

大亚湾大鹏澳水域春季浮游植物优势种的演替

韦桂峰^{1,2}, 王肇鼎^{1,2}, 练健生^{1,2}

(1. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站, 深圳 518121; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301)

摘要:根据 2002 年 4 月 28 日~5 月 27 日大亚湾大鹏澳内每日采样的现场连续观测资料, 使用主分量分析方法和多元回归方法, 分析浮游植物优势种类之间的关系及影响其生长与演替的主要理化因子, 建立春季浮游植物优势种类的演替模型。模型表明, 中肋骨条藻和柔弱菱形藻之间为竞争关系; 与浮游植物(以硅藻为主)生长密切相关的理化因子为温度(T)、溶解氧饱和度(DO_{sat})、铵氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)。影响中肋骨条藻的理化因子还有盐度(S)和氮磷比值(NO_3/PO_4)。并根据优势种类发生演替期间的环境变化(降雨), 分析了浮游植物优势种由中肋骨条藻演替为柔弱菱形藻的过程。

关键词:中肋骨条藻; 柔弱菱形藻; 演替; 主分量分析; 大亚湾

Succession of dominant phytoplankton species in spring 2002 at Dapeng' Ao Cove, Daya Bay

WEI Gui-Feng^{1,2}, WANG Zhao-Ding^{1,2}, LIAN Jian-Sheng^{1,2} (1. Marine Biology Research Station at Daya Bay, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518121, China; 2. South China Sea Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2285~2292.

Abstract: Dapeng' Ao, a small cove at the southwest of Daya Bay in Guangdong Province of China is an area covering about 14 km² at an average water depth of 5 m with well-developed mariculture of fish and shellfish. From April 28 to May 27 2002, a 30-day continuous observation was carried out in the cove to investigate the succession of dominant phytoplankton species. Water samples were taken from the surface and bottom layers of 3 sites in Dapeng' Ao cove at about 9 a. m. daily. Physico-chemical factors were measured *in situ* (e. g. water temperature, dissolved oxygen) or analyzed in the laboratory of Marine Biology Research Station at Daya Bay within an hour after sampling (e. g. pH, salinity, ammonia, nitrite, nitrate, phosphate, silicate, chlorophyll-a). Phytoplankton was fixed with Lugol's solution *in situ*, and dominant species were identified and their cell numbers were enumerated. In this continuous observation, it found that diatoms dominated (about 98.9% of total phytoplankton cells) in the waters, *Skeletonema costatum*, *Nitzschia delicatissima*, and *Chaetoceros* sp. were the dominant species. *Skel. costatum* was the leading species from April 28 to May 22 whileas *Nitz. delicatissima* took the leading role after May 22, resulting in a phytoplankton succession.

基金项目:中国科学院知识创新资助项目(KZCX02-403-04)

收稿日期:2002-12-10; **修订日期:**2003-05-10

作者简介:韦桂峰(1976~), 女, 壮族, 广西柳州人, 博士生。主要从事海洋浮游植物与环境生态学研究。

致谢:参加本项研究的人员还有彭云辉、朱卓洪、胡建兴、陈浩如、肖丽莹等。

通信作者 Author for correspondence, E-mail: wcma@fudan.edu.cn.

Foundation item: CAS Knowledge Innovation Program (No. KZCX02-403-04)

Received date: 2002-12-10; **Accepted date:** 2003-05-10

Biography: WEI Gui-Feng, Ph. D. candidate, main researched in: the marine phytoplankton and environmental ecology.

Using Principal Component Analysis (PCA) method, the most important five components account for 78% of data information. Multiple regression method was used to elucidate the relationship among those dominant species and their contribution to the principal components (represented by the physico-chemical factors), based upon the correlation coefficients between the dominant phytoplankton species and the main principal components ($p < 0.01$), and to develop a succession model for the dominant phytoplankton species in Dapeng' Ao cove in spring. The model shows that *Skel. costatum* has competitive relationship with *Nitz. delicatissima* and the most important physico-chemical factors that are closely related to the growth of diatom-dominated phytoplankton community are temperature, dissolved oxygen, ammonia, nitrite, phosphate and silicate; salinity, nitrate, and the ratio of nitrate to phosphate also influenced the growth of *Skel. costatum*. During the period of investigation, the most significant environment change was rainfall, which resulted in a decrease of salinity and an increase of nitrogenous nutrients in water column, and such an environment change promotes the growth of *Skel. costatum*. Along with phytoplankton growth, the nutrients (N, P, and Si) were exhausted gradually and could not further maintain the population growth of *Skel. costatum* and its density declined, which relieved the competition pressure for *Nitz. delicatissima* and it grew rapidly thereafter. The environment change (rainfall) occurring during the period of phytoplankton succession illustrated clearly how dominant species changed from *Skel. costatum* to *Nitz. delicatissima* in the succession process.

Key words: *Skeletonema costatum*; *Nitzschia delicatissima*; phytoplankton; succession; PCA; Daya Bay

文章编号:1000-0933(2003)11-2285-08 中图分类号:Q94 文献标识码:A

浮游植物是海洋中主要的初级生产力来源,是海洋生态系统的基础。浮游植物的生长、优势种类的演替、及其与各种环境因子之间的关系等的现场观测和室内实验等已做了大量工作。这些研究表明,水域中浮游植物的种类组成、数量变化、优势种类演替等均受到许多因素的影响,如温度、光照、浊度、盐度、营养盐、捕食作用等^[1~7],而营养盐的作用经常比其它因子更为重要^[8~10]。对浮游植物起生长限制作用的营养盐主要为氮、磷营养盐,硅酸盐对硅藻的生长也有着重要的作用。在不同的环境条件和营养条件下,水域中浮游植物的优势种不一定相同。

主分量分析是考察多个数值变量间相关性的一种多元统计方法。它是研究如何通过少数几个主分量(即原始变量的线性组合)来解释多变量的信息。具体地说,是导出少数几个主分量,它们尽可能多地保留了原始变量的信息,且彼此之间又不相关。主分量分析计算较简单,结果客观,已经在各种学科中广泛地应用^[11,12]。运用主分量分析来研究浮游植物优势种类的演替过程及其与环境因子变化的关系,可以分析出不同环境变化对各种不同浮游植物优势种的作用。

