文章编号:1674-7054(2018)01-0001-11

夜光藻斑块分布与水环境因子的相关关系

綦世斌¹,覃超梅¹,黄少建²,钟 超¹,孙凯峰¹

(1.环境保护部华南环境科学研究所,广州 510535;2. 湛江市环境保护监测站,广东 湛江 524022)

摘 要: 针对 2016 年 4 月珠江口广海湾和镇海湾暴发的夜光藻(Noctiluca scintillans) 赤潮,分析了赤潮暴发 海域水质状况和浮游植物群落组成的变化,探讨了夜光藻斑块状分布与水环境因子及浮游植物群落组成之 间的相关关系。结果表明:调查海域营养状态(质量)指数均处于富营养化水平(E>1 NQI>3),且有毒污染 指数、水质综合指数和有机污染指数处于轻度到中等污染等级。夜光藻的细胞密度介于 0~29 444 inds • L⁻¹之间,且赤潮区硅藻和甲藻细胞密度显著增加,而绿藻、隐藻和蓝藻却显著降低,赤潮区、过渡区和非赤潮 区平均微藻种类数为 18 24 和 13。各调查站位水质因子聚类分析表明,河口区、港口码头区和水产养殖区均 出现了夜光藻赤潮,其分布呈现出明显的斑块化特征;水质因子主成分分析表明,夜光藻赤潮改变了水质因 子在主成分分组中的贡献率和相关系数;赤潮区水质因子的主成分旋转后载荷矩阵分布表明,第1主成分中 主要反映了夜光藻大量生长导致的营养盐(氨氮、总氮、磷酸盐、总磷)的消耗及悬浮物、生化需氧量等的增 加,第2主成分则反映了对重金属离子的选择性吸收。海水富营养化是夜光藻赤潮暴发的环境基础,且斑块 化分布的夜光藻显著改变了局部海域海水中浮游生物群落结构和理化因子的组成。 关键词: 夜光藻;赤潮;环境因子;浮游植物

中图分类号: X 824 文献标志码: A DOI: 10.15886/j. cnki. rdswxb. 2018.01.001

夜光藻(*Noctiluca scintillans*)隶属于甲藻门 Pyrrophyta 横裂甲藻纲 Dinophceae 环沟藻目 Gymnodiniales 夜光藻科 Noctiluceae 夜光藻属 *Noctiluca*。夜光藻细胞直径介于 150~2 000 μm 之间,肉眼可见,尤其是夜 晚会发出蓝色的光。由于其既有植物的属性又兼具动物的部分功能,因此,其区系分类包括红色的异养 型种类和绿色的兼养型种类^[1-2]。近 20 年来,夜光藻是世界范围内广泛存在的重要赤潮生物,因此受到 国际社会的广泛关注^[3-10]。如印度东海岸、土耳其达达尼尔海峡、西班牙、沙特阿拉伯、德国湾(北海)、 印度尼西亚、韩国、日本沿海等。我国的四大海域的夜光藻赤潮也有大量报道,夜光藻引发的赤潮在我国 南北方海域以及海水养殖区频繁发生,其暴发频次可达到赤潮总数的 50% 左右^[11-15]。传统的观点认为, 夜光藻本身不具有毒性,其主要危害在于大量暴发繁殖的夜光藻严重破坏原有的海洋生态平衡,给近海 水产养殖业和滨海旅游观光业造成不利影响,进而造成严重的经济损失^[11,13,15]。然而,也有研究者从食 物链层面揭示了夜光藻捕食有毒鳍藻(*Dinophysis* sp.)和拟菱形藻属(*Pseudo-nitzschia* sp.)后,其食物泡中 存在的有毒藻类会随着夜光藻的被捕食而进入更高营养级生物体内^[5]。综合现有的文献资料,夜光藻赤 潮的发生与营养盐浓度之间存在较强的相关性,尤其是在营养盐丰富的海域,其暴发频次显著增加。因 此,研究赤潮暴发规律,探索赤潮生物生长繁殖与环境因子的相关关系,从而预测、预报赤潮的发生,一直 是赤潮研究的热点问题^[3,6,15-16]。然而,不同海区、不同的环境条件下,赤潮种类和规模各不相同,已有的

