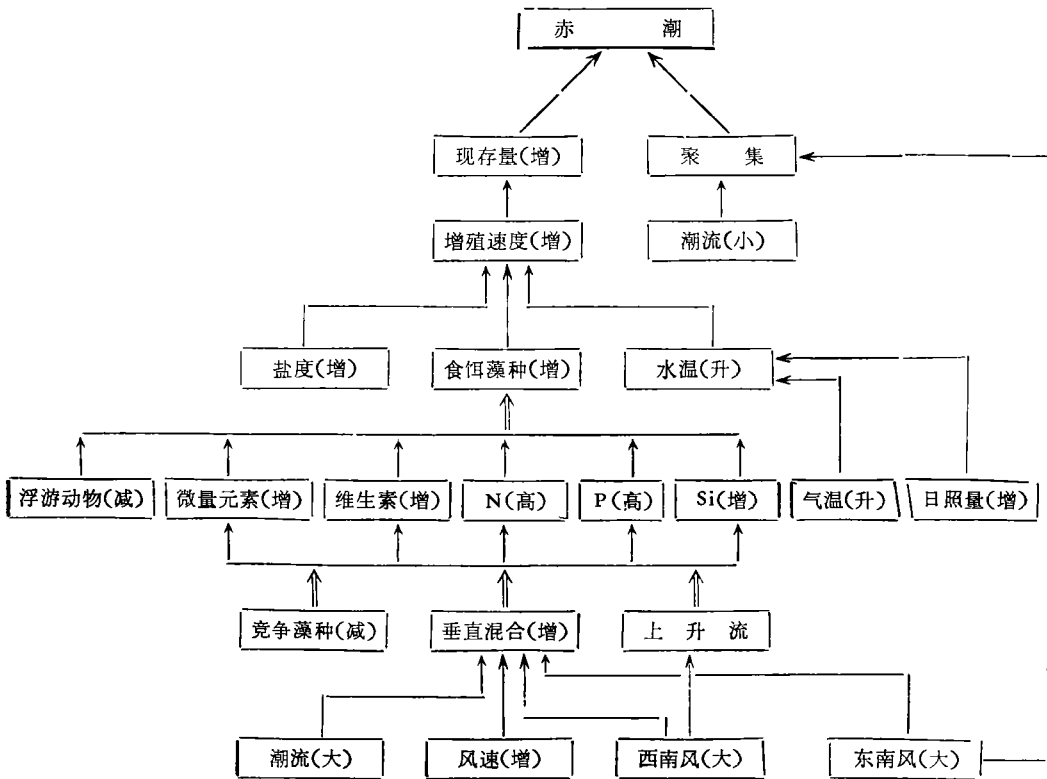


图 1 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的关联结构

Fig. 1 Relation structure of the essential factors associated with the *Noctiluca scintillans* red tide in the Dapeng Bay

要素便是第 2 层次的要素。

再从新的分析表中删去第 2 层次的所有要素,按第 2 层次的步骤反复进行下去,直至全部要素的所属层次均被确定下来为止。

经计算可知大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的关联结构有 6 个层次,其中各层次的要素可见关联结构图(图 1)。

表 3 要素群集合分析表

Tab. 3 Group set analysis of the essential factors

要素 s_i	s_1	s_2	s_3	...	s_{12}
先行集 P_i	P_1	P_2	P_3	...	P_{12}
到达集 R_i	R_1	R_2	R_3	...	R_{12}
$P_i \cap R_i = Q_i$	Q_1	Q_2	Q_3	...	Q_{12}

2.5 作出关联结构图 将由第 2.4 步骤所确定的各层次中的要素从上到下按层次顺序排列,同一层次的要素列在同一水平上,再根据表 1 所示有直接因素关系的要素之间用有向实线连接起来,便得到了大鹏湾夜光藻赤潮的 22 个发生要素之间的关联结构图(见图 1)。

3 结语与讨论

3.1 从要素关联结构图 1 中充分表明,最高第 1 层次的夜光藻现存量增加和聚集是产生赤潮的两个直接要素,而现存量的增加全靠自身增殖(细胞分裂)速度急增。夜光藻的大量繁殖必须有先期丰富的硅藻为其营养基础,而海水的富营养化(包含丰富的氮、磷、硅微量元素及维生素等)促进了夜光藻的食饵(硅藻、甲藻等)能迅速增长。在异常丰富食物的情况下,只要遇上适宜的盐度(24—28)和海水表层温度(19—22℃),浮游在表层的夜光藻便会出现难以想像的高速度增殖。而这些营养源主要取决于海域的上升流和垂直混合的作用,将海底的富营养物质翻升到表层。因此促使上升流和垂直混合增强的大潮流和风速、风向便成为关联结构系统中最低(第 6)层次的要素。

