

# 香港及珠江口海域有害赤潮发生机制初步探讨

颜 天<sup>1</sup>, 周名江<sup>1</sup>, 邹景忠<sup>1</sup>, 钱培元<sup>2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 香港科技大学, 九龙, 清水湾)

**摘要:**回顾了香港及珠江口海域赤潮发生和藻毒素污染的历史及研究状况, 结合 3 种代表赤潮藻种最适光温盐生长实验, 4 种不同形态氮营养盐对几种常见赤潮藻种生长影响实验, 以及不同营养盐、温度、盐度条件下赤潮藻群落变化过程实验, 初步探讨了物理、化学、生物等环境因子在香港和珠江口海域赤潮发生中的作用机制。

**关键词:**赤潮; 藻毒素; 环境因子; 香港及珠江口海域

## Preliminary studies on red tide formation mechanism in Hong Kong and Pearl River Estuary

YAN Tian<sup>1</sup>, ZHOU Ming-Jiang<sup>1</sup>, ZOU Jing-Zhong<sup>1</sup>, QIAN Pei-Yuan<sup>2</sup> (1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Clear Water Bay, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1634~1641.

**Abstract:** This paper reviews the history and present status of red tide and algal toxins occurrence in Hong Kong and Pearl River Estuary. As one of the most frequent HAB occurrence areas, Hong Kong first began its reporting of HAB events in the early 1970's. In 1983, Lam & Ho pointed out that the increasing HAB and related fish-killing events in Hong Kong were correlated with increased urbanization of that region. From 1980~1997, 496 HAB events were recorded in Hong Kong waters. According to the record, the most frequent HAB occurrence area in Hong Kong were at Tolo Harbour (which involved more than 70% of the total HAB events), Mirs Bay and Port shelter (which all locate at northeast of Hong Kong). In Hong Kong, 70% of the HAB happened during Dec. ~ May. At least 58 HAB species are known to distribute in Hong Kong. Here, the main HAB species are *N. Scintillans*, *S. costatum*, *G. polygramma*, *P. triestinum*, *P. minimum*, *C. furca*, *M. rubrum*, *G. splendens*, *P. sigmoidens*, *P. triquetra* and *L. minimus*. Hong Kong is also considered to be a vulnerable area for foreign HAB species because it is such an internationally important marine transportation center. Several species of dinoflagellate cysts were found in ballast waters arriving Hong Kong from Aukland and California to Hong Kong.

In Hong Kong, PSP was first detected in shellfish samples in Tolo Harbor in 1985. PSP in marine products from Hong Kong showed two peaks with the main peak occurring in the spring and the other in fall. Several illnesses were suspected to be caused by the consumption of DSP contaminated marine products in 1995. CFP (Ciguatera Fish Poisoning) is also a frequent algal toxin problem in the Hong Kong area. More than 200 documented CFP poisoning events have occurred in Hong Kong since 1989, resulting in more than 1 000 people being intoxicated. Although most of these CFP incidents were due to the consumption of imported coral reef fish, the causative HAB species *Gambierdiscus toxicus*, has also been found recently in local waters.

3-factor experiments have been used to study the combined effects of main physical factors

基金项目: 国家自然科学基金主任基金(39950001), 国家自然科学基金重大基金(39790110), 国家自然科学基金(49906007)和香港马会项目 PREEP, 中国科学院知识创新工程(KZCX2-206)资助项目