收稿日期: 2017 - 05 - 14 修回日期: 2017 - 07 - 27

基金项目:国家自然科学基金项目(21307140,41476099);中央级公益性科研院所基本科研项目(PM-zx703-201602-043,PM-zx021-201312-036,PM-zx097-201602-045)

作者简介: 綦世斌(1982 –), 男, 工程师. 研究方向:近岸海域海洋环境质量变化和海洋环境污染状况评价. Email: qishibin@ scies. org

通信作者: 孙凯峰(1983 –), 男 副研究员. 研究方向: 近岸海域典型生态系统演替与环境质量状况的响应关系. E-mail:sunkaifeng@ scies. org

研究表明 赤潮暴发是海域存在的赤潮生物在适宜的物理、化学和气象水文等环境条件共同作用下形成 的。赤潮暴发海域 水体的物理、化学指标,如 DO、透明度、盐度、pH、Chl-a、BOD₅、COD、营养盐等与非赤 潮发生区域会发生明显的变化^[10-11,17]。另外 夜光藻细胞前段长有 1 条长触手且基部有 1 条鞭毛,该结 构被认为是其捕食小型有机生物的主要器官。细胞有明显的口腔,且在细胞内有食物泡形成,这也是夜 光藻异养生活的典型特征^[1,3,5]。夜光藻的异养特性间接导致其赤潮暴发过程对海区浮游植物的种类组 成和密度带来的潜在影响。尽管存在空间和局部环境因子的差别,然而综合南海海域夜光藻发生次数、 频率、危害等指标,夜光藻赤潮在我国仍是需要重点关注的赤潮现象之一。2016-04-08,江门市近岸海 域出现夜光藻零星分布,本次调查采样时间为2016-04-10—2016-04-12,调查海域的夜光藻赤潮在 2016-04-15 消退。根据2016 年《广东省海洋环境质量公报》中的监测结果 2016 年 4 月,夜光藻先后 在深圳市大鹏湾、珠海市东澳湾、江门市近岸海域、汕头市南澳岛、湛江市西南沿海等海域暴发赤潮。从 大尺度时空分布上看,本次夜光藻赤潮呈现了斑块化的分布特征。笔者根据江门市近岸海域海水理化因 子和夜光藻密度的监测数据,采用聚类分析、主成分分析等统计学方法在众多环境、生物数据中筛选出夜 光藻赤潮发生对生态系统健康影响的主要因素,探索局部范围内的夜光藻赤潮斑块状分布与环境理化因 子、生物群落间的变化规律,为建立本海区夜光藻赤潮预测、预报机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设 2016 – 04 – 10 在江门市近岸海域共布设 10 个监测站位,详见图 1。从现场采样来看, S2 S3 S5 站位海水中能明显见到夜光藻;S4 S6 S7 S9 站位夜光藻集聚成片;其余站位未采集到夜光藻。 1.2 调查内容及采样分析方法 水质样品和浮游植物样品的采集、保存、分析以及质量控制均按《海洋监 测规范》(GB 17378.7 – 2007)进行。水样分别采集表层和底层后混合,浮游植物样品采用垂直底层拖网。水 质调查指标包括:盐度、pH、溶解氧、悬浮物、化学需氧量(COD_{Mn})、生物需氧量(BOD₅)、活性磷酸盐、总磷、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、无机氮、总氮、叶绿素、石油类、金属类(汞、镉、铅、镉、铬、镍、铜、锌), 共 23 项。



Fig.1 Distribution of sampling sites in Jiangmen city, Guangdong Province

1.3 数据处理与分析 水质状况评价分级分别采用以下评价体系进行分析 各评价体系分级情况见表 1。

(1)单因子污染指数^[18]: $S_i = C_i / Cs_i$,对石油类污染进行评价;

(2) 有机污染指数^[19]: $A_{fan} = COD_i / COD_0 + DIN_i / DIN_0 + DIP_i / DIP_0 - DO_i / DO_0$,其中前者为相应指标的实测值,后者为对应指标的二类海水水质标准(GB)。

(3) 有毒污染指数^[18]: A_{fa} = ($Cu_i/Cu_0 + Pb_i/Pb_0 + Zni/Zn_0 + Cd_i/Cd_0$) /4

(4) 富营养化水平评价方法^[19-20]:

营养状态指数 E = (COD * DIN * DIP * 10⁶) /4500; E≥1 时,水体成富营养化状态。

营养状态质量指数 $NQI = COD_i/COD_0 + DIN_i/DIN_0 + DIP_i/DIP_0 + Chl. a_i/Chl. a_0$,其中前者为相应 指标的实测值 后者为对应指标的二类海水水质标准(GB 3097 – 1997)。

(5) 水质综合评价指数^[18]: $A_{sch} = A_{fn} + A_{Tah} + A_{fab}$

采样站位 23 项水质因子的聚类分析和主成分分析均采用 SPSS13.0 进行。聚类分析按照系统聚类 (Hierarchical cluster analysis)的最邻近元素(Nearest neighbor)和 Pearson 相关性进行。

...

lab. 1 Nu	trient status and	standard of wa	ter quality according	g to different asse	essment indexes	
A _{石油}	<1.0 水质清洁	1.0~2.0 水质一般	2.0~3.0 开始受到污染	3.0~4.0 中等污染	>4.0 重污染	
A _{有机}	<0 良好	0~1 较好	1.0~2.0 开始受到污染	2.0~3.0 轻微污染	3.0~4.0 中等污染	>4.0 重污染
A _{有毒}		<0.4 未受污染	0.4~1.0 轻污染	1.0~2.0 中等污染	>2.0 重污染	
营养状态指数 <i>E</i> (Trophic status index)		<1 贫营养		>1 富营养		
营养状态质量指数 NQI (Nutritional quality index)		<2 贫营养		2~3 中营养		>3 富营养
水质综合指数 A _{综合} (Water comprehensive pollution index)		<1.0 清洁	1.0~2.0 微污染	2.0~7.0 轻污染	7.0~9.0 重污染	>9.0 严重污染

表1 水质污染状况分级标准

2 结果与分析

2.1 夜光藻细胞丰度和空间分布特征 本次调查 结果表明,各站位夜光藻细胞密度介于0~29444 inds•L⁻¹之间(图2),藻细胞以红色的异养型种类 为主^[1]。根据各站位夜光藻的密度情况将S1S8, S10定义为非赤潮区;S5S2S3定义为赤潮过渡区; S4S7S6S9定义为赤潮暴发区,夜光藻在调查海 域呈现出了斑块状的分布特征。类似的斑块状分布 在其他研究中也有报道,如天津近岸海域3个监测



站位的夜光藻赤潮期细胞密度介于 20~2 700 inds • L⁻¹之间 然而 在相邻的监测站位上未监测到夜光藻的 存在^[16]。土耳其达达尼尔海峡夜光藻赤潮最大细胞密度达到 220 000 inds • L⁻¹,且表层分布呈斑块状。夜 光藻的垂直分布呈现从表层、次表层向底层迅速降低的趋势。表层以下 10 m 深度内夜光藻细胞数目呈快速 降低的趋势 而 80 m 深度断面未检测到夜光藻^[4]。

2.2 夜光藻赤潮与水质因子响应分析 夜光藻细胞密度在春季往往达到最高值,因此,水温被认为是影响 夜光藻季节性变化的主要因素^[1,4,10]。本次调查中各站位的水温变化范围在23.2~26.1℃之间,盐度范 围为5.6%~16.9‰,温度变化范围较小且处于夜光藻适宜生长的范围内,因此,水温并非该海域夜光藻 赤潮的斑块化分布的主要影响因素。依据有机污染指数、有毒污染指数、营养状态(质量)指数、水质综合 指数等多项指标,尽管存在某些特定指标的严重超标,本次调查海域水质状况总体处于轻度至中度污染 状况,但呈显著的富营养化状态。对比国内外夜光藻赤潮暴发的监测结果,营养盐含量超标甚至是富营 养状态是夜光藻赤潮暴发的重要前提和基础^[3-4,10,12]。

根据 23 项水质因子聚类分析的结果可将调查站位总体分为 3 个主要类群(图 3)。其中 S6 S10 S9 站位水质状况相似 其余站位水质状况相似。从站位的空间分布上看,处于感潮河上游的 S1 S2 和河口 区的 S8 S7 水质因子处于同一个类群,可以判定该类群的水质主要受河流输入的影响。另外,空间上相

