

山东乳山近海海洋卡盾藻(*Chattonella marina*) 赤潮发展过程及其成因研究*

宋秀凯¹ 袁廷柱² 孙玉增¹ 石雅君³ 靳洋¹
白艳艳¹ 张利民¹

(1. 山东省海洋水产研究所 山东省海洋生态修复重点实验室 烟台 264006; 2. 山东省长岛县水产研究所 烟台 265800;
3. 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003)

提要 于 2008 年 8 月 10—28 日, 在山东乳山近海赤潮发生海域采用直接采水计数法对浮游植物种类组成进行了 4 次跟踪监测。结果表明, 此次赤潮主要由海洋卡盾藻引起, 面积约 100km², 平均密度 1.46×10^6 cells/L, 占浮游植物总数的 91.32%。从 8 月 19 日开始, 海洋卡盾藻赤潮开始消退, 同时中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻密度增高, 到 8 月 28 日本次赤潮完全消失。研究发现, 该海域富营养化、低盐度的理化环境和低光照、低气压的气象条件是此次赤潮发生的关键因子。海洋卡盾藻丰度与甲藻丰度、pH、化学需氧量、硝酸盐、无机氮和叶绿素 *a* 等呈显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.933、0.546、0.706、0.645、0.649 和 0.568, 而与盐度呈显著负相关($r = -0.707, P < 0.01$)。

关键词 海洋卡盾藻, 赤潮, 成因, 群落, 相关关系

中图分类号 Q178.1

海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)隶属于针胞藻纲(Chattonellales)、卡盾藻属(*Chattonella*), 是世界上危害最为严重的有害赤潮原因种之一, 已在埃及、日本、澳大利亚、印度、中国、美国和瑞典等国家发生过赤潮, 给当地养殖业造成巨大损失(齐雨藻等, 1994; Imai *et al.*, 1998; Tomas, 1998; Marshall *et al.*, 1999; Waite *et al.*, 2006; Mikhail, 2007; Jugnu *et al.*, 2009; 江兴龙等, 2010)。卡盾藻赤潮自 1991 年春在南海大鹏湾首次暴发以来, 先后在南海、黄海、渤海发生过(齐雨藻等, 1994; 娇晓阳等, 1996; 王朝晖等, 2006; 李涛等, 2005), 其中 1993 年和 1995 年发生在大连海域的海洋卡盾藻赤潮使中国蛤蜊和菲律宾蛤仔出现大量死亡, 以及人工放流的中国对虾的回捕量减少(娇晓阳等, 1996)。2003 年夏, 大亚湾东升养殖海域发生的海洋卡盾藻赤潮造成直接经济损失 33 万元(高利娟等, 2009)。本文报道 2008 年 8 月发生在山东乳山近

海海洋卡盾藻赤潮的发展过程及其成因, 初步探讨了赤潮消退过程中浮游植物群落演替过程及浮游植物种类和细胞丰度与理化因子的相关关系, 并对此次赤潮成因进行了探讨, 为卡盾藻赤潮防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 监测时间与地点

2008 年 8 月 15—28 日, 在山东乳山近海赤潮发生海域的 10 个站位, 进行四个航次浮游生物和水质调查, 调查站位见图 1。

1.2 样品采集和测定方法

样品的采集和分析均按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007a)和《海洋监测规范》(GB 17378-2007) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007b)

* 国家海洋公益性行业科研专项重点项目, 200805031 号; 国家科技支撑计划项目, 2009BADB7B02 号; 水生动物营养与饲料泰山学者岗位资助(2006—)。宋秀凯, 助理研究员, E-mail: xiukaisong@163.com