收稿日期: 2000-04-13 万方数据 日期: 2001-04-13

作者简介: 颜 天(1969~), 女, 广东化州人, 副研究员。主要从事有害赤潮和海洋生态毒理研究。

temperature, irradiance and salinity on the growth of three red tide species Dinoflagellate *Alexandrium tamarense*, Raphidophyte *Heterosigma carterae*, and Diatom *Skeletonema costatum*. The results showed that temperature (12 C, 19 C, 25 C, 32 C), salinity (10, 18, 25, 30, 35) and irradiance (0.02, 0.08, 0.3,  $1.6 \times 10^{16}$  quanta/(sec  $\cdot$  cm<sup>2</sup>)) significantly influence the growth of all these three species. For all these three species, there were interactive effects between any two of and among all three physical factors on the growth, except irradiance and salinity on *H. carterae* growth. The optimal growth condition of *A. tamarense* was 19 C, 30 and  $1.6 \times 10^{16}$  quanta/(sec  $\cdot$  cm<sup>2</sup>); *H. carterae* 25 C, 10~35 and  $1.6 \times 10^{16}$  quanta/(sec  $\cdot$  cm<sup>2</sup>); and *S. costatum* 25 C, 18~35 and  $1.6 \times 10^{16}$  quanta/(sec  $\cdot$  cm<sup>2</sup>). In Hong Kong waters, *H. carterae* and *S. costatum* divided at higher rate and were more likely to bloom under high temperature and high illumination from spring to fall. Both species were able to distribute widely in ocean and estuary due to their adaptation to relative wide salinities. *A. tamarense* grew at a lower rate than the other two species and was more likely to form red tide only at early spring or late autumn in ocean area. Competition experiment with these three major red tide species under different salinities (10, 18, 25, 30, 35), temperatures (19 C, 25 C) and nutrient conditions (Si, N : P) were carried out. The results showed that *S. costatum* competed with other two species successfully at salinities of 18, 25, 30, 35 at both temperatures of 19 C, 25 C. However, *H. carterae* showed its advantage at low salinity of 10 and became dominant at 10 C and 25 C. *A. tamarense* tended to become dominance at low Si and low N : P ratio conditions. The competitive advantage of *S. costatum* could probably explain why it is one of the most frequent HAB occurrence species in Hong Kong waters. Eight common red tide species including the Dinoflagellates *Alexandrium tamarense*, *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum mican*, Diatoms *Skeletonema costatum*, *Cerataulina pelagica*, *Leptocylindrus minimus*, a Raphidophyte *Heterosigma carterae* and a Chrysophyte *Isochrysis galbana* were chosen to study the effect of four nitrogen substrates (NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Urea-N, mixed-N) on the growth of these algae. After two transfers, the results showed that at N concentration of 550μM, NO<sub>3</sub>-N was the best nitrogen source among these four nitrogen substrates; Urea-N and Mixed-N were also good for growth of most algae, but not as good as NO<sub>3</sub>-N for some species; NH<sub>4</sub>-N inhibited growth of all these species except *H. carterae*. Based on the above results and the local environment conditions, the functions of main environmental factors in forming red tides in Hong Kong; Pearl River Estuary are discussed.

**Key words:** red tide; environmental factors; Hong Kong and Pearl River Estuary

文章编号:1000-0933(2001)10-1634-08 中图分类号:Q143.S55 文献标识码:A

赤潮,在香港称“红潮”,有害赤潮除了能破坏生态环境外,赤潮藻毒素还直接威胁着人类生命安全。香港及珠江口海域是世界上赤潮发生最频繁的地区之一,发生于1998年春的香港和珠江口海域有史以来最大的赤潮,在当地造成了重大的经济损失,震惊了公众和各政府部门。为更好地了解香港和珠江口海域赤潮发生机制,为建立当地赤潮的预警预报提供科学依据,在国家自然科学基金主任基金项目“香港及珠江口海域富营养化及有害赤潮研究”支持下,本文第一作者为此赴香港科技大学进行了一年的相关研究。本文将综合收集到的当地资料,回顾香港及珠江口海域赤潮发生和藻毒素的历史及研究状况,通过代表赤潮藻种在该海域形成赤潮的最适环境条件,通过不同形态氮营养盐对几种常见赤潮藻生长的影响,以及不同营养盐、温度、盐度条件下微藻群落变化的过程,初步探讨物理、化学、生物等环境因子在香港和珠江口海域赤潮发生中的作用机制,为本地区赤潮数学模型的建立,以及更完善监测系统和有效治理措施的实施提供科学依据。

1 赤潮的致因与数据

赤潮通常是指一些海洋微藻、原生动物或细菌在水体中过度繁殖或聚集而引起海水变色的现象。其

实,海水除了能变成红色,还会变为褐色、黄色、桔红色、绿色等。海洋中的 4000 余种浮游藻类中,约有 300 种能导致赤潮,70 多种能产生毒素。赤潮一般可分为 3 类,第 1 类是无毒的赤潮,这一类一般情况下可能不一定会引起海产养殖问题,但有些藻通过堵塞或钩刺对鱼鳃构成机械损伤,或藻死亡分解大量耗氧而引起水体缺氧,则可能导致鱼等海洋生物窒息死亡;第 2 类是对人类无毒,却对鱼及无脊椎动物致毒的赤潮,如有些藻能产生溶血素等毒性物质而致海洋鱼贝死亡;第 3 类是危害人类健康的赤潮,这类藻产生的藻毒素通过在贝类(鱼)体内累积,而使人类在食用时受到毒害。根据人类中毒症状,藻毒素可分为麻痹性贝毒、腹泻性贝毒、神经性贝毒、记忆缺失性贝毒和西加鱼毒等 5 种。近年来,赤潮的频繁发生加剧了局部海洋环境的恶化,破坏了海产养殖业,并对人类健康构成了严重威胁。