3.2 关联结构图 1 从 6 个先后层次上直观地反映出大鹏湾夜光藻赤潮发生的全过程,我们能否将最低层次的要素理解为赤潮发生的先驱因素,并以此作为依据去制定赤潮的预测预报乃至防治的方案,这是一个值得进一步去探讨的问题(林祖亨等,1993)。

3.3 通过对大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的关联结构分析,为建立赤潮发生动态数学模型打下了框架式基础,并将促进我们运用系统分析的观点和方法加深对我国东南沿海赤潮发生机理的研究。

参 考 文 献

- 冯国灿等,1993,南海赤潮数据管理系统,海洋通报,12(2): 73—77。
 吕颂辉、齐雨藻,1992,南海大鹏湾的主要赤潮生物,暨南大学学报,13(3): 130—133。
 林祖亨、梁舜华,1993,大鹏湾盐田海域夜光藻赤潮形成与潮汐的关系,海洋通报,12(2): 35—38。
 黄伟建、齐雨藻,1993,大鹏湾海水理化因子对夜光藻生长影响的因子分析,海洋通报,12(2): 17—22。
 谢健等,1993,夜光藻赤潮与环境因子的关系,海洋通报,12(2): 1—6。

池田三郎, 中田英昭, 1987, 赤潮発生現象のシステム分析, 赤潮の科学, 恒星社厚生閣, 255—285。
高桥诚[日]编, 蔡林海等译, 1989, 创造技术手册 53. 构造和改进设想的技法——ISM 分析, 上海科学普及出版社 (上海), 154—157。

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE ESSENTIAL FACTORS ASSOCIATED WITH THE *NOCTILUCA SCINTI- LLANS* RED TIDE IN DAPENG BAY

Wang Shousong, Feng Guocan

(Department of Mathematics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Xia Zongwan, Shi Jianhui

(South China Sea Branch, SOA, Guangzhou 510300)

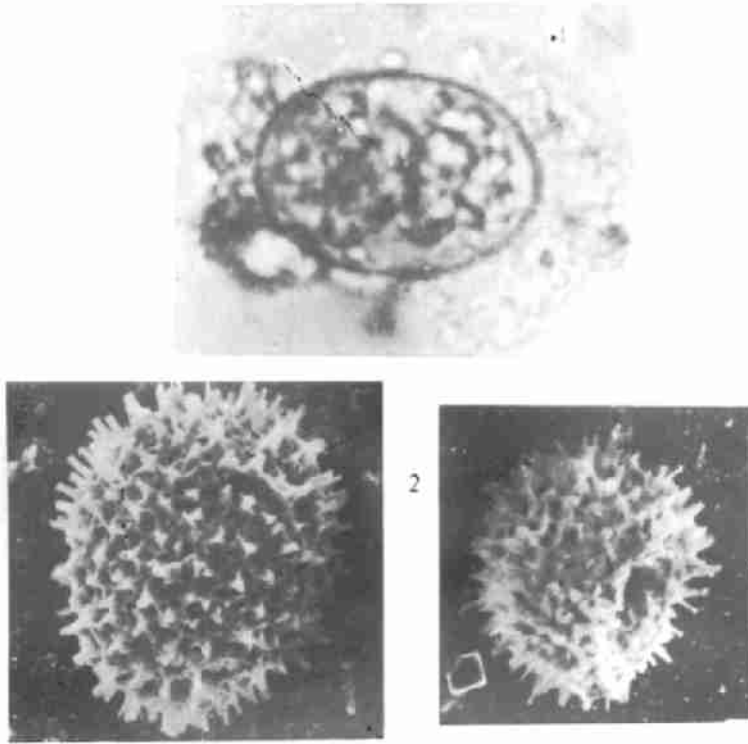
Qi Yuzao, Lü Songhui

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632)

ABSTRACT

Based on a lot of research literature on the *Noctiluca scintillans* red tide in Dapeng Bay, South China Sea, in 1990—1992, 22 essential factors associated with this red tide were selected from different environmental aspects of meteorology, oceanography, chemistry and biology. Directly causal and indirect relations existing among different factors were analysed using the interpretive structural modelling (ISM) method. The resulting integral relation structure diagram of those factors associated with this red tide in Dapeng Bay shows clearly the entire course of this red tide in six levels. It gives a base to build a model of the red tide dynamics and is useful for development of a forecasting system of this red tide.

Key words Red tide *Noctiluca scintillans* Interpretive structural modelling
Essential factors Structural analysis



图版 I 亚历山大藻和锥状施克里普薄孢囊

Plate I Cyst of *Alexandrium tamarense*(1) and *Scrippsiella trochoidea*(2)

1. *Alexandrium tamarense* 或 *A. casenella* 的孢囊; 2. *Scrippsiella trochoidea* 的孢囊(左图为正面观;右图为顶面观,可见萌发孔)。