

# 南海大鹏湾盐田海域骨条藻数量的多元分析\*

黄奕华 楚建华 齐雨藻

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

**提要** 1990年及1991年3月30日—5月30日, 在南海大鹏湾盐田海域设点测定骨条藻数量及各环境要素, 以逐步回归、主成分分析及判别分析的方法, 分析该海区骨条藻数量与环境因子的关系。结果表明, 骨条藻数量与环境因子中的 DO, Chl.c, Si(OH)<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, N 的关系密切; 1990年4, 5月与1991年4, 5月骨条藻数量差异与该期间环境因子值差异显著有关; 初步提出用三维主成分分析图及判别分析方程作为盐田海域骨条藻赤潮预报的方法。

**关键词** 大鹏湾 骨条藻 逐步回归 主成分分析 判别分析

赤潮的诱发原因很多, 对南海大鹏湾盐田海域的赤潮, 近年作了多方面的研究, 这些研究包括: 赤潮生物的生物学、生态学(自然生态及实验生态)研究, 对赤潮过程的监测以及赤潮(夜光藻赤潮, 褐胞藻赤潮等)成因和预测的探讨(齐雨藻等, 1991, 1993)等。由于赤潮发生机理极其复杂, 这些研究虽已有较大进展, 但目前仍处于探索阶段。赤潮的发生是各环境要素综合地对生物体作用的结果, 为了对它们进行综合的研究, 本文根据两年监测的数据, 采用多元统计分析方法(大内 晟等, 1982, 1984, 1984)着重在数量上分析骨条藻赤潮与环境因子的关系并探索对其预报的可能性。

## 1 调查海域的环境

盐田海域位于大鹏湾的西北部凹处, 是半封闭的不规则的半日潮型海域, 水深仅为5—10m, 水流缓慢, 海域的东南及西南设有网箱养鱼区及养殖场, 沿岸工业及码头建设日益发展, 是赤潮多发区, 据1990, 1991年监测, 两年共发生8起赤潮(林祖亨等, 1993)。

## 2 数据的收集

在盐田海域设3个采样点, 于1990年及1991年3月30日—5月30日, 每3天采样一次(表、底层各采一样并加以平均)。统计浮游植物的种类和计算它们的数量, 测定各环境因子值, 测定的环境因子为: 水温( $T$ , °C)、盐度( $S$ )、DO(mg/L)、pH、浊度( $P_u$ , 度)、Chl.a、Chl.b、Chl.c和PO<sub>4</sub>-P、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、Si(OH)<sub>4</sub>、Fe<sup>3+</sup>、

\*国家自然科学基金资助项目, 9389008号。黄奕华, 女, 出生于1938年9月, 副教授。

本文中环境因子的调查与测定由国家海洋局南海分局完成, 部分重金属元素的测定由中山大学环境科学研究所完成。

收稿日期: 1996年2月2日, 接受日期: 1996年4月17日。

Mn。营养盐和微量元素的单位均为  $\mu\text{g/L}$ 。

调查表明,本海域浮游植物的优势种多数由硅藻类组成(吕颂辉等,1992),在两年的监测中,春、夏季骨条藻出现的频率和数量都比较大,在1990年曾两度达到赤潮标准(即数量大于  $1 \times 10^9 \text{cell/m}^3$ ),因此,本研究以骨条藻(*Skeletonema costatum*)为对象。

### 3 分析方法与结果

#### 3.1 骨条藻数量对环境因子的逐步回归

为了了解骨条藻数量变化与环境因子的关系,对所有样本(舍弃其中有缺项的样本),分别按年份进行逐步回归分析。将全部环境因子数据输入,利用逐步回归方法对环境因子进行筛选,找出与骨条藻数量关系密切的环境因子,得出结果如下(式中\*表示达0.05显著水平,\*\*表示达0.01显著水平):

1990年4,5月份骨条藻数量对环境因子逐步回归方程为:

$$Y = 940.90 - 130.02X_{\text{DO}} + 6.96X_{\text{Chl.c}} - 4.94X_{\text{NO}_3} + 0.13X_{\text{Si(OH)}_4}, n = 60, R = 0.382^*$$