通讯作者: 张利民, 研究员, E-mail: zhanglimin@126.com

收稿日期: 2010-10-28, 收修改稿日期: 2011-01-10

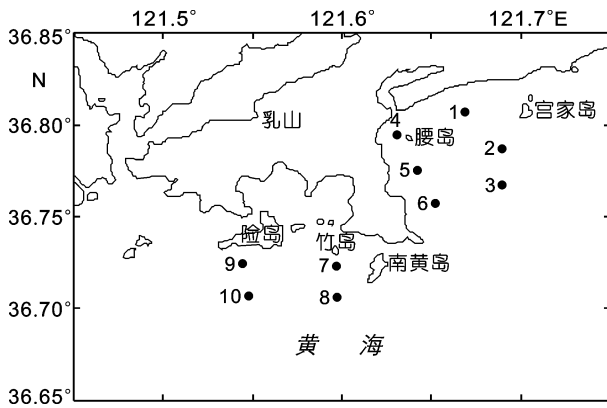


图1 调查站位
Fig.1 Sampling stations

进行。赤潮发生时,用5L采水器在距水表0.5m采集表层水样。浮游植物取水1L,加4%中性福尔马林固定,根据样品量浓缩至一定体积,取0.25ml在Olympus BX51显微镜下观察分析(样品采集后需2h之内送到实验室,开始鉴定时加固定液,并且每份浮游植物样品需在加固定液后1h内检测完毕,防止藻体死亡解体)。其中盐度使用SYC2-2型盐度计测定,pH使用PHS-3C精密pH计测定,硝酸盐采用锌镉还原法,亚硝酸盐采用盐酸萘乙二胺分光光度法,氨氮采用次溴酸盐氧化法,活性磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法检测,COD采用高锰酸钾法,叶绿素a采用UV-2102型紫外可见分光光度计法,无机氮为硝酸盐、亚硝酸盐和氨氮之和。

1.3 统计分析方法

对所获浮游植物和水质资料进行统计分析,各参数计算式如下。

Shannon-Weaver 多样性指数 H'

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$H'_{\max} = \log_2 S \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数 J

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

物种丰度 Margalef 指数 d_{Ma}

$$d_{Ma} = (S - 1) / \log_2 N \quad (4)$$

Berger-Parker 物种优势度 Y

$$Y = n_i / N \cdot f_i \quad (5)$$

式中, $P_i = n_i / N$, 为第 i 种在样品中的细胞丰度概率; S 为样品中的种类总数; N 为采集样品中所有物种的总个体数; n_i 为第 i 种的总个体数; f_i 为该种在各样品中出现的频率。

水质的营养指数 E

$$E = [\text{COD}] \times [\text{无机氮}] \times [\text{活性磷酸盐}] \times 10^6 / 4500 \quad (6)$$

式中,COD、无机氮、活性磷酸盐单位为 mg/L。

浮游植物丰度与环境因子相关性使用 SPSS11.5 计算。

2 结果与讨论

2.1 赤潮发生规模和赤潮种

2008年8月13日,乳山市近海北纬 $36^\circ 48'$, 东经 $121^\circ 42'$ 附近发生了局部赤潮,海水呈红褐色(图2a),赤潮面积大约 100km^2 。8月15日调查表明,主要赤潮生物为海洋卡盾藻(*C. marina*)(图2b)和海洋原甲藻(*P. micans*)(图2c),分别占细胞总数的91.32%和7.27%。其中海洋卡盾藻密度 $(1.46 \pm 1.06) \times 10^6$ cells/L,已达到赤潮密度 ($>3 \times 10^5$ cells/L),海洋原甲藻密度 $(1.14 \pm 0.42) \times 10^5$ cells/L,接近赤潮浓度 (3×10^5 cells/L)。

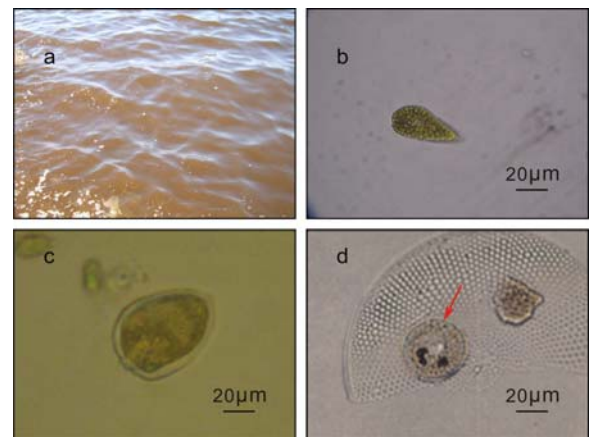


图2 水色、赤潮藻及孢囊照片

Fig.2 The images of water color, algae and cyst from the red tide

a. 赤潮发生海域水色呈红褐色; b. 海洋卡盾藻外观(藻体单细胞,黄褐色,长 $30\text{--}55\mu\text{m}$,宽约 $20\text{--}32\mu\text{m}$); c. 海洋原甲藻外观(细胞呈卵形、亚梨形。体长为 $42\text{--}70\mu\text{m}$,宽度为 $22\text{--}50\mu\text{m}$,顶刺长 $6\text{--}8\mu\text{m}$); d. 海洋卡盾藻孢囊(图中箭头所指为孢囊,附着在圆筛藻上,直径 $25\text{--}35\mu\text{m}$)