2 香港赤潮的发生

赤潮是一种自然现象,早在圣经上就有记载,近来的频繁发生一般认为主要是与人类活动密切相关。香港位于中国南海海岸和珠江口东侧,为赤潮高发区之一。在香港, Morton 首先报道了发生于 1971 年 6 月的夜光藻赤潮<sup>[1]</sup>,随后环保署也开始发表一些相关的报告。1983 年起, Lam 等进行了一系列关于赤潮的报道,他们指出在过去的 12 年间,香港近岸赤潮发生频率增加,鱼类死亡事件不断上升,1971 年到 1983 年发生了约 30 次赤潮事件,其中 12 次引起了鱼类的大量死亡。因此,他们呼吁环保署、渔农处等部门应密切协作,使公众能意识到赤潮带来的后果,并尽量减少它对人类健康可能带来的威胁<sup>[2]</sup>。香港发生赤潮最多的海域是吐露港(Tolo Harbour),1976 年在此海域开始进行 2 周 1 次的赤潮监测,调查结果显示,赤潮发生频率在 80 年代上升很快,1980~1982 年共有 11 次,1983 年有 11 次,而 1984 年上半年就有 10 次,直到 80 年代后期,香港政府对工农业及生活排污水采取了有效管理措施后,赤潮发生数量才明显下降<sup>[3]</sup>。根据香港渔农处(AFD)在香港海域的监测结果<sup>[4]</sup>,1980~1997 年间香港赤潮的分布情况见表 1,主要赤潮藻种和发生次数见表 2。

表 1 赤潮在香港和珠江口海域的分布情况(1980~1997)  
Table 1 Red tide occurrence in Hong Kong and Pearl River Estuary

海域 Sea area	次数 Number	海域 Sea area	次数 Number
Mirs Bay	72	Victoria Harbor	11
Tolo Harbor&Channel	268	Southern Waters	51
Eastern Buffer	1	North Western Waters	10
Port Shelter	61	Western Buffer	16
Junk Bay	5	Deep Bay	1

从赤潮发生的地域分布看,当地主要的赤潮藻种—*N. scintillans* 和 *G. polygramma*, *S. costatum*, *M. rubrum* 在香港海域形成赤潮的范围较广,而另外一些主要藻种如 *C. furca*, *P. triestinum*, *G. splendens*, *Thalassiosira* spp, *P. sigmoidens*, 只在香港东北海域形成过赤潮。从赤潮发生时间方面看, *N. scintillans* 大多在 12 月到 4 月形成赤潮, *G. polygramma* 赤潮只在 2~5 月份发生,而 *S. costatum* 赤潮大多在 5~9 月份间。总的来说,74.4%的赤潮在香港东部海域吐露港(Tolo Harbour)、大鹏湾(Mirs Bay)及牛尾海(Port Shelter)。70%的赤潮发生在 12~5 月份期间,7~11 月份发生频率最低<sup>[5]</sup>。

1998 年 3 月中旬香港发生了特大赤潮,从东北海域向南、向西蔓延,肆虐达一个月之久,渔民精心饲养的鱼成批死亡,多个海滩浴场被迫关闭。这次香港有史以来最大赤潮造成了 1 500 多吨养殖鱼的损失,香港政府估计这次灾害损失至少 8 千万港币,养殖业宣称损失至少 2 亿 5 千万港币。引发这场灾害的是米氏裸甲藻 *Gymnodinium mikimotoi*(HK-98)。这种藻能产生粘液,粘液堵塞鱼鳃而使鱼窒息而亡,90%接触了这种有害藻的鱼在 30min 内就死亡,这么快的死亡率很可能还有毒素在起作用<sup>[6]</sup>。另有实验发现,赤潮发生时的浮游植物混合样品提取物能刺激鱼神经使鱼的心速降低并阻碍氧气摄入,表明这种赤潮藻可能产生了神经性毒素<sup>[7]</sup>,但总的说来,它的致毒机制尚未完全搞清。

3 香港藻毒素的研究现状

到目前为止,危害香港地区的藻毒素是麻痹性贝毒 PSP(Paralytic Shellfish Poisons)和西加鱼毒 CFP(Ciguatera Fish Poisons)。1985 年 Lam 首次在香港用小鼠法对吐露港贝类样品的 PSP 含量进行