各变量的  $F$  值依次为 3.58, 1.15, 1.23, 1.12。

1991年4,5月份骨条藻数量对环境因子逐步回归方程为:

$$Y = 1415.67 + 33.77X_{\text{DO}} - 8.07X_{\text{Chl.c}} + 5.73X_{\text{PO}_4} - 0.17X_{\text{NO}_3} - 0.06X_{\text{Si(OH)}_4} - 4.98X_{\text{Mn}}, n = 40, R = 0.697^{**}$$

各变量的  $F$  值依次为 2.99, 6.11, 3.7, 8.06, 1.63, 1.94, 1.58。

1990,1991年4,5月份骨条藻数量对环境因子逐步回归方程为:

$$Y = 809.92 - 11.75X_{\text{T}} - 82.10X_{\text{DO}} + 9.25X_{\text{Chl.c}} - 10.61X_{\text{NO}_2} + 0.14X_{\text{Si(OH)}_4}, n = 100, R = 0.36^*$$

各变量的  $F$  值依次为 1.42, 3.46, 3.64, 1.88, 4.00。

1990,1991年接近赤潮时(骨条藻密度  $> 8 \times 10^8 \text{cell/m}^3$ ),骨条藻数量对环境因子逐步回归方程为:

$$Y = -16289.21 + 2271.94X_{\text{DO}} - 109.60X_{\text{Chl.c}} + 254.35X_{\text{PO}_4} - 5.20X_{\text{Si(OH)}_4} - 34.63X_{\text{Fe}}, n = 7, R = 0.999^{**}$$

各变量的  $F$  值依次为 57.6, 118.27, 872.0, 307.11, 38.22。

#### 3.2 影响骨条藻数量的环境因子的主成分分析

1990年3月30日及5月20日,盐田海域的骨条藻数量均达到赤潮标准,取该两天3个站位表层样本6个,代表赤潮样本;赤潮发生的前一次监测即5月17日的样本3个(3月30日前无样本),代表预报赤潮的样本;另取其它样本12个,代表正常期样本。对上述21个样本的环境因子进行主成分分析,结果如表1。

使用不同的环境因子,其主成分分析的效果不同,为了充分提取各环境因子的信息,在计算中使用了全部监测的环境因子。

分析各主成分的因子负荷量,可以看到,对第一主成分影响最大的是浊度,溶解氧及pH值,较多地反映了海水的理化状况;对第二主成分影响最大的是氮盐,硅酸盐及水温,较多地反映了海水的营养盐状况;对第三主成分影响最大的是盐度,叶绿素及磷酸盐,较多地反映了海水的生物量等状况。如果在赤潮期间,赤潮发生前及正常期,海洋的环境要素确实存在差异,在不同期间采集的样本,其环境参数亦存在差异,这些差异

表 1 14 个环境因子的主成分分析结果 (前 5 个主成分及因子负荷量)

Tab.1 Summary of principal component analysis of 14 environmental factors in the Dapeng Bay