随着时间推移,海洋卡盾藻数量开始下降,赤潮面积不断缩小,以中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为主的硅藻开始大量繁殖,与海洋卡盾藻成为海区主要优势种(表1)。8月19日,仅在腰岛养殖区附近有小面积赤潮,面积约 20km^2 ,此时海洋卡盾藻数量降为 1.43×10^5 cells/L,占浮游植物总数的59.58%,硅

表 1 浮游植物优势种种类、丰度和优势度
Tab.1 The dominant phytoplankton species, abundance and dominant index

项目	监测日期			
	8月15日	8月19日	8月23日	8月28日
第一优势种	海洋卡盾藻	海洋卡盾藻	中肋骨条藻	中肋骨条藻
细胞丰度($\times 10^3$ cells/L)	1463.00	143.00	31.10	3.40
优势度	0.913	0.596	0.437	0.348
第二优势种	海洋原甲藻	中肋骨条藻	海洋卡盾藻	尖刺拟菱形藻
细胞丰度($\times 10^3$ cells/L)	116.40	43.55	5.32	2.24
优势度	0.073	0.182	0.075	0.229

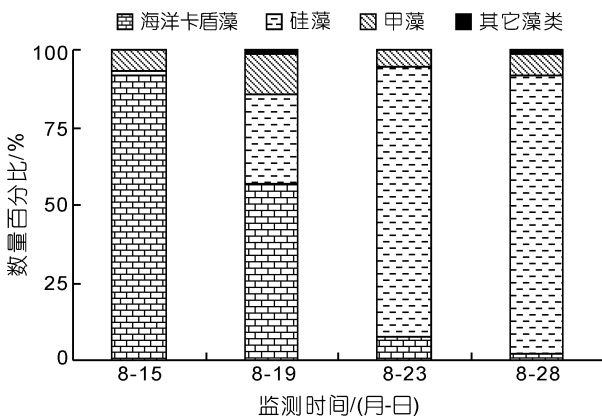


图 3 浮游植物不同群落数量百分比

Tab.3 The percentage of different phytoplankton species

藻数量平均 6.4×10^4 cells/L, 占细胞总数的 26.67%。2008 年 8 月 23 日, 中肋骨条藻取代海洋卡盾藻成为主要优势种, 此时海区中肋骨条藻平均数量 3.11×10^4 cells/L, 优势度 0.437, 海洋卡盾藻和甲藻分别占总

数的 7.47% 和 4.92% (图 3)。2008 年 8 月 28 日, 海洋卡盾藻数量进一步降低, 平均数量为 1.65×10^2 cells/L, 仅占细胞总数的 1.69%, 中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*) 成为主要优势种, 优势度分别为 0.348 和 0.229, 此次赤潮完全消退。

2.2 赤潮发生后海区环境因子变化

赤潮发生期间海区主要水质参数见表 2 所示。赤潮发生时海区无机氮(尤其是硝酸盐)含量明显偏高, 海区呈明显富营养化状态。磷酸盐、COD、叶绿素 *a* 含量均随赤潮衰退呈递减趋势, 盐度和 pH 变化则相反。

2.3 赤潮发生后浮游植物群落特征

浮游植物群落结构特征随赤潮盛衰变化明显, 由表 3 可以看出, Shannon-Weaver 多样性指数由赤潮时的最低值 0.452 缓慢升高, 8 月 28 日增至 2.409; 均匀度指数变化趋势与多样性指数相似, 由最初的最低值 0.195 逐渐升至 0.4 左右, 赤潮消退时则增加至 0.609, 浮游植物群落趋向于稳定; 丰富度指数同样随赤潮衰减呈缓慢增加趋势。

表 2 赤潮发生和消退期间海区水质监测结果
Tab.2 Water quality data during the occurrence and attenuation of the red tide