了调查,不仅检测出了 PSP 毒素而且发现贝类中毒量在春秋两季最高,这也与吐露港的赤潮发生高

Table 2 Occurrence of red tide causative species in Hong Kong, 1980~1997

藻种 Species	次数 Number	藻种 Species	次数 Number	藻种 Species	次数 Number
甲藻 Dinoflagellate					
<i>Noctiluca scintillans</i>	165	<i>Gonyaulax polygramma</i>	38	<i>Prorocentrum triestinum</i>	29
<i>Prorocentrum minimum</i>	27	<i>Ceratium furca</i>	23	<i>Prorocentrum sigmoides</i>	15
<i>Peridinium triquetra</i>	10	<i>Gymnodinium nagasakiense</i>	5	<i>Prorocentrum micans</i>	4
<i>Gymnodinium</i> sp.	3	<i>Gymnodinium simplex</i>	3	<i>Prorocentrum dentatum</i>	3
<i>Alexandrium excavatum</i>	3	<i>Gymnodinium viridescens</i>	1	<i>Gyrodinium resplendens</i>	3
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	1	<i>Gymnodinium splendens</i>	1	<i>Peridinium trochoideum</i>	1
<i>Prorocentrum</i> sp.	1	<i>Alexandrium catenella</i>	1		
硅藻 Diatom					
<i>Skeletonema costatum</i>	38	<i>Leptocylindrus minimus</i>	9	<i>Rhizosolenia fragillissima</i>	8
<i>Thalassiosira mala</i>	7	<i>Chaetoceros</i> sp.	5	<i>Nitzschia delicatissima</i>	4
<i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	4	<i>Thalassiosira spinulata</i>	4	<i>Leptocylindrus danicus</i>	4
<i>Nitzschia seriata</i>	3	<i>Cochlodinium</i> sp.	2	<i>Synechocystis</i> sp.	2
<i>Trichodesmium erythraeum</i>	2	<i>Trichodesmium</i> sp.	2	<i>Biddulphia mobilensis</i>	2
<i>Thalassiosira</i> sp.	1	<i>Distephanus speculum</i>	1	<i>Chlamydomonas</i> sp.	1
<i>Biddulphia scensis</i>	1	<i>Ceratella pelagica</i>	1	<i>Chaetoceros pseudocarinatus</i>	1
<i>Cyclotella</i> sp.	1	<i>Eucampia zoodiecus</i>	1	<i>Nitzschia longissima</i>	1
<i>Rhizosolenia delicatula</i>	1	<i>Rhizosolenia stouterlothii</i>	1	<i>Thalassiosira</i> sp.	1
<i>Chaetoceros curviusetum</i>	1				
针胞藻 Raphidophyte					
<i>Olisthodiscus</i> sp. .	9	<i>Chattonella</i> sp.	1		
隐藻 Cryptomonadaceae					
<i>Cryptomonas</i> sp.	8	<i>Cryptomonas acuta</i>	1		
眼藻 Euglenophyceae					
<i>Eutreptiella</i> sp.	4				
原生动物 Protozoa					
<i>Mesodinium rubrum</i>	7				
其他 Other					
<i>Cyrtarcylis</i> sp.	1	<i>Pedinomonadaceae</i> sp.	1	<i>Katodintum rotundatum</i>	1
<i>Plagioselmis prolunga</i>	1				
总共 Total:	58	496			

峰相吻合,随后 Lam 等又利用 HPLC 进一步证实确有 STX——一种 PSP 毒素的主要形式<sup>[7]</sup>。香港在过去 20 年海产品毒素的常规检测表明了 PSP 污染呈季节性趋势,主要高峰在 3~4 月份,其次在 10~11 月份。1989 年 3~4 月份,由于 *Alexandrium catenella* 赤潮曾使得当地贝类含量超出 WHO 的安全标准而被禁止采集出售。与此同时,当地的鱼也同样受到了污染。香港大学分离培养了产毒藻并进行了产毒机制的研究<sup>[8]</sup>。1991 年,在香港及其邻近海域,暨南大学水生所齐雨藻教授等采集到了 4 种有毒赤潮生物孢囊<sup>[9]</sup>。

在进行全国沿海贝类藻毒素的调查时,发现采于香港 1996 和 1998 年的多个贝类样品不仅有 PSP 污染,而且也有腹泻性贝毒 DSP 污染。其中 1996 年 9 月 17 日在香港市场购买的扇贝 *Clamys nobilis* 中 PSP 含量为 1600 mμ/100g,远远超过了国际食用标准 400mμ/100g<sup>[10]</sup>。

而西加鱼毒污染在香港终年都能发生,其根源是来自南太平洋或印度洋岛上的鱼类。西加鱼毒产毒藻经食物链方式传递到鱼中,在鱼体内累积,人食用后引起中毒。自从 1989 年以来香港共发生了 200 多起西加鱼毒中毒事件,共有 1000 多人中毒,以上事件大多是因食用进口珊瑚鱼而导致的,但 1997 年香港水域也发现了产生西加鱼毒的藻 *Gambierdiscus toxicus*,因此当地鱼的消费也需引起特别重视<sup>[11]</sup>。

4 香港赤潮发生机制

4.1 赤潮藻种

香港和珠江口海域位于亚热带,物种丰富,赤潮生物种类繁多,数量高,如表一所示,这是当地发生赤潮的主要生物类群。据调查,当地本来就有的赤潮生物,海流、生物引种和压舱水都能将外来赤潮生物种带入当地水域。Ho 和 Hodgkiss 认为 *Alexandrium catenella* 就是由海流引入香港海域的<sup>[12]</sup>。而香港作为一个非

常繁忙的国际船舶运输中心,非常容易受到外来赤潮藻种的侵袭。在从奥克兰和加利福尼亚来港的船的压舱水中已经发现有 17 种甲藻孢囊,其中一种是有毒的亚历山大藻<sup>[13,14]</sup>。