环境因子	主 成 分				
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
<i>T</i>	-0.1927 (-0.3848)	0.3707 ( 0.6389)	0.2533 ( 0.3671)	-0.1434 (-0.2340)	-0.0926 (-0.1272)
<i>S</i>	-0.2929 (-0.5849)	-0.1986 (-0.3423)	-0.4329 (-0.6273)	-0.0309 (-0.0425)	0.0142 ( 0.0126)
DO	0.4226 ( 0.8438)	-0.0548 (-0.0944)	0.0825 ( 0.1195)	-0.2587 (-0.3554)	-0.2096 (-0.1859)
pH	0.3385 ( 0.6759)	0.0082 ( 0.0142)	0.2858 ( 0.4140)	-0.3425 (-0.4705)	-0.1050 (-0.0932)
Tu	0.4484 ( 0.8954)	-0.0359 (-0.0618)	-0.0229 (-0.0331)	-0.0919 (-0.1262)	-0.1011 (-0.0897)
Chl. <i>a</i>	0.2035 ( 0.4064)	-0.0026 (-0.0045)	-0.1720 (-0.2492)	0.5015 ( 0.6890)	-0.1424 (-0.1263)
Chl. <i>b</i>	0.3048 ( 0.6087)	0.2701 ( 0.4655)	-0.3366 (-0.4877)	0.2605 ( 0.3579)	-0.0161 (-0.0143)
Chl. <i>c</i>	0.2298 ( 0.4589)	0.3690 ( 0.6360)	-0.3415 (-0.4949)	0.1683 ( 0.2313)	0.0401 ( 0.0356)
PO <sub>4</sub>	-0.1028 (-0.2053)	0.2722 ( 0.4691)	0.3618 ( 0.5242)	0.1964 ( 0.2697)	0.4662 ( 0.4136)
NO <sub>2</sub>	0.1853 ( 0.3700)	0.4198 ( 0.7235)	0.2729 ( 0.3954)	0.1916 ( 0.2632)	-0.0229 (-0.0200)
NO <sub>3</sub>	-0.1865 (-0.3725)	-0.0907 (-0.1563)	0.2355 ( 0.3412)	0.3133 ( 0.4302)	-0.7655 (-0.6791)
Si(OH) <sub>4</sub>	-0.2856 (-0.5702)	0.3967 ( 0.6838)	0.0210 ( 0.0304)	0.0189 ( 0.0259)	-0.1014 (-0.0904)
Fe	0.1810 ( 0.3615)	-0.3189 (-0.5497)	0.2273 ( 0.3293)	0.1843 ( 0.2532)	0.2550 ( 0.2263)
Mn	0.0414 ( 0.0827)	-0.3036 (-0.5233)	0.2949 ( 0.4273)	0.4710 ( 0.6472)	0.1124 ( 0.0997)
主成分贡献率 (%)	28.48	21.22	15.00	13.48	5.62
累计贡献率 (%)	28.48	49.70	64.70	78.18	83.80

注: 表中括号内的数据为相应的因子负荷量。

直接反映在样本点的主成分值上, 同类型的样本, 其主成分值比较接近。(图 1) 是用前 3 个主成分绘制的三维主成分图, 图中, 赤潮样本、赤潮前样本、正常样本, 由于主成分

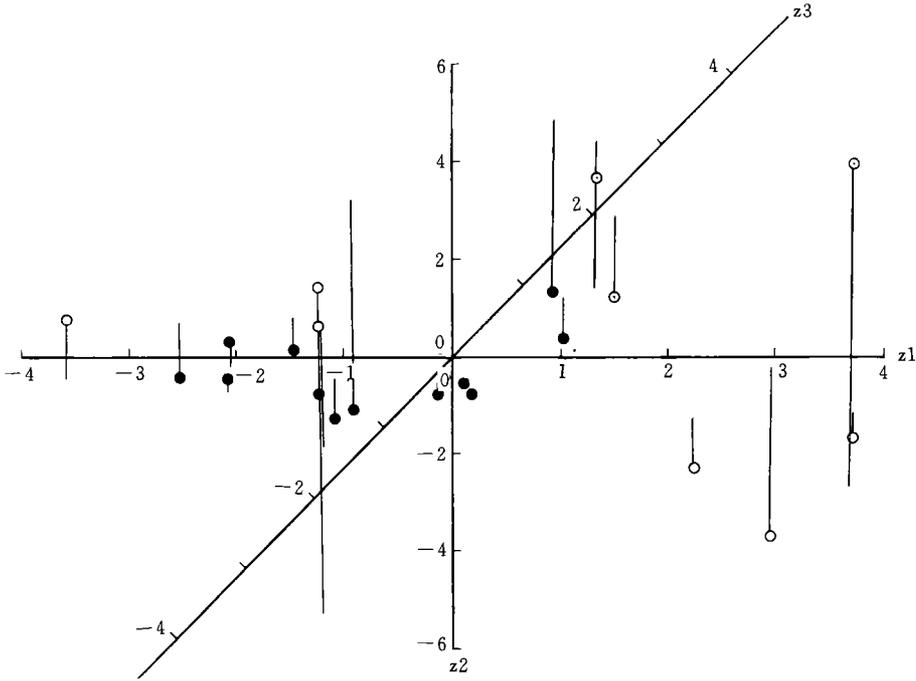


图 1 3类样本在前3个主成分的3维坐标图上的分布

Fig.1 The distribution of samples of three types in the three dimensional space defined by the first three principal components

○ 赤潮样本; ◐ 赤潮前样本; ● 正常样本。(图 2 同)