根据作者等近年来对大亚湾大鹏澳的调查,已知春季浮游植物的优势种为中肋骨条藻、柔弱菱形藻、角毛藻。但一般现场观测多数是每月(或半个月)1次的调查,鲜有每天采样观测的研究。为了深入观测海区现场浮游植物的生长变化及其与环境因子的关系,本研究在大亚湾的大鹏澳海域布点,进行每天1次的连续30d现场观测,分析浮游植物优势种类的演替过程及浮游植物与环境理化因子之间的关系。

1 研究内容与方法

1.1 观测区域与站位

大鹏澳是大亚湾西南部的一个半封闭小湾,澳内水域面积14km²,平均水深仅5m,澳口狭窄,且受大亚湾的流场影响小,使澳内水交换缓慢,没有大的径流影响。近年来大鹏澳水域海水养殖业发展迅速,澳内主要有东山湾渔排网箱、大面积的贝类养殖区,以及澳底部面积约达200hm²围海建造的虾池。大鹏澳四周工业不多,除了大鹏澳口北岸的大亚湾核电站和岭澳核电站的温排水影响外,主要污染物来源于城镇生活污水与海水养殖业的自身污染。

本次调查设置的3个连续观测站位如图1。其中1#站位于东山湾渔排网箱养殖区内;2#站接近大鹏澳

口,水交换比较好,基本不受养殖区的影响;3[#]站位于贝类养殖区内,由于贝类吊养期为每年农历5~10月份,本次调查期间贝类养殖区内尚无大量贝类吊养。

1.2 采样与分析

本次调查于2002年4月28日至5月27日共连续观测30d。观测与采样时间定于每天9:00左右,分表层两层取样,表层水采于离水面0.5m深处,底层水采于离海底1m处。现场测定项目为水深、水温、透明度、海况、气象等;溶解氧是现场采样固定后,与采集的其它水样在1小时内带回到中科院大亚湾站实验室分析,此外还按照海洋调查规范中海水化学要素的分析方法,分别测定pH、盐度、叶绿素、铵氮、亚硝酸盐、硝酸盐、活性磷酸盐、活性硅酸盐。浮游植物样品系用鲁格氏液(Lugol's solution)现场固定后,带回实验室鉴定和计数。

1.3 浮游植物优势种的演替模型

使用SAS软件系统对浮游植物的演替过程建模,具体分析步骤如下:

(1)用 t 检验对3个站位之间及各站表、底层之间的差异进行检验,将差异性大($p \leq 0.05$)的站位或层次的数据去除,差异性小($p > 0.05$)的数据组合成为一个数据集来进行统计分析。

(2)生境因子各变量的主分量分析:对生境因子各变量,包括水温(T)、盐度(S)、pH、溶解氧饱和度(DO_{sat})、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 NO_3/PO_4 、 SiO_3/NO_3 、 SiO_3/PO_4 等理化因子,进行主分量分析,得出相互间互不相关的新的变量,以减少线性回归时的变量数目。

(3)求出选定的主分量因子与其对应的浮游植物优势种类细胞数量之间的相关系数,根据相关系数对各优势种进行多元回归,回归的置信水平 $p < 0.01$,分析各主分量对优势种的影响及各优势种之间的相互作用。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物优势种类的分布特征

大亚湾大鹏澳水域的浮游植物以硅藻为主(各站、各水层中硅藻占总浮游植物数量平均达98.9%),优势种类为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、柔弱菱形藻(*Nitzschia delicatissima*)、以及角毛藻(*Chaetoceros* sp.)和海链藻(*Thalassiosira* spp.)。浮游植物优势种的分析结果列于表1。从表1可看出,位于渔排网箱养殖区的1[#]站,浮游植物数量较2[#]、3[#]站的少;3个站位浮游植物的优势种类组成、细胞数量随时间变化趋势基本一致,表底层差别不大。

以2[#]站表层水为例,各优势种类占浮游植物总数量百分比随时间变化如图2所示。从图2可见,中肋骨条藻在5月22日前为主要优势种类,5月22日后主要优势种演变为柔弱菱形藻;角毛藻和海链藻所占比例不大,但角毛藻数量在现场观测后期呈上升趋势,而海

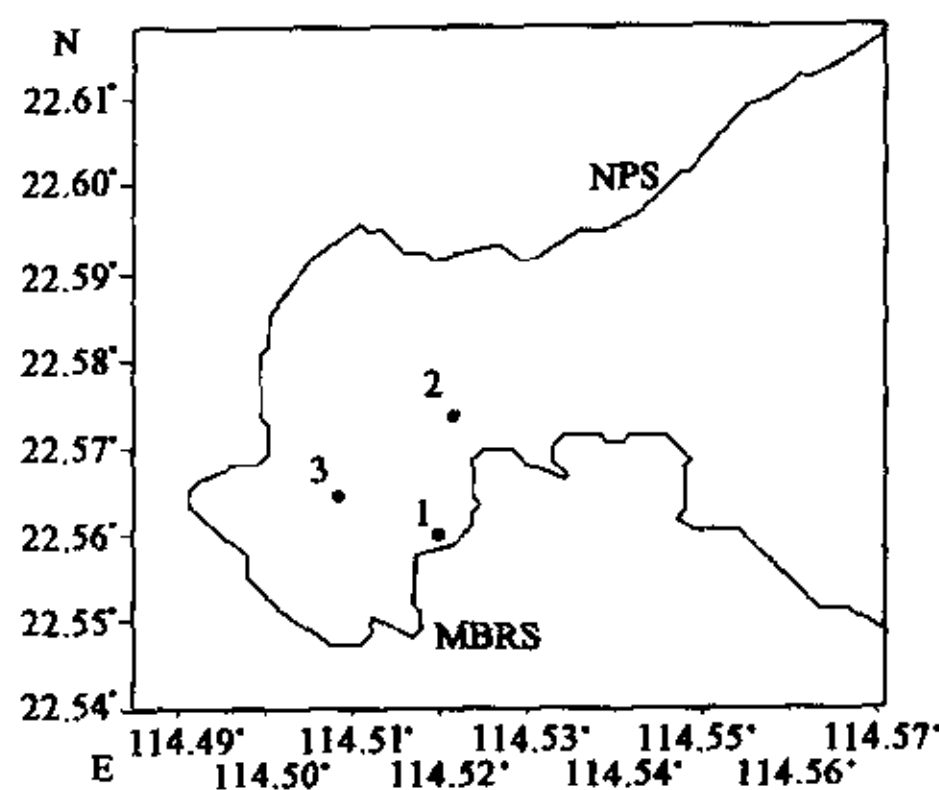


图1 大鹏澳采样站位示意图

Fig. 1 Sampling sites in Dapeng'ao cove of Daya Bay
* MBRS: Marine Biology Research Station at Daya Bay; NPS: Nuclear Power Station