4.2 环境条件

赤潮的形成需要合适的条件,各种环境因子包括物理、化学、生物和气候等方面影响着赤潮的发生及时空分布,见图 1。

4.2.1 物理因子 影响赤潮形成的主要物理因子是温度、盐度、光照、海流等。为研究物理因子在香港和珠江口海域赤潮形成的作用,建立本地区赤潮形成的数学模型,选取了 3 种不同门类和不同有害作用形式的代表赤潮藻来进行研究:塔玛亚历山大藻 *Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech 属双鞭毛甲藻(Dinoflagellate),是一种产生 PSP 对人致毒的藻种;赤潮异弯藻 *Heterosigma carterae* (Hulburt) Taylor 属针胞藻(Raphidophytes),为鱼类死亡的主要原因种,此种在鉴定中一直易与其他种混淆,在本地区疑报道为 *Olisthodiscus* sp.;中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve,属硅藻(Diatom),无毒但可能因死亡后分解而大量耗氧或堵塞鱼鳃而产生危害。利用多因子实验设计研究了温度、盐度、光照对 3 种藻生长的影响。根据香港及珠江口海域环境特点,设置实验范围为温度 12、19、25、32℃ 光照  $0.02 \times 10^{16}$ 、 $0.08 \times 10^{16}$ 、 $0.3 \times 10^{16}$ 、 $1.6 \times 10^{16}$  quanta/(sec·cm<sup>2</sup>),盐度 10、18、25、30、35,每天测量藻的活体荧光值以计算各条件组合下的生长率,实验范围内的最适生长条件及生长率见表 3。

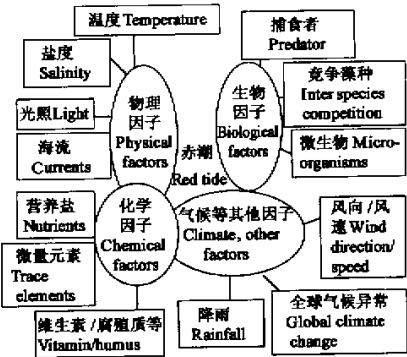


图 1 影响赤潮形成的主要环境因子  
Fig. 1 Main environmental factors influencing red tide formation

表 3 三种代表赤潮藻的最适生长条件及生长率

藻种 Species	亚历山大藻 <i>A. tamarense</i>	赤潮异弯藻 <i>H. carterae</i>	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>
温度 Temperature(℃)	19	25	25
光照 Light (quanta/(s·cm <sup>2</sup> ))	$1.6 \times 10^{16}$	$1.6 \times 10^{16}$	$1.6 \times 10^{16}$
盐度 Salinity	30	10~35	18~35
生长率 Growth rate (/d)	0.25	0.8	1.45

经三维 ANOVA (Tukey test) 统计方法分析,结果表明除了光照和盐度对赤潮异弯藻生长没有相互作用外,这 3 个环境因子之间及其任何两因子间对 3 种藻生长都存在显著的相互作用。由实验结果可见,在香港及其邻近水域,赤潮异弯藻和中肋骨条藻容易在高温、高光照下迅速生长繁殖,且能在海洋和河口广盐度范围内分布;亚历山大藻容易在秋末春初(<25℃)形成赤潮,但该种藻不易在河口形成赤潮。根据 Honjo 的综述,赤潮异弯藻形成赤潮的温度范围可以在 15~30℃之间,在日本,发生赤潮异弯藻赤潮时,水温大多在 20~25℃<sup>[15]</sup>,我国大连湾赤潮发生时温度为 22℃左右<sup>[16]</sup>,本文的研究结果与他们的报道的一致。实验结果还表明赤潮异弯藻对盐度具有广泛适应性,因此它能在河口和盐度低的海域分布并形成赤潮,实际上它的确经常在加拿大、日本的河口地区形成赤潮而且造成鱼类大量死亡<sup>[15,17]</sup>,在我国大连湾,1985~1987 年连续 3a 的赤潮异弯藻赤潮也都是发生在大雨之后水体盐度下降的海区<sup>[16]</sup>。中肋骨条藻为香港海域第二大赤潮藻种,其适温适盐范围较广,在全球海域分布广泛,同类研究发现栖息于渤海湾种群的最适温度为 19~25℃,盐度 25~30<sup>[18]</sup>,与本实验结果一致。对于产生 PSP 毒素的亚历山大藻,在香港海域贝类 PSP 毒素累积的季节性趋势从一个侧面印证了本文的结果。1985 年 Lam 对香港吐露港贝类样品的



PSP 含量的调查结果和香港整个地区在过去 20a 海产品毒素的常规检测结果, 都表明 PSP 的含量在本海域春秋两季较高<sup>[7,9]</sup>。在中国北方海域, 青岛胶州湾扇贝养殖区发现亚历山大藻时, 当地的水温范围是 14.3~25.4℃ 之间<sup>[19]</sup>, 同种藻在美国沿岸爆发赤潮通常在春季较暖水域<sup>[20]</sup>, 而在澳大利亚东南沿岸则发生在夏季<sup>[21]</sup>, 总的来说, 这种藻形成赤潮的温度在 19~25℃ 之间, 与本文实验的结果相近。