项目	监测日期			
	8月15日	8月19日	8月23日	8月28日
水温($^{\circ}\text{C}$)	26.4 \pm 0.15	26.2 \pm 0.17	26.8 \pm 0.17	27.0 \pm 0.19
盐度	26.718 \pm 0.16	28.220 \pm 1.03	29.718 \pm 0.22	30.166 \pm 0.09
pH 值	8.54 \pm 0.05	8.43 \pm 0.09	8.24 \pm 0.06	8.09 \pm 0.06
化学需氧量(mg/L)	4.98 \pm 1.14	1.95 \pm 0.46	1.68 \pm 0.54	1.29 \pm 0.15
磷酸盐($\mu\text{mol/L}$)	0.209 \pm 0.077	0.061 \pm 0.024	0.076 \pm 0.026	0.075 \pm 0.024
亚硝酸盐($\mu\text{mol/L}$)	0.625 \pm 0.086	0.071 \pm 0.065	0.132 \pm 0.039	0.073 \pm 0.032
硝酸盐($\mu\text{mol/L}$)	25.343 \pm 0.045	11.571 \pm 5.060	11.285 \pm 4.638	11.429 \pm 0.769
氨盐($\mu\text{mol/L}$)	ND	0.052 \pm 0.046	1.303 \pm 0.359	0.065 \pm 0.049
无机氮($\mu\text{mol/L}$)	25.97 \pm 0.08	11.70 \pm 5.01	12.72 \pm 4.55	11.57 \pm 0.75
叶绿素 <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	10.47 \pm 2.49	9.51 \pm 1.54	2.53 \pm 0.28	0.20 \pm 0.07
氮磷比	138.9 \pm 49.6	216.2 \pm 115.2	224.1 \pm 212.5	168.9 \pm 52.5
富营养化指数	2.74 \pm 1.82	0.087 \pm 0.044	0.082 \pm 0.036	0.006 \pm 0.003

注: 表中数值为海区平均值 \pm 标准差, $n=10$ 。ND 表示未检出

表 3 调查期间浮游植物群落结构变化特征
Tab.3 Changes in phytoplankton community structure during the survey period

项目	监测日期			
	8月15日	8月19日	8月23日	8月28日
海洋卡盾藻密度($\times 10^3$ cells/L)	1463 \pm 1057	143 \pm 112	5.32 \pm 1.02	0.165 \pm 0.10
硅藻密度($\times 10^3$ cells/L)	25 \pm 6.35	64 \pm 53	62.2 \pm 4.56	8.87 \pm 1.78
甲藻密度($\times 10^3$ cells/L)	114 \pm 42.10	33 \pm 16	3.5 \pm 0.84	0.74 \pm 0.41
总细胞密度($\times 10^3$ cells/L)	1602 \pm 1094	240 \pm 95	71.24 \pm 4.28	9.78 \pm 1.99
Shannon-Weaver 多样性指数	0.452 \pm 0.316	1.143 \pm 0.260	1.214 \pm 0.160	2.409 \pm 0.667
均匀度指数	0.195 \pm 0.136	0.492 \pm 0.112	0.405 \pm 0.053	0.609 \pm 0.166
丰富度指数	0.300 \pm 0.042	0.386 \pm 0.027	0.662 \pm 0.064	1.220 \pm 0.100

2.4 海洋卡盾藻赤潮成因分析

2.4.1 赤潮生物来源 海洋卡盾藻是一种沿岸性鞭毛藻类,在其生活史中有一段时期以孢囊形式存在,沉降在海底的沉积物中,经过一段时间的强制性休眠期后,遇到合适的理化环境可萌发形成游动细胞释放到水中。乳山近海地处北温带,冬季水温约 4—6℃,这为海洋卡盾藻孢囊强制性休眠提供了充分的低温条件。7—8 月份海区水温升高至 20℃以上,成熟的孢囊萌发并大量增殖,遇到合适条件极易形成赤潮。8月15日,作者从采集的底泥中检测到海洋卡盾藻孢囊,其主要附着在圆筛藻等个体较大的浮游植物表面,见图 2。

2.4.2 富营养化的物质基础 2008年6月下旬,山东青岛附近南黄海海域发生罕见的大规模浒苔绿潮,严重威胁到青岛奥帆赛会场(Liu *et al.*, 2009)。另外,据乳山市海洋渔业局介绍,乳山近海共打捞浒苔 6000 多 t,还有大约三分之一浒苔由于人员限制,清理不及时,大都沉在海底。随着温度升高,浒苔开始腐烂分解,释放出大量营养物质。据山东省海洋环境监测中心在 2008 年山东省奥帆赛周边海域水质监测项目中发现,2008 年 8 月上旬海区底层营养盐明显高于表层(宋秀凯等, 2011),为生活在沉积物中的海洋卡盾藻孢囊萌发及暴发增殖提供了必要的营养基础。2008 年 8 月 15 日,海区呈明显富营养化状态,为海洋卡盾藻大量繁殖提供必要营养条件。