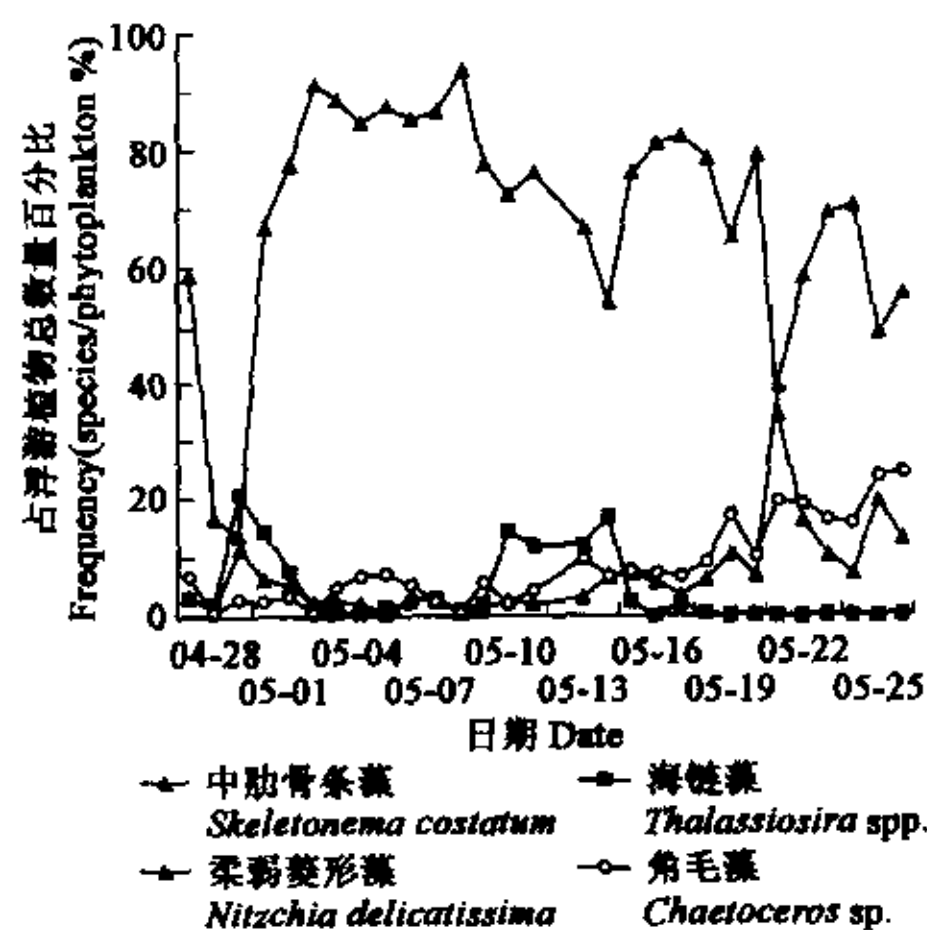


图2 大鹏澳各优势种占浮游植物总数量百分比的时间变化

Fig. 2 Percentage of dominant species to total phytoplankton amount at Dapeng'ao Cove during April 28 to May 27 2002

链藻在 5 月 1 日和 5 月 13 日左右形成两个高峰值后,数量已基本降至零。4 个优势种细胞数量随时间的变化如图 3 所示(以 2[#] 站为例),表底层的差异不大,且变化趋势一致。其他 2 个站的情况与 2[#] 站很相似。

表 1 大鹏澳各采样站浮游植物优势种类细胞数量的平均值和范围

Table 1 Mean, minimum and maximum of dominant species at 3 sites of Dapeng'ao Cove

浮游植物 Phytoplankton (10 ³ cell/L)	1#站 site 1		2#站 site 2		3#站 site 3	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
中肋骨条藻 ^①	3946.7 (59.7~14128.8)	3526.6 (70.8~14486.7)	5545.5 (37.1~15900)	4461.9 (32.4~17158.8)	5420.7 (22.0~21902.0)	4369.6 (19.3~12384.7)
柔弱菱形藻 ^②	465.4 (0~2572.0)	600.2 (0~3746.7)	961.7 (2.0~6611.8)	967.7 (0~5730.0)	858.8 (0~4972.1)	815.7 (0~4208.7)
角毛藻 ^③	469.9 (1.9~1754.6)	485.8 (0~2526.7)	631.1 (0.7~3333.3)	612.6 (4.2~2451.1)	539.6 (5.3~1843.1)	735.2 (0~6180.8)
海链藻 ^④	157.3 (0~1547.5)	180.3 (0~1521.2)	220.3 (0~1446.2)	207.5 (0~1548.9)	185.8 (0~1217.7)	196.2 (0~1151.7)
硅藻 ^⑤	5357.1 (166.3~17699.4)	5188.9 (192.0~19553.3)	7784.5 (218.2~19093.1)	6876.3 (210.6~18243.1)	7450.2 (195.3~26503.3)	6516.3 (257.3~15775.0)
甲藻 ^⑥	22.7 (0~135.0)	15.2 (0~52.9)	36.9 (2.7~109.8)	36.9 (2.7~114.0)	61.7 (2.7~140.0)	42.6 (2.7~100.0)