可见, 这 3 个物理因子在赤潮的形成中起着相当重要的作用, 其他物理因子也直接或间接地影响了香港及珠江口海域的赤潮发生。如香港西部海域的赤潮数量明显低于东部珠江口海域, 其中一个主要的原因就是受珠江水入海的影响, 在此影响下珠江口海域盐度一般较低, 只有适应低盐的藻种才能生长, 泥沙含量高使得水体中光线弱, 而且水流急, 所以该海域不利于一些典型赤潮藻如甲藻的生长, 也不利于赤潮藻聚集。

4.2.2 化学因子 富营养化是赤潮发生的物质基础<sup>[18]</sup>, 生活污水和工农业有机废水含有大量氮磷等营养盐, 如果未经处理就大量排入近岸水体中, 在水体中过量蓄积就会造成富营养化, 其他条件如温度、盐度等条件也合适的情况下, 藻类就会快速增殖而形成赤潮。香港吐露港赤潮发生频率的变化很好地印证了这一点。

自 20 世纪 70 年代起, 随着工农业发展人口增加及城市的不断扩大, 工农业废水, 生活污水量日益增加, 香港吐露港海水富营养化日趋严重, 赤潮发生率也一直呈上升趋势。1985 年吐露港的营养盐负荷比 1976 年增加了 2 倍多, 由 1976 年的每天 800kg N、200kg P 上升到 1985 年的每天 2000kg N、450kg P<sup>[2]</sup>, 控制污水排放量, 减轻富营养化程度迫在眉睫<sup>[22,23]</sup>。20 世纪 80 年代末香港政府对工农业及生活排污水采取了有效管理措施后, 赤潮发生数量明显下降。

海水中营养盐的组成比变化也是诱发赤潮发生的一个重要因素, 如 N:P 比的改变决定了优势种群的变化。Hodgkiss 认为香港海域中大多赤潮生物的 N 和 P 的最适比在 6~15 之间<sup>[24]</sup>。本文在实验室也验证了 N:P 比率对微藻群落结构的影响, 通过比较 N:P 比率为 25:1 和 5:1 两种情况下, 发现以上 3 种代表赤潮藻组成的微藻群落结构有显著差异, 结果表明, N:P 比增加将有利于硅藻的生长(图 2A,B,C)。

另外, 不同的营养盐形式也能影响赤潮的生长, 如氮源具有 NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, Urea-N 等几种形式。因此, 研究了 NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、Urea-N、混合 N 对 8 种常见赤潮藻生长的影响(见表 4), 通过两次接种实验, 发现在 4 种氮源形式下, 高浓度 NH<sub>4</sub>-N 对大部分藻的生长有抑制作用, 只有 *H. carterae* 对高浓度 NH<sub>4</sub>-N 有良好的适应能力, 加上这种藻对盐度的广适性, 这种藻在河口等 氨氮较高的海域比其它藻可能更有竞争生存能力。*A. tamarense* 对 NH<sub>4</sub>-N 有一定的适应性。总体上藻的生长率在 Urea-N 和 NO<sub>3</sub>-N 中相差不大, 大部分藻在混合氮源中的生长率低于 NO<sub>3</sub>-N 和 Urea-N 中, 但优于 NH<sub>4</sub>-N。

因此, 研究香港和珠江口海域富营养化、营养盐组成和形态等化学因子的状况和动态变化有助于了解本地区赤潮形成的时空规律。

4.2.3 生物因子 影响赤潮发生的生物作用主要包括藻间关系、藻与浮游动物间关系及藻种与细菌的关系等, 藻间相互作用主要表现在种间竞争, 如对环境的最佳适应, 还表现在有的藻如 *H. carterae* 能产生抑制或促进其它藻生长的物质<sup>[15]</sup>, 另外, 浮游动物、细菌与藻之间的相互作用控制赤潮藻数量的动态变化, 从而影响赤潮的形成。在特定水域特定环境条件下, 某

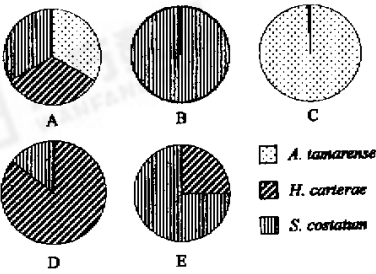


图 2 在不同温度、盐度和营养盐条件下, 22d 后 3 种典型赤潮藻群落的生态结构变化

Fig. 2 Structure change of three typical red tide species community at different temperature, salinity and nutrient conditions after 22 days

A: 起始, 3 种藻均为 500cells/ml. Initial, 500cells/ml for each species

B: 19℃, 30, +Si, N:P=25:1; C: 19℃, 30, -Si, N:P=5:1; D: 25℃, 10, +Si, N:P=25:1; E: 19℃, 10, +Si, N:P=25:1