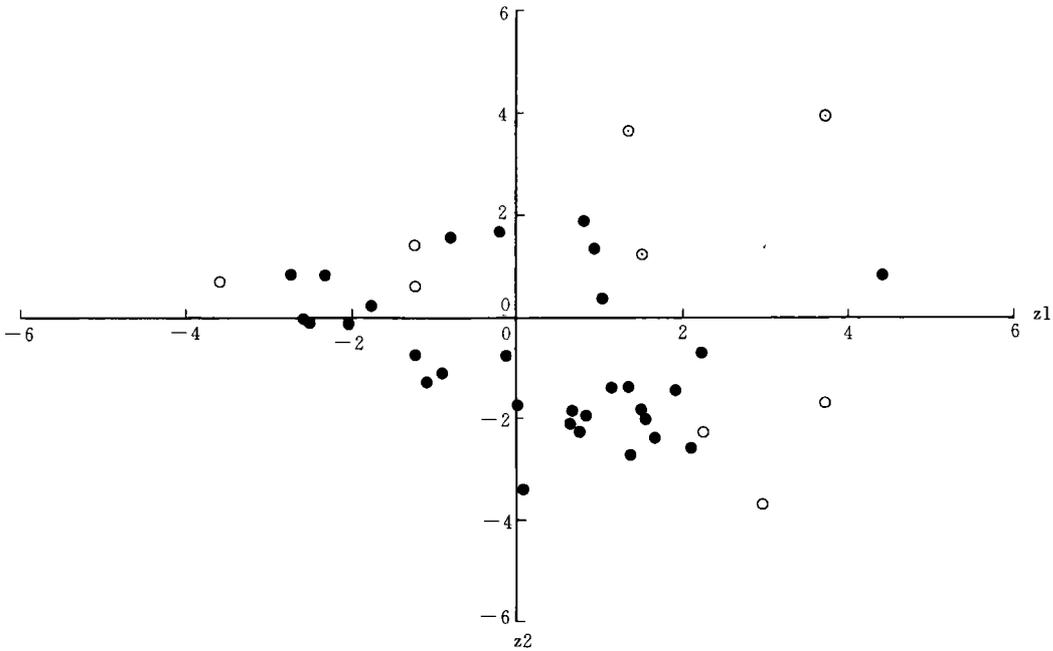


图 2 预报样本在前2个主成分的2维坐标图上的分布

Fig.2 The distribution of predicting samples in the two dimensional space defined by the first two principal components

值接近而分别聚集在一起, 表明通过主成分的计算可以对样本进行分类, 据此, 利用这个主成分图亦可对骨条藻赤潮进行预报, 当实测的环境因子数量代入前3个主成分, 得出的坐标如果靠近赤潮前的点区时即可发出预报。当然, 限于样本数量, 今后尚需积累资料, 深入研究预报效果。

利用1990年有骨条藻记录的样本进行回报, 并绘出二维主成分图(图2)。由于数据所限(1991年骨条藻数量均未达赤潮标准), 尚不可能更深入地探讨如何运用不同的环境因子进行计算, 以提高分辨率。

### 3.3 骨条藻赤潮的逐步判别分析

为了能用各环境因子的线性组合定量地判别是否发生赤潮, 从不同的角度研究骨条藻赤潮与环境因子的关系, 我们用进行主成分分析的样本进行逐步判别分析, 方法仍然是将样本分为三类, 即1类为赤潮样本, 2类为赤潮前样本, 3类为正常样本。结果如下。

$$\begin{aligned} \text{判别方程: } C1 &= -63\,777.4 + 164.3X_T + 15\,120.3X_{\text{pH}} - 810.9X_{\text{Tu}} \\ &\quad - 273.5X_{\text{Chl.b}} + 108.4X_{\text{Chl.c}} + 41.1X_{\text{NO}_3} + 0.99X_{\text{Si(OH)}_4} \\ C2 &= -68\,700.6 + 172.2X_T + 15\,680.83X_{\text{pH}} - 801.4X_{\text{Tu}} \\ &\quad - 289.5X_{\text{Chl.b}} + 114.4X_{\text{Chl.c}} + 42.8X_{\text{NO}_3} + 1.04X_{\text{Si(OH)}_4} \\ C3 &= -65\,930.1 + 170.23X_T + 15\,368.3X_{\text{pH}} - 852.3X_{\text{Tu}} \\ &\quad - 277.5X_{\text{Chl.b}} + 108.7X_{\text{Chl.c}} + 41.8X_{\text{NO}_3} + 0.99X_{\text{Si(OH)}_4} \end{aligned}$$