① *Skeletonema costatum* ② *Nitzschia delicatissima* ③ *Chaetoceros* sp. ④ *Thalassiosira* spp. ⑤ Diatoms ⑥ Dinoflagellates

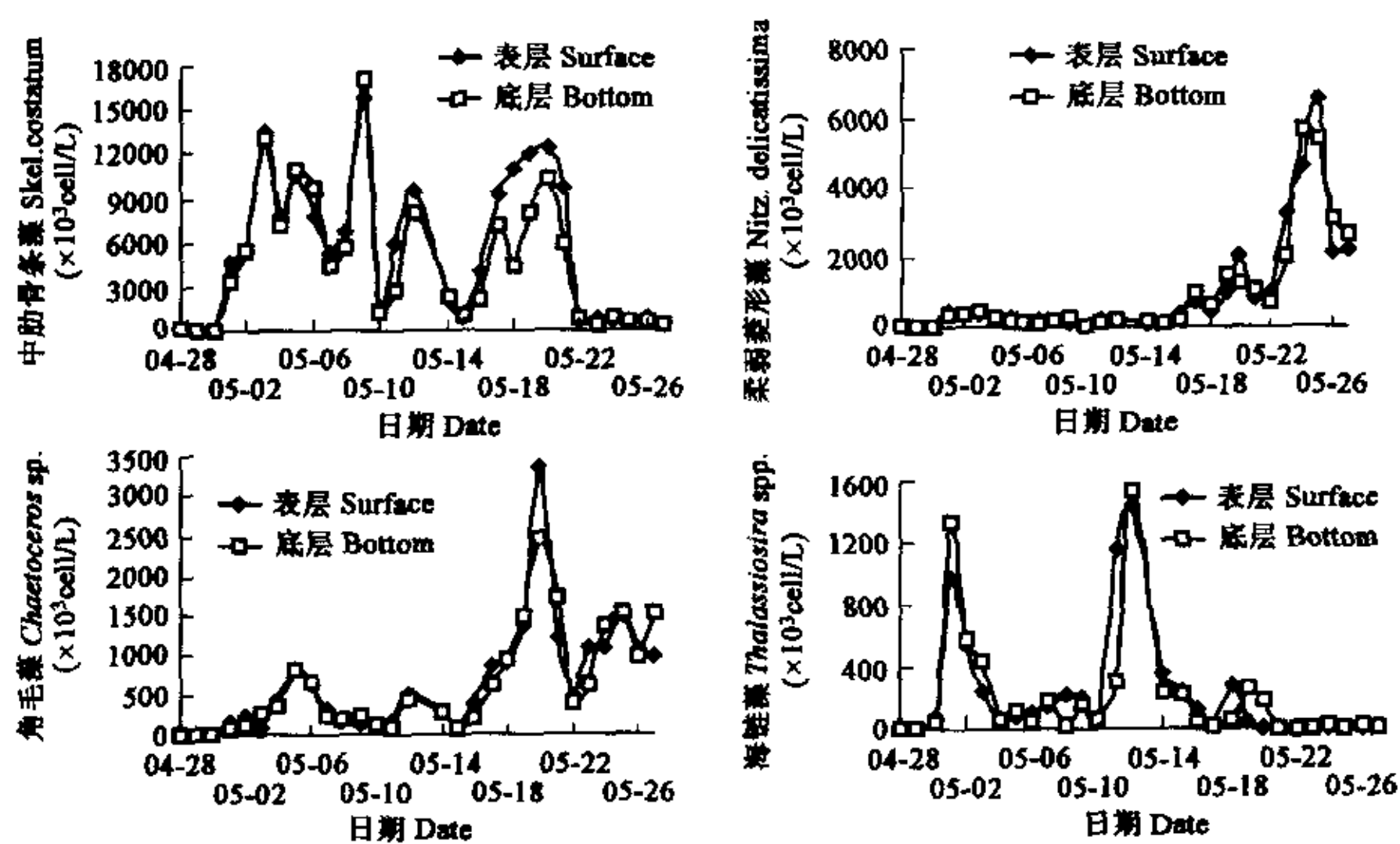


图 3 大鹏澳 2[#] 站各浮游植物优势种类细胞数量的时间变化

Fig. 3 Density of four dominant species at site 2 of Dapeng'ao Cove during April 28 to May 27 2002

2.2 浮游植物优势种类的演替及其与环境理化因子的关系

2.2.1 浮游植物演替特征 从图 2、3 可看出,在本次调查的 4 月 28 日至 5 月 27 日期间,按细胞数量高低大致可以分为 3 个阶段:(1)第 1 阶段(4 月 28 日~5 月 15 日),中肋骨条藻占浮游植物总数量的比例一般均在 60% 以上(4 月 29、30 日两天数量较低),海链藻数量虽然低,但在 5 月 1 日和 5 月 12 日形成峰值,角毛藻和柔弱菱形藻数量很低;(2)第 2 阶段(5 月 16~22 日),中肋骨条藻的生长形成另一个高峰,其数量及所占比例仍远远大于其它藻类,但柔弱菱形藻和角毛藻的数量开始上升,角毛藻形成生长高峰,而海链藻

的数量基本上没有增长;(3)第3阶段(5月23~27日),中肋骨条藻的数量急剧下降,占浮游植物比例降到20%以下,而柔弱菱形藻的数量陡增达到最大值,其占浮游植物总数的比值亦上升至70%左右,角毛藻的数量维持较高水平,比例上升至25%左右,海链藻则基本消失。由此可见,大鹏澳春季浮游植物随着生存环境变化,不同时段优势种的组合不同,明显呈现出优势种之间的演替,即中肋骨条藻(海链藻-角毛藻-柔弱菱形藻)→柔弱菱形藻(角毛藻-中肋骨条藻-海链藻)。第2个阶段(即5月16~22日)虽然中肋骨条藻仍为最主要的优势种类,但从各优势种在此阶段前后的数量变化来看,这一阶段明显成为优势种类演替的过渡期。从图2可看出,显然中肋骨条藻和柔弱菱形藻扮演了这次演替过程的主角。

表2 大鹏澳各采样站环境因子的平均值和范围

Table 2 mean, minimum and maximum of physico-chemical factors at 3 sites of Dapeng' Ao Cove