些藻能迅速生长成为优势种而形成赤潮,因此,研究藻种间特别是赤潮生物间的竞争关系非常重要。本文研究了 3 种代表赤潮藻在不同温度(19℃、25℃),盐度(10、19、25、30、35)和几种营养盐(Si 浓度变化,N:P 比变化)条件下的竞争关系,图 2 显示了其中 5 个条件下,经过 22d 的实验,3 种藻数量比例的变化,反映了不同生态类型的赤潮藻在特定环境条件下的竞争关系。在低盐度时,*S. costatum* 和 *H. carterae* 一般分别在 19℃和 25℃生长占优势(图 2D,E),而在 Si 浓度下降或 N:P(原子数)比下降时,*A. tamarense* 有占优势的趋势(图 2A,C)。

4.2.4 气候因子 气候因子不仅能直接通过光照、温度对赤潮形成起作用,还能通过改变物理和化学过程而对赤潮的形成产生影响。如降雨能带来丰富的地表营养物质,降低盐度;除了合适的风向和风力能聚集赤潮生物,风也能促进水体混合,改变营养盐水平。大规模的气候异常变化如厄尔尼诺和拉尼娜对赤潮的形成的影响究竟如何还有待于进一步研究。

表 4 几种常见的赤潮藻种在 4 种氮源的生长情况  
Table 4 Several common red tide species and *I. galbana* used in the experiments

藻种 Species	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	Urea-N	Mixed N
甲藻 Dinoflagellate				
<i>Alexandrium tamarense</i> (ATHK)	++++	++	++++	+++
<i>Alexandrium tamarense</i> (HK9301)	++++	++	++++	+++
<i>Prorocentrum minimum</i>	++++	—	++++	+++
<i>Prorocentrum micans</i>	++++	—	++++	+++
硅藻 Diatom				
<i>Skeletonema costatum</i>	++++	—	+++	++++
<i>Ceratanlina pelagica</i>	++++	—	+++	+++
<i>Leptocylindrus minimus</i>	++++	—	+++	+++
针胞藻 Raphidophytes				
<i>Heterosigma carterae</i>	++++	++++	++++	++++
金藻 Chrysophcea				
<i>Isochrysis galbana</i>	++++	+	+++	++

4.2.5 粤港两地赤潮的相互关系 与香港毗邻的广东省也是赤潮的多发地之一,暨南大学齐雨藻教授及中国科学院南海所林永水教授的课题组对大鹏湾盐田的赤潮发生进行了长期的研究<sup>[8,25]</sup>。香港和广东海域的赤潮有密切联系,通过两地的赤潮事件和藻种比较发现,1980~1998 年间,南中国海发生的 67 次赤潮事件中有 24 次是两地同时发生的。16 次是夜光藻,另外 6 次是 *Gymnodinium*/*Gyrodinium*, 2 次是 *Prorocentrum sigmoides* 和 *Chattonella marina*<sup>[26]</sup>。1998 年 4 月香港特大赤潮,同样的藻种也在广东南部海域爆发赤潮,导致养殖鱼渔业损失上亿元人民币,但这次特大赤潮是源于香港,还是源于广东还不清楚。大鹏湾也就是香港的 Mirs Bay,是赤潮发生最频繁的地方,也是两地水域相接处,香港与广东沿岸赤潮的相互关系值得进一步调查及合作研究。

1998 年特大赤潮灾害发生后,香港政府组织了一个赤潮专家委员会,来协助制订香港地区的赤潮减轻及管理计划(RTMM, Red Tide Mitigation and Management),渔农处及环保署也加强了香港水域的常规监测活动。香港科技大学、香港大学及内地科研院校正在合作研究香港邻近水域的营养动力学,富营养化及其与赤潮的关系,本地赤潮藻种爆发赤潮的主要影响因子,与外来藻种的竞争关系以及利用卫星遥感技术与发展三维监视和预警系统的可行性及赤潮的预防治理措施等等,以期在不远的将来更好地掌握香港及珠江口海域赤潮发生的规律,并进而作出预警和提出可能的应付对策。

参考文献

[1] Morton B and Twentyman P R. The occurrence and toxicity of a red tide caused by *Noctiluca scintillans* (Macartney) Ehrenb. in the coastal waters of Hong Kong. *Environmental Research*, 1971, **4**:544~547.  
[2] Lam C W Y and Ho K C. Red tides in Tolo Harbour, Hong Kong. In: Okaichi T., Anderson D. M. & Nemoto T. eds. *Red Tide Biology, Environmental Science and Toxicology*. New York: Elsevier. 1989, 49~52.  
[3] Holmes PR and Lam CWY. Red Tide in Hong Kong Waters-response to a growing problem. *Asian Marine*