式中,  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  分别代表1, 2, 3类样本的判别函数值。

综合距离:  $D_{21}=219.69$ ,  $D_{31}=58.85$ ,  $D_{32}=151.28$ 。  $F$  值:  $F_{21}=41.85$ ,  $F_{31}=22.42$ ,  $F_{32}=34.58$ 。

所用的21个样本在计算中全部判断准确。用判别方程对1990年有骨条藻记录的样本进行回报, 在25个样本中, 有9个样本错判, 主要是1, 3类之间错判, 证明本分析对预报赤潮有一定作用, 效果虽不够理想, 但作为一种研究途径, 值得推荐。

## 4 结论与讨论

**4.1** 在14个变量中, 其中DO, Chl. *c*, N, Si(OH)<sub>4</sub>等变量在各个逐步回归方程中, 均被选上, 说明骨条藻数量与这些变量的状况密切相关; PO<sub>4</sub>在1991年的回归方程中占重要地位, 其 $F$ 值最高, 但在1990年的回归方程中却未选上, 而1990年PO<sub>4</sub>的平均数量是1991年的8.4倍, 当1990年, PO<sub>4</sub>数量太低时, 会直接影响骨条藻数量, 是个重要的限制因子; 而1991年PO<sub>4</sub>已满足需要, 其数量变化对骨条藻生长影响不大; 在接近赤潮的样本中, 二者呈正相关(这在1990年骨条藻大量增殖时尤为明显), 可以认为当海洋中PO<sub>4</sub>含量突然升高, 满足了骨条藻的需要, 在Si(OH)<sub>4</sub>适当时, 即可大量繁殖, 甚至达到赤潮。氮与骨条藻数量有密切关系, 且基本为负相关, 但氮的存在形式多样, 且互相之间存在相关关系, 到底哪种形式的氮对骨条藻生长更为重要, 尚值得研究。1991年曾测定海洋物理状况(如潮汐等)及微量元素, 它们对骨条藻的数量变动亦有影响, 需要继续探讨。逐步回归方程整体是显著的, 但是各变量的偏相关系数没有突出的特大值, 说明各变量的影响是综合的。

**4.2** 1990, 1991年4, 5月骨条藻数量及出现频率有较大的差别, 1991年的数量及出现

频率明显低于 1990 年, 1990 年的平均数量是 1991 年的 4.8 倍, 对比两年 4、5 月份各环境因子的平均数, 并进行两均数差异显著性检验(表 2)。可以看出, 不同年份的环境因子状况差异颇大, 其中 1991 年  $\text{PO}_4$  及  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , 都明显偏低, 限制了骨条藻的增长。

表 2 两年环境因子均值差异显著性检验 ( $T$ -test) 值

Tab.2  $T$ -test values of environmental factors in 1990—1991

环境因子	$T$	$S$	DO	pH	Tu	Chl. $a$	Chl. $b$
1990 年均值	22.58	31.14	7.30	8.21	0.60	1.17	2.32
1991 年均值	23.93	32.46	6.92	8.18	0.84	0.91	2.14
$T$ 值	-3.64 <sup>1)</sup>	-15.15 <sup>1)</sup>	4.10 <sup>1)</sup>	2.53 <sup>2)</sup>	-2.29 <sup>2)</sup>	2.40 <sup>2)</sup>	0.88
环境因子	Chl. $c$	$\text{PO}_4$	$\text{NO}_2$	$\text{NO}_3$	$\text{Si}(\text{OH})_4$	Fe	Mn
1990 年均值	4.82	39.78	2.43	9.97	832.74	5.95	5.12
1991 年均值	2.06	4.76	3.51	8.70	569.47	8.02	5.22
$T$ 值	4.00 <sup>1)</sup>	9.78 <sup>1)</sup>	-1.83	0.98	7.56 <sup>1)</sup>	-2.14 <sup>2)</sup>	-0.24