2.4.3 适宜的理化环境因子 海洋卡盾藻最适温度和盐度条件分别为 25 和 25—30 (Nakamura *et al.*, 1983a),赤潮发生时,海区表层水温平均 26.4℃,盐度平均 26.72,这与海洋卡盾藻最适生长温盐条件相吻合,为海洋卡盾藻暴发繁殖提供最佳温盐条件。

营养盐含量及其比例是影响浮游植物生长和种群竞争的重要因素。一般认为,硅藻对 Si 和 N 的需

求较高,海洋卡盾藻同样对 N 需求较高, N 限制能明显抑制其生长(袁美玲等, 2008)。赤潮发生初期,作者监测发现,海区无机氮含量平均达 25.97 μ mol/L,其中硝酸盐含量平均高达 25.34 μ mol/L。大量营养盐特别是硝酸盐浓度增加是海洋卡盾藻赤潮形成的重要条件,这与齐雨藻等(1994)对 1991 年 3 月发生在南海大鹏湾的海洋卡盾藻赤潮成因分析结论相吻合。通过跟踪监测,2008 年 8 月 19 日,海区无机氮含量降为 11.70 μ mol/L,其中硝酸盐降为 11.57 μ mol/L,此时海洋卡盾藻平均密度由 1.46 $\times 10^6$ cells/L 降为 1.43 $\times 10^5$ cells/L。

2.4.4 适宜的气象条件 海洋卡盾藻生长繁殖与气象条件密不可分,其密度高峰一般都会处于低光照、低气压的气象条件,其细胞密度与光照强度和气压呈明显负相关(王朝晖等, 2006)。虽然海洋卡盾藻分裂速度较硅藻慢,但其对低光照条件具有较强的适应能力,光补偿点和光饱和点分别为 30 和 110 μ mol/(m²·s),在光强为 42—63 μ mol/(m²·s)时,能到最大生长速率的一半(Nakamura *et al.*, 1983a),并且在黑暗的条件下,卡盾藻也具有较强的营养吸收能力(Nakamura *et al.*, 1983b)。持续的阴雨天气和低光照强度抑制了小型硅藻的快速增长,反而促进了卡盾藻这种适应低光照条件的藻类成为优势种,同时低气压减少了水面扰动,促使卡盾藻大量聚集在表层。

2008 年 8 月 10—15 日,连续多天一直是阴雨天气,表层海水盐度(26 左右)明显下降,并且海水营养盐含量较高,呈富营养化状态,这就为海洋卡盾藻过量繁殖提供了最佳的气象条件。8月17日,当地出现暴雨、大风。8月18日,北风六级,天气晴朗,阳光普照,这就为小型硅藻繁殖提供了良好的光照条件。此外持续的大风天气,促进海水搅动,底层营养盐能到达表层,为浮游硅藻繁殖提供必要营养元素。8月

19日, 海区海洋卡盾藻数量大幅下降, 仅在腰岛养殖区附近海域有小范围赤潮外, 其他海区趋于正常。中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻开始大量繁殖, 取代海洋卡盾藻成为优势种, 海洋卡盾藻赤潮开始消退。8月28日, 海区海洋卡盾藻数量仅为 1.65×10^2 cells/L, 至此, 此次卡盾藻赤潮完全消失。

2.5 浮游植物丰度与环境因子相关关系

海洋环境是海洋生物赖以生存的基础, 浮游植物种类和数量分布都与海洋环境密不可分。通过 SPSS 软件, 分析了赤潮发生期、消退期间海洋卡盾藻、甲藻和硅藻丰度同温度、盐度、pH、营养盐、