因子 Factors	1 [#] 站 Site 1		2 [#] 站 Site 2		3 [#] 站 Site 3	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
T(°C)	27.5 (25.2~29.0)	27.4 (25.1~28.8)	27.4 (25.2~28.8)	27.4 (25.2~28.5)	27.8 (25.1~28.9)	27.5 (25.1~28.5)
pH	8.00 (7.00~8.27)	8.07 (7.91~8.28)	8.06 (7.30~8.31)	8.12 (7.99~8.31)	8.10 (7.49~8.35)	8.13 (7.94~8.27)
S	32.576 (29.500~33.676)	32.981 (30.673~34.998)	32.601 (28.254~33.746)	33.019 (30.215~33.769)	32.551 (28.821~33.764)	32.893 (30.485~33.773)
DO sat (%)	86.0 (58.8~120.8)	85.4 (57.2~122.4)	103.7 (84.1~122.9)	99.1 (79.0~124.8)	104.2 (88.9~123.5)	101.6 (83.0~120.3)
NH ₄ (μmol/L)	3.66 (0.00~12.56)	4.17 (0.06~13.66)	2.04 (0.00~7.03)	1.83 (0.00~6.04)	1.88 (0.00~12.78)	1.43 (0.00~5.84)
NO ₂ (μmol/L)	0.28 (0.07~1.08)	0.22 (0.06~0.62)	0.19 (0.02~0.87)	0.15 (0.04~0.42)	0.22 (0.02~0.76)	0.17 (0.02~0.49)
NO ₃ (μmol/L)	2.26 (0.00~15.81)	1.27 (0.00~5.13)	1.75 (0.00~15.55)	0.86 (0.00~4.74)	1.37 (0.00~12.52)	0.75 (0.00~3.78)
PO ₄ (μmol/L)	0.43 (0.00~2.11)	0.49 (0.00~2.88)	0.20 (0.00~1.09)	0.22 (0.00~1.32)	0.24 (0.00~0.97)	0.22 (0.00~0.86)
SiO ₃ (μmol/L)	24.43 (5.48~60.71)	24.10 (5.00~49.76)	22.54 (3.57~50.24)	21.39 (5.95~65.00)	24.41 (4.52~100.24)	20.86 (4.05~44.05)
Chl-a(μg/L)	5.56 (1.51~15.35)	5.38 (1.78~13.97)	6.31 (1.24~12.92)	5.91 (1.80~12.40)	6.45 (1.31~18.22)	5.44 (1.68~9.94)

2.2.2 环境理化因子 本次调查大鹏澳各环境理化因子的平均值与数值范围列于表2。在空间分布上,1[#]站的溶解氧饱和度(DO_{sat})较2[#]、3[#]站低,而各营养盐浓度(NH₄、NO₂、NO₃、PO₄和SiO₃)均较高,可作为浮游植物生物量指标的叶绿素Chl-a也较2[#]、3[#]站低,与浮游植物的数量分布相一致。

从各站的浮游植物生物量和理化因子的数值来看,位于渔排养殖区的1[#]站明显不同于水交换较好的2[#]、3[#]站,表现出营养盐浓度高、浮游植物数量和叶绿素含量低的特征,这显然与养殖区的养殖活动影响密切相关。

根据中国科学院大亚湾站的气象监测资料绘制的2002年4月28~5月27日雨量分布图(图4),从5月8日至22日为阴雨天气。雨量最大分布于17日、21日两天,即在浮游植物优势种由中肋骨条藻过渡为柔弱菱形藻的第2阶段(5月16~22日),期间各种理化因子

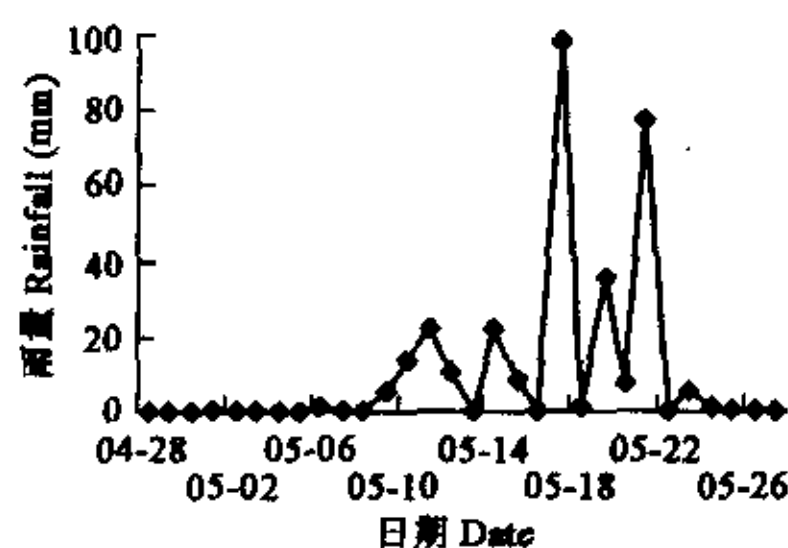


图4 大鹏澳现场观测期间的雨量变化

Fig. 4 Rainfall at Dapeng' Ao Cove from April 28 to May 27, 2002

都发生了相应的变化, T 、 pH 、 S 下降, DO_{sat} 上升, PO_4 和 SiO_3 的浓度一直下降, PO_4 甚至降到检测下限以下, NO_3 和 NO_2 的浓度上升, 波动比较大, 表底层的差别也较大, 氮盐由第 1 阶段的铵氮主导变为第 2 阶段的硝酸氮主导。

2.2.3 演替过程分析 对 1[#]、2[#]、3[#] 站表底层的理化参数和浮游植物优势种细胞数量进行 t 检验, 发现各站表底层间的差异性不大, 但 1[#] 站与 2[#]、3[#] 站的差异显著, 因此只将 2[#]、3[#] 站表底层的数据结合成一个统计分析的大样本, 分析浮游植物优势种的演替过程。采用 1.3 的方法探讨大亚湾春季浮游植物的演替过程, 分析结果和各变量符号说明如下。