1) 达 0.01 显著水平; 2) 达 0.05 显著水平。

4.3 赤潮的发生是非常复杂的海洋生物、海洋化学、海洋物理、海洋气象等因素相互作用的过程, 用多元分析方法研究赤潮生物数量与环境因子之间的关系, 是赤潮发生机理的研究途径之一, 但由于环境因子众多, 所以海上布点应该全面, 采样宜防止误差, 以使统计分析的结果更为准确。1990, 1991 年 4、5 月份海况有较大的差别, 同一年不同月份发生的赤潮也具有不同特征, 从三维主成分图中可以看到, 不同月份的赤潮, 其坐标各自成区, 说明要掌握骨条藻赤潮的规律, 需积累长期的资料。

4.4 逐步回归、主成分分析和判别分析, 作为分析、判断、预报赤潮的发生, 各有不同的特点, 对同一资料最好能同时使用这些方法, 可以互相补充, 互相验证。

### 参 考 文 献

- 齐雨藻等, 1991, 暨南大学学报, 自然科学版, 12(3), 96—103。  
 齐雨藻等, 1993, 海洋通报, 12(2), 30—34。  
 吕颂辉等, 1992, 暨南大学学报, 自然科学版, 13(3), 130—133。  
 林祖亨等, 1993, 海洋通报, 12(2), 35—38。  
 大内 晟, 1982, *Bull. Jap. Sci. Fisheries*, 48(9): 1 245—1 250。  
 大内 晟等, 1984, *Bull. Jap. Sci. Fisheries*, 50(7): 1 201—1 205。  
 大内 晟, 1984, *Bull. Jap. Sci. Fisheries*, 50(10): 1 245—1 250。  
 Qi Yuzao et al., 1993, *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*, ed. by Smayda, T. J. et al., Elsevier Science Publishers (B. V.), pp. 43—46。

## MULTIVARIABLE ANALYSIS OF *SKELETONEMA COSTATUM* QUANTITY IN YANTIAN, DAPENG BAY, THE SOUTH CHINA SEA

Huang Yihua, Chu Jianhua, Qi Yuzao

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632)

**Abstract** *Skeletonema costatum*'s quantity and environmental factors were measured in Yantian Dapeng Bay during Mar. 30th to May 30th in 1990 and 1991, respectively. The relation between them in the Yantian sea area was studied by multivariable statistical analysis, stepwise regression analysis, principal component analysis and discriminant analysis. The following stepwise regression equations were obtained.

Stepwise regression equations of *S. costatum*'s quantity to environmental factors in 1990:

$$Y = 940.90 - 130.02X_{DO} + 6.96X_{Chl.c} - 4.94X_{NO_3} + 0.13X_{Si(OH)_4}, n=60, R=0.382^*$$

Stepwise regression equation of *S. costatum*'s quantity to environmental factors in 1991:

$$Y = 1415.67 + 33.77X_{DO} - 8.07X_{Chl.c} + 5.73X_{PO_4} - 0.17X_{NO_3} - 0.06X_{Si(OH)_4} - 4.98X_{Mn}, n=40, R=0.697^{**}$$

Stepwise regression equation of *S. costatum*'s quantity to environmental factors in 1990, 1991:

$$Y = 809.92 - 11.75X_T - 82.10X_{DO} + 9.25X_{Chl.c} - 10.61X_{NO_2} + 0.14X_{Si(OH)_4}, n=100, R=0.36^*$$

Stepwise regression equation of *S. costatum*'s quantity to environmental factors in 1990, 1991 (when the number of *S. costatum* more than  $8 \times 10^8$  cell / m<sup>3</sup>):

$$Y = -16289.21 + 2271.94X_{DO} - 109.60X_{Chl.c} + 254.35X_{PO_4} - 5.20X_{Si(OH)_4} - 34.63X_{Fe}, n=7, R=0.999^{**} (* \text{ Significant at 0.05 level, } ** \text{ Significant at 0.01 level})$$

The results show that, the quantity of *S. costatum* was highly correlated with the DO, Chl. c, Si(OH)<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, N concentrations. The difference between *S. costatum*'s quantity obtained from Apr. to May in 1990 and 1991 was closely connected with the significant differences of their environmental factors in those two periods of time. Two tentative predictive models of *S. costatum*'s blooms in these sea area waters were suggested by using three dimensional principal components map and discriminant equation.

**Key words** Dapeng Bay *Skeletonema costatum* Stepwise regression Principal component analysis Discriminant analysis