叶绿素 *a* 等各理化因子相关关系(表 4), 发现海洋卡盾藻丰度与甲藻丰度、pH、化学需氧量、硝酸盐、无机氮和叶绿素 *a* 等呈显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.933、0.546、0.706、0.645、0.649 和 0.568, 而与盐度呈显著负相关($r = -0.707, P < 0.01$)。甲藻与海洋卡盾藻相似, 与化学需氧量、硝酸盐、无机氮和叶绿素 *a* 呈显著正相关($r = 0.776, 0.809, 0.812, 0.710, P < 0.01$), 也与盐度呈显著负相关($r = -0.819, P < 0.01$)。硅藻则明显区别于海洋卡盾藻和甲藻, 仅与温度和氮含量呈显著正相关($r = 0.716, 0.624, P < 0.01$); 与叶绿素 *a* 呈正相关($r = 0.375, P < 0.05$)。

表 4 浮游植物丰度与环因子相关关系

Tab.4 The correlation between the abundance of phytoplankton and environmental factors

项目	海洋卡盾藻丰度		硅藻丰度		甲藻丰度	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
海洋卡盾藻丰度	1.000	—	—	—	—	—
硅藻丰度	-0.143	0.450	1.000	—	—	—
甲藻丰度	0.933**	0.000	0.014	0.943	1.000	—
总细胞丰度	0.998**	0.000	-0.153	0.420	-0.341	0.095
水温	-0.190	0.316	0.716**	0.000	-0.150	0.429
盐度	-0.707**	0.000	0.079	0.676	-0.819**	0.000
pH 值	0.546**	0.002	0.231	0.220	0.438	0.067
化学需氧量	0.706**	0.000	-0.141	0.458	0.766**	0.000
磷酸盐	0.469	0.055	-0.040	0.832	0.513	0.062
亚硝酸盐	-0.324	0.121	-0.105	0.582	-0.128	0.434
硝酸盐	0.645**	0.000	0.199	0.292	0.809**	0.000
氨盐	-0.179	0.345	0.624**	0.005	-0.202	0.285
无机氮	0.649**	0.000	0.198	0.295	0.812**	0.000
叶绿素 <i>a</i>	0.568**	0.001	0.375*	0.041	0.710**	0.000
氮磷比	0.132	0.488	-0.010	0.958	0.164	0.386

注: *r* 为相关系数; *P* 为双尾 *t* 检验概率值; $n=40$; **表示相关置信度水平小于 0.01; *表示相关置信度水平小于 0.05; 其余没有明显相关性

3 结论

(1) 乳山近海赤潮的原因种是海洋卡盾藻, 由其引发的大规模赤潮在山东海域尚属首次记录, 此次赤潮具有局部性、来势猛、消失快等特点。

(2) 富营养化、低盐度的理化环境和低光照、低气压的气象条件是此次赤潮发生的关键因子。

(3) 赤潮发生及消退期间, 浮游植物群落经历了海洋卡盾藻-海洋原甲藻群落、海洋卡盾藻-中肋骨条藻群落、中肋骨条藻-尖刺拟菱形藻群落几个阶段的交替过程。

(4) 赤潮发生和消退期间, 海洋卡盾藻丰度与甲

藻丰度、pH、化学需氧量、硝酸盐、无机氮和叶绿素 *a* 等呈显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.933、0.546、0.706、0.645、0.649 和 0.568, 而与盐度呈显著负相关($r = -0.707, P < 0.01$)。