(1) 用 prin1、prin2、prin3、prin4、prin5 分别表示主分量分析结果的主分量组成, 各主分量的贡献率依次为 28.6%、22.1%、10.4%、8.9%、8.0%, 这 5 个主分量所代表的信息占了所有主分量的 78.0%, 其主分量组成分别如下:

$$\text{prin1} = 0.003 T + 0.08 pH - 0.46 S + 0.02 DO_{sat} + 0.12 NH_4 + 0.41 NO_2 + 0.49 NO_3 - 0.20 PO_4 - 0.12 SiO_3 + 0.20 SiO_3/PO_4 + 0.49 NO_3/PO_4 - 0.11 SiO_3/NO_3$$

$$\text{prin2} = -0.44 T - 0.26 pH + 0.11 S - 0.37 DO_{sat} + 0.30 NH_4 + 0.31 NO_2 + 0.11 NO_3 + 0.41 PO_4 + 0.40 SiO_3 - 0.20 SiO_3/PO_4 + 0.02 NO_3/PO_4 - 0.13 SiO_3/NO_3$$

$$\text{prin3} = -0.33 T - 0.04 pH - 0.08 S - 0.54 DO_{sat} - 0.51 NH_4 + 0.13 NO_2 + 0.10 NO_3 + 0.34 PO_4 - 0.06 SiO_3 - 0.35 SiO_3/PO_4 + 0.13 NO_3/PO_4 + 0.22 SiO_3/NO_3$$

$$\text{prin4} = -0.007 T + 0.14 pH + 0.05 S + 0.12 DO_{sat} + 0.10 NH_4 - 0.005 NO_2 + 0.02 NO_3 + 0.05 PO_4 + 0.50 SiO_3 + 0.45 SiO_3/PO_4 + 0.09 NO_3/PO_4 + 0.70 SiO_3/NO_3$$

$$\text{prin5} = 0.06 T + 0.80 pH - 0.15 S + 0.03 DO_{sat} + 0.36 NH_4 + 0.001 NO_2 - 0.06 NO_3 + 0.28 PO_4 + 0.04 SiO_3 - 0.33 SiO_3/PO_4 - 0.07 NO_3/PO_4 + 0.02 SiO_3/NO_3$$

上述主分量的组成说明, prin1 主要表征 S 、 NO_2 、 NO_3 、 NO_3/PO_4 的作用; prin2 主要表征 T 、 PO_4 、 SiO_3 、 DO_{sat} 、 NO_2 、 NH_4 的作用; prin3 主要表征 DO_{sat} 、 NH_4 的作用; prin4 则主要表征 SiO_3/NO_3 、 SiO_3 、 SiO_3/PO_4 的作用; 而 prin5 则主要表征 pH 的作用。这样经过主分量分析, 可将 12 个理化因子变量减少为相互之间没有相关关系的 5 个主成分变量。各主分量因子的时间序列变化如图 5 所示(以 3[#] 站表层为例, 其中 5 月 14 日数据缺失)。

(2) 根据优势种与主分量因子的相关矩阵对优势种进行多元回归($p < 0.01$), 得出优势种之间的关系及

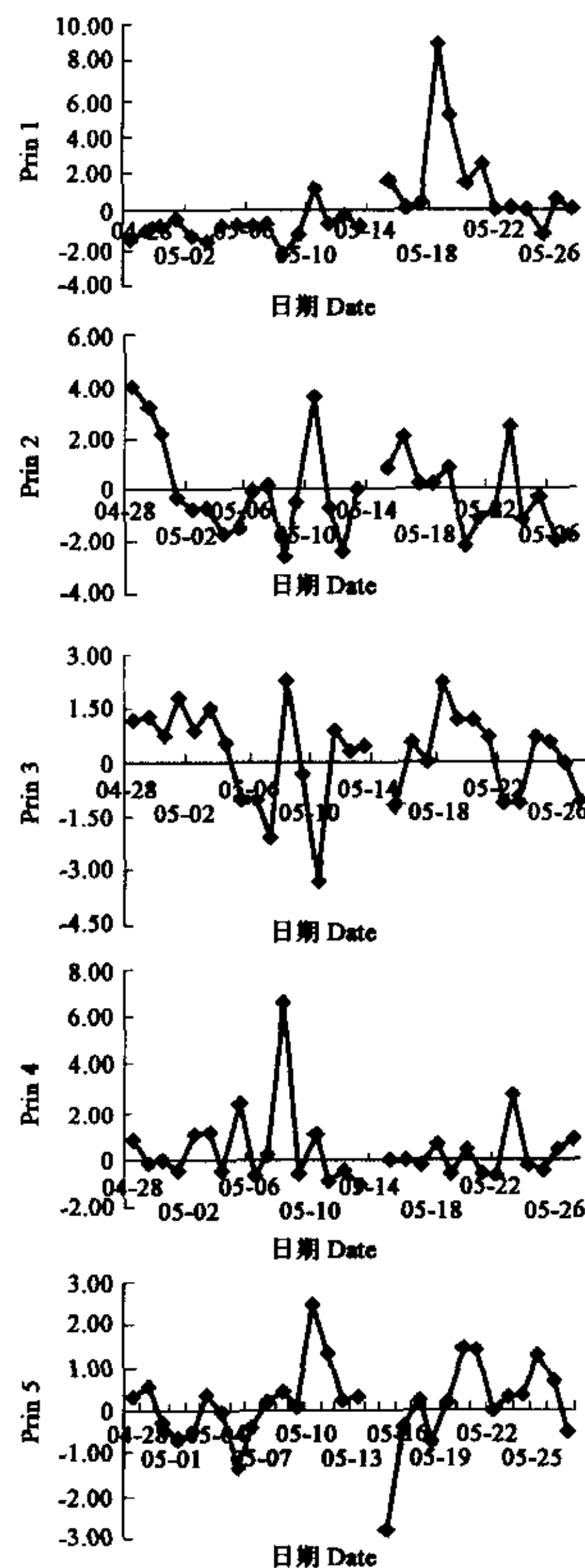


图 5 各主分量因子随时间的变化趋势图(3[#] 站表层)