- Biology*, 1985, **2**:1~10.
- [4] AFD(Agriculture and Fishery Department of Hong Kong). *Marine Water Quality in Hong Kong in 1997*, Chapter 14, Red tides.
  - [5] Yin K, Tang V W Y, Qian PY, *et al.*. Spatial and temporal distribution of red tides in Hong Kong waters during 1983~1998 with GIS. *Abstracts of the 9<sup>th</sup> international Conference on Harmful Algal Blooms*, Tasmania, Australia. February 6~11, 2000. 69.
  - [6] Dickman M and Zhang F. Mid-ocean exchange of container vessel ballast water. 2: Effects of vessel type in the transport of diatom and dinoflagellate from Manzanillo, Mexico, to Hong Kong, China. *Marine Ecology Progress Series*. 1999, **176**:253~262.
  - [7] Lam C W Y, Kodama M, Chan D K O, *et al.* Paralytic shellfish toxicity in shellfish in Hong Kong. In: Okaichi T., Anderson D. M. & Nemoto T. eds. *Red tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*. New York: Elsevier. 1989. 455~458.
  - [8] Chan D K O, Young M L C. Occurrence of marine neurotoxins in seafood in Hong Kong. *1<sup>st</sup> conference on Harmful Algae Management and Mitigation*, 10~14 May, 1999, Subic Bay, Philippines. 1999. 8.
  - [9] Qi Y, Hong Y, Zheng L, *et al.* Dinoflagellate cysts from recent marine sediments of the south and east China seas. *Asian Marine Biology*, 1996, **13**: 87~103.
  - [10] Zhou M, Li J, Luckas B, *et al.* A recent shellfish toxin investigation in China. *Marine Pollution Bulletin*. 1999, **39**: 331~334.
  - [11] Lu S and Hodgkiss I J, Gambierdiscus toxicus, a Ciguatera Fish Poisoning Producing species found in Hong Kong waters. *1<sup>st</sup> conference on Harmful Algae Management and Mitigation*, 10~14 May, 1999, Subic Bay, Philippines. 1999. 22.
  - [12] Hodgkiss I J. Characteristics of red tide caused by *Alexandrium catenella* (Whedon and Kofoid) Balech in Hong Kong. *Mar. Biol.*, 1994, **3**:263~268.
  - [13] Dickman M D. Hong Kong's worst fish kill from a red tide (March-April, 1998). *Abstracts of the 9<sup>th</sup> International Conference on Harmful Algal Blooms*, February 6~11, 2000, Tasmania, Australia. 2000, 12.
  - [14] Zhang F and Dickman M D. Mid-Ocean exchange of container vessel ballast water. 1: Seasonal factors affecting the transport of harmful diatoms and dinoflagellates. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, **176**:243~251.
  - [15] Honjo T. Overview of bloom dynamics and physiological ecology of *Heterosigma akashiwo*. In: Smayda T. J. and Shimizu Y. eds. *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*, Amsterdam:Elsevier Scientific. 1993, 33~41.
  - [16] 郭玉洁. 大连湾赤潮生物——赤潮异弯藻. *海洋与湖沼*, 1994, **25**(2):165~167.
  - [17] Taylor F J R and Haigh R. The ecology of fish killing blooms of the chloromonad flagellate *Heterosigma* in the strait of Georgia and adjacent water. In: Smayda T. J. and Shimizu Y. eds. *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*, Amsterdam:Elsevier Scientific. 1993, 699~703.
  - [18] 邹景忠,董丽萍,秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. *海洋环境科学*, 1983, **2**(2):42~551.
  - [19] 李瑞香,夏 滨. 胶州湾的有毒甲藻——塔玛亚历山大藻和链状亚历山大藻,见:朱明远,李瑞香,王飞主编. *中国赤潮研究*. SCOR-IOC 赤潮工作组中国委员会第二次论文选. 北京:科学出版社, 1995. 36~41.
  - [20] Anderson D M, Kulis D M, Orphanos J A, *et al.* Distribution of the toxic red tide dinoflagellate *Gonyaulax tamarensis* in the southern New England region. *Estuar. Coast and Shelf Sci.*, 1982, **14**: 447~458.
  - [21] Hallegreaff G M, Bolch C J and Oshima Y. Species of the toxic dinoflagellate Genus *Alexandrium* in southeastern Australian Waters. *Botanica Marina*, 1991, **34**: 575~587.
  - [22] Wong P S and Wu R S S. Red tides in Hong Kong: problems and management strategy with special reference to the mariculture industry. *J. Shoreline Management*, 1987, **3**:1~21.
  - [23] Wong P S. The occurrence and distribution of red tide in Hong Kong——application in red tide management. In: Okaichi T, Anderson D M & Nemoto T eds. *Red tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*. New York: Elsevier. 1989, 125~128.
  - [24] Hodgkiss I J and Ho K C. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? *Hydrobiologia*, 1997, **352**:141~147.
  - [25] 林永水. 近海富营养化与赤潮研究. 北京:科学出版社, 1997.
  - [26] Hodgkiss I J, Lu S and Qi Y. The harmful algal blooms in Hong Kong waters- Where are they from? *Abstracts of the 9<sup>th</sup> international Conference on Harmful Algal Blooms*, February 6~11, 2000, Tasmania, Australia. 2000. 137.