致谢 中国科学院烟台海岸带研究所刘东艳研究员对本论文写作给予指导, 山东省海洋环境监测中心刘义豪、孙珊、马元庆等同志协助采样和部分水质参数监测, 谨致谢忱。

参 考 文 献

王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳等, 2006. 大亚湾春季卡盾藻种群动

- 态及其赤潮成因分析. 水生生物学报, 30(4): 394—398
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007a. 海洋调查规范, 第 9 部分: 海洋生态调查指南. 北京: 海洋出版社, 1—20
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007b. 海洋监测规范, 第 4 部分: 海水分析. 北京: 海洋出版社, 1—123
- 齐雨藻, 洪英, 吕颂辉等, 1994. 南海大鹏湾海洋褐胞藻赤潮及其成因. 海洋与湖沼, 25(2): 132—137
- 江兴龙, 宋立荣, 2010. 泉州湾赤潮藻类优势种细胞密度回归方程研究. 海洋与湖沼, 41(3): 341—347
- 李涛, 刘胜, 黄良民等, 2005. 大亚湾一次赤潮生物期间浮游植物群落变化研究. 热带海洋学报, 24(3): 18—24
- 宋秀凯, 张秀珍, 刘爱英等, 2011. 浒苔过量繁殖后海区环境因子与浮游植物群落演替规律研究. 安全与环境学报, 11(2): 150—157
- 娇晓阳, 郭浩, 1996. 中国北黄海发生的两次海洋褐胞藻赤潮. 海洋环境科学, 15(3): 41—45
- 袁美玲, 王朝晖, 李友富, 2008. N、P 营养对海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 生长的影响. 生态学报, 28(1): 430—435
- 高利娟, 杨维东, 刘洁生等, 2009. 海洋卡盾藻的致毒机制研究进展. 海洋通报, 28(3): 99—105
- Imai I, Yamaguchi M, Watanabe M, 1998. Ecophysiology, life cycle, and bloom dynamics of *Chattonella* in the Seto Inland Sea, Japan. In: Anderson D M, Cembella A D, Hallegraeff G M ed. Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms. Berlin: Springer-Verlag, 95—112
- Jugnu R, Kripa V, 2009. Effect of *Chattonella marina* [(Subrahmanyam) Hara et Chihara 1982] bloom on the coastal fishery resources along Kerala coast, India. Indian Journal of Marine Sciences, 38(1): 77—88
- Liu Dongyan, Keesing J, Xing Qianguo *et al*, 2009. The world largest green-tide caused by *Porphyr*a aquaculture. Marine Pollution Bulletin, 58: 888—895
- Marshall J A, Hallegraeff G M, 1999. Comparative ecophysiology of the harmful alga *Chattonella marina* (Raphidophyceae) from South Australian and Japanese waters. Journal of Plankton Research, 21(10): 1809—1822
- Mikhail S K, 2007. First monospecific bloom of the harmful raphidophyte *Chattonella antique* (Hada) Ono in Alexandria waters related to water quality and copepod grazing. Chemistry and Ecology, 23(5): 393—407
- Nakamura Y, Watanabe M M, 1983a. Growth characteristics of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) Part 1: Effect of temperature, salinity, light intensity and pH on growth. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 39: 110—114
- Nakamura Y, Watanabe M M, 1983b. Nutrient and phosphate uptake kinetics of *Chattonella antique* in light/dark cycles. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 39: 167—170
- Tomas C R, 1998. Blooms of raphidophyceans in Florida coastal water. In: Reguera B, Blanco J, Fernandez M L *et al* ed. Harmful Algae. Spain: Xunta de Galicia and IOC of UNESCO, 93—96
- Waite A M, Lindahl O, 2006. Bloom and decline of the toxic flagellate *Chattonella marina* in a Swedish fjord. Marine Ecology Progress Series, 326: 77—83

THE CAUSES AND BLOOM PROCESS OF A RED TIDE SPECIES—*CHATTONELLA MARINA* IN THE COASTAL AREA OF RUSHAN, SHANDONG PROVINCE

SONG Xiu-Kai¹, YUAN Ting-Zhu², SUN Yu-Zeng¹, SHI Ya-Jun³, JIN Yang¹,
BAI Yan-Yan¹, ZHANG Li-Min¹

(1. Marine Fisheries Research Institute of Shandong, Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Yantai, 264006; 2. Changdao Aquaculture Research Institute, Yantai, 265800; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, 264003)

Abstract From August 10 to August 28, 2008, four surveys of phytoplankton were conducted in the coastal waters of Rushan, Shandong Province. The results showed that the red tide was caused by the bloom of *Chattonella marina*, the area was about 100 km² with an average cell concentration of 1.46×10⁶ cells/L, accounting for 91.32% of the total phytoplankton in the surveyed waters. From August 19, the abundance of *C. marina* began to decline, and the abundance of *Skeletonema costatum* and *Pseudo-nitzschia pungens* began to increase. The red tide attenuated completely on August 28. Eutrophication, low salinity, low light and favorable hydrometeorological conditions provided a good physical and chemical environment for the occurrence of red tide. The abundance of *C. marina* was positively correlated to dinoflagellate abundances, pH, COD, nitrates, inorganic nitrogen and chlorophyll *a* ($r = 0.933, 0.546, 0.706, 0.645, 0.649, 0.568, P < 0.01$), but negatively correlated to salinity ($r = -0.707, P < 0.01$).

Key words *Chattonella marina*, Red tide, Cause, Community, Correlativity