Fig. 5 Time series of the scores of the principal component at surface layer of site 3 from April 28 to May 27 2002

其所受到的主分量因子的影响(图 6)。可看出这 4 种优势种属的生长都受 prin2 的影响,即主要为 T 、 PO_4 、 SiO_3 、 DO_{sat} 、 NO_2 、 NH_4 的作用;影响中肋骨条藻的主分量因子还有 prin1 (S 、 NO_2 、 NO_3 、 NO_3/PO_4) 和 prin3 (DO_{sat} 、 NH_4),以及柔弱菱形藻的竞争压力;柔弱菱形藻除了受 prin2 的影响外,还受到中肋骨条藻的竞争压力及角毛藻的作用;影响角毛藻的主分量因子除 prin2 外,还有 prin1 和柔弱菱形藻的作用;由于海链藻的回归 R^2 值很低(0.192),且与其它优势种类的关系不显著($p>0.05$),因此不将海链藻纳入模型中。

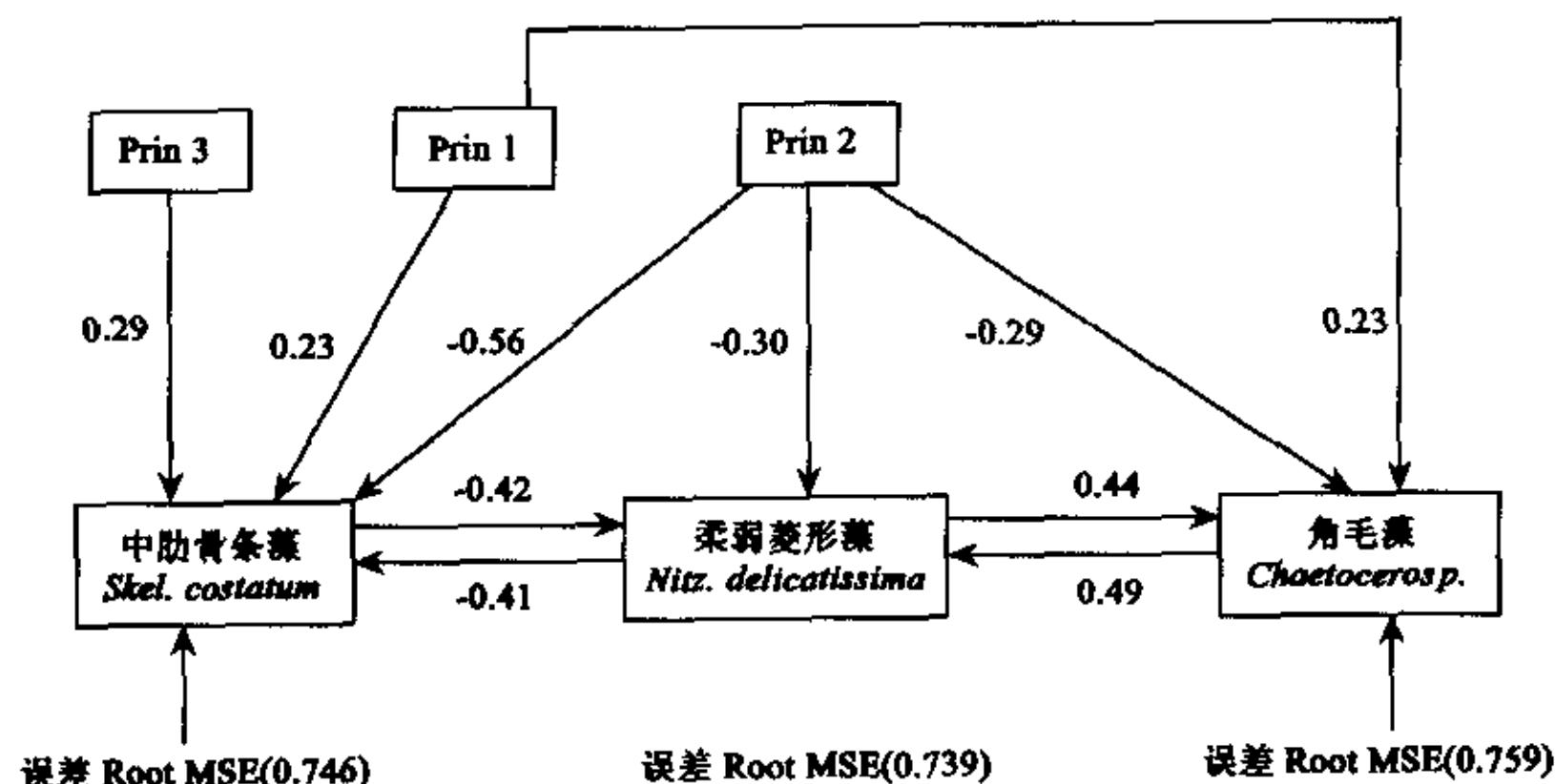


图 6 大亚湾大鹏澳春季浮游植物优势种类演替过程模型

Fig. 6 Succession model of dominant phytoplankton species at Dapeng'ao cove, Daya Bay, in spring 2002

对各优势种多元回归的 R^2 值和 n 值如下: 中肋骨条藻 $R^2=0.4638(n=112)$ 柔弱菱形藻 $R^2=0.4681(n=112)$ 角毛藻 $R^2=0.4397(n=112)$ for each dominant species, the R^2 value and the number are as follows: *Skel. costatum* $R^2=0.4638(n=112)$; *Nitz. delicatissima* $R^2=0.4681(n=112)$; *Chaetoceros sp.* $R^2=0.4397(n=112)$

(3) 演替过程分析 由于浮游植物优势种类的演替发生在第 2 阶段(5 月 16~22 日)到第 3 阶段(5 月 23~27 日),因此,各主分量在这两段时间内的变化直接影响了优势种的演替。

从 prin2 结构中几个主要理化因子的系数,及 prin2 对浮游植物优势种类的作用影响系数,可知 T 、 DO_{sat} 上升, PO_4 、 SiO_3 、 NO_2 、 NH_4 下降与浮游植物生长密切相关,即温度升高有利于浮游植物生长,浮游植物生长消耗营养盐(PO_4 、 SiO_3 、 NO_2 、 NH_4),并使得水中溶解氧饱和度(DO_{sat})提高,故 prin2 表达了浮游植物与环境理化因子之间的关系。prin2 在第 2 阶段呈下降势态,在第 3 阶段形成峰值后又持续下降,这与浮游植物优势种类的生长刚好相反,说明 Prin2 对这几种浮游植物优势种为负作用。

中肋骨条藻除了受到 prin2 的负作用外,还有 prin1 和 prin3 的正作用。Prin1 对中肋骨条藻的作用,表示盐度(S)下降, NO_2 、 NO_3 、 NO_3/PO_4 升高有利于中肋骨条藻的生长,在雨量最大的第 2 阶段,盐度由 33.5 下降至 28.5,雨水的冲刷使得水中 NO_2 、 NO_3 含量及 NO_3/PO_4 比值均达到最大峰值,故中肋骨条藻又呈现生长高峰;在第 3 阶段,盐度上升到 32.0 的水平, NO_2 和 NO_3 因浮游植物的生长大量消耗而降低, NO_3/PO_4 也随之降低,不利于中肋骨条藻的生长。图 5 中 prin1 在第 2 阶段和第 3 阶段持续下降,使中肋骨条藻生长受到抑制。prin3 对中肋骨条藻的作用表示溶解氧饱和度(DO_{sat})和铵氮(NH_4)降低对其生长有利,prin3 在第 3 阶段降低(图 5),也抑制中肋骨条藻的生长。

中肋骨条藻和柔弱菱形藻之间是一种竞争关系(相互作用系数分别为 -0.42 和 -0.41),中肋骨条藻在第 3 阶段的生长受到限制,减轻了柔弱菱形藻的生长压力,使其数量上升,达到一定程度后反过来抑制中肋骨条藻的生长,使骨条藻数量继续下降,形成一个正反馈过程。

角毛藻除了受到 prin2 影响外,还受到 prin1 的影响,如前所述,prin1 在第 3 阶段下降,抑制了角毛藻的生长,但角毛藻和柔弱菱形藻之间为正相关关系,柔弱菱形藻的增长带动了角毛藻的生长,但二者的竞争作用使得角毛藻在第 3 阶段虽有增长,但上升缓慢,成为仅次于柔弱菱形藻的优势种类。

以上这些过程的综合作用最终使浮游植物优势种发生演替,由中肋骨条藻占主导地位演变为柔弱菱形藻占主导地位。

3 结论

大亚湾大鹏澳水域春季现场连续观测期间,浮游植物表现出明显的优势种类之间的演替,即优势种类由中肋骨条藻演替为柔弱菱形藻。这一演替过程与主要环境条件(T 、 DO_{sat} 、 PO_4 、 SiO_3 、 NO_2 、 NH_4)的变化有密切关系。5月中旬的大量降雨造成大鹏澳水域中氮盐大量增加,浮游植物出现生长高峰,当各种营养盐被极大消耗后,受硝酸盐和氮磷比控制的中肋骨条藻数量下降,减轻了对柔弱菱形藻的竞争压力,使柔弱菱形藻大量生长。本文使用主分量分析和多元回归相结合的方法,探讨浮游植物优势种之间及其所受到的主要环境理化因子的关系,提出大鹏澳水域春季浮游植物优势种的演替模型,并较好地解释了演替过程。

References:

- [1] White A W. Growth inhibition caused by turbulence in the toxic marine dinoflagellate *Gonyaulax excavata*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1976, **33**: 2598~2602.
- [2] Brand L E. The salinity tolerance of forty-six marine phytoplankton species. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 1984, **18**: 543~556.
- [3] Reynolds C S. Physical determinants of phytoplankton succession. In: Sommer U. ed. *Plankton Ecology*. Springer-Verlag, Orlando, Florida, 1989. 9~56.
- [4] Sommer U. The role of competition for resources in phytoplankton succession. In: Sommer U. ed. *Plankton Ecology*. Springer-Verlag, Orlando, Florida, 1989. 57~106.
- [5] Sterner R W. The role of grazers in phytoplankton succession. In: Sommer U. ed. *Plankton Ecology*. Springer-Verlag, Orlando, Florida, 1989. 107~170.
- [6] Thomas D, Gibson C H. Effects of small scale turbulence on microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 1990, **2**: 71~77.
- [7] Balode M, Purina I, Bechemin C, et al. Effect of nutrient enrichment on the growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Journal of Plankton Research*, 1988, **20** (12): 2251~2272.
- [8] Riegman R, Noordeloos A A M, Cadée G C. *Phaeocystic* blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea. *Marine Biology*, 1992, **112**: 479~484.
- [9] Zhou X P, Wang Z D, Lin Y S. Uniform design and its application population dynamics of red tide organisms. In: Lin Y S ed. *A Study on Eutrophication and Red Tide in the Offshore Area*. Beijing: Sciences Press, 1997. 40~48.
- [10] Wang J L, Huang Y T, Lin Y S. The implication of rainfall induced nutrients input to red tide occurrence in Dapeng Bay. In: Lin Y S ed. *A Study on Eutrophication and Red Tide in the Offshore Area*. Beijing: Sciences Press, 1997. 75~81.
- [11] Zhang J T. *Method in quantitative vegetation ecology*. Beijing: China Science and Technology Publishing Press, 1995.
- [12] Gayoso A M. Seasonal succession patterns of phytoplankton in the Bahia Blanca Estuary (Argentina). *Botanica Marina*, 1999, **42**(4): 367~375.

参考文献:

- [9] 周贤沛,王肇鼎,林永水. 均匀设计及其在赤潮生态模拟中的应用. 见:林永水主编. 近海富营养化与赤潮研究. 北京:科学出版社,1997. 40~48.
- [10] 王建林,黄羽庭,林永水. 雨季营养盐输入对大鹏湾赤潮发生的影响. 见:林永水主编. 近海富营养化与赤潮研究. 北京:科学出版社,1997. 75~81.
- [11] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京:中国科学技术出版社,1995.