邻的 S9 和 S10 处于相同的类群,该海域主要影响因素为近岸生活污水和码头的影响,同一类群的还有 S6 站位;而 S5 S4 和 S3 站位处于相同的水质类群则主要受海域水产养殖业的影响。夜光藻赤潮在3 个水质 类群中均有发生的现状也进一步印证了该海域的富营养化状况是夜光藻赤潮的主要原因。夜光藻在渤 海、长江口、南海、南海北部等海域的广泛暴发已有报道,上述海域的海水水质呈不同程度的富营养化状况,这一现象也反映出夜光藻对环境因子具有较强的适应性^[13-14,16,21]。

	A _{石油}	$A_{ extsf{fn}}$	A _{有毒}	营养状态指数 (Trophic status index)	营养状态质量指数 (Nutritional quality index)	水质综合指数 (Water comprehensive pollution index)
S1	0.09	3.40	0.32	4.90	5.77	3.81
S2	0.11	3.81	0.38	4.14	5.26	4.30
S3	0.07	2.12	0.44	2.86	8.18	2.63
S4	0.10	2.55	0.53	3.32	4.58	3.19
S5	0.10	3.58	0.45	4.63	7.39	4.14
S6	0.03	2.79	0.58	2.05	6.77	3.39
S7	0.04	3.21	0.42	1.23	4.88	3.67
S8	0.05	4.83	0.77	7.79	6.66	5.65
S9	0.10	2.55	0.47	1.69	4.26	3.11
S10	0.06	2.97	0.57	2.92	10.28	3.60

表2 各站位水质状况评价

Tab. 2 Nutrient status and standard of water quality at different sample stations

夜光藻赤潮与水质因子之间的相关关系结果表明,水质因子(温度、氮、磷等)不仅是夜光藻赤潮暴发的必要条件,同时也受夜光藻赤潮的影响。通过对本次调查的非赤潮区、过渡区和赤潮区水质因子的主成分分析可以看出,非赤潮区和赤潮过渡区的水质因子均可归纳为2个主成分分组,赤潮区的水质因子 归纳为3个主成分分组(表3)。



Fig.3 Cluster analysis of water factors among different sampling stations

通过对比可见,在非赤潮区,与主成分1极其相关的因子为悬浮物、亚硝酸盐、氨氮、砷和铬,显著相 关的因子为无机氮、锌、镉和叶绿素;与主成分2极其相关的因子是盐度、pH、硝酸盐、总氮、石油类和铜, 显著相关因子为镍。在过渡区,与主成分1极其相关的因子为盐度、pH、溶解氧、高锰酸钾指数、生化需氧 量、亚硝酸盐、氨氮、总氮、活性磷酸盐、砷、铅和叶绿素,显著相关的因子为总磷和石油类;与主成分2极 其相关的因子是悬浮物、硝酸盐、汞、锌、镍和铬,显著相关因子为镉。在赤潮区,与主成分1极其相关的 因子为高锰酸钾指数、生化需氧量、亚硝酸盐和铬,显著相关的因子为 pH、悬浮物、无机氮、总氮;与主成 分2极其相关的因子是汞、砷和镉,显著相关因子为铜;与主成分3显著相关的因子为盐度、叶绿素(表 4)。从水质因子在非赤潮区、过渡区以及赤潮区的分类情况看,非赤潮区水质因子综合反映了该区域氮 营养盐含量较高、典型种类重金属广泛分布以及浮游植物密度较高的情况。赤潮过渡区的水质因子除无 机氮和铜表现出较显著的主成分相关,这一变化与非赤潮区相比证明了过渡区夜光藻的存在对水质因子 产生了较明显的改变。过渡区与赤潮区的水质主成分因子变化可以推测,赤潮区藻细胞对磷酸盐、溶解 氧、硝酸盐、氨氮具有显著的影响。另外,赤潮区与非赤潮区主成分因子对比可以看出,夜光藻赤潮发生 显著增加了悬浮物和高锰酸钾指数与水体环境之间的相关性;夜光藻大量生长也显著影响了砷、锌、镉、 叶绿素与水体环境之间的相关性,这一现象可能受夜光藻对金属离子的吸附以及对其他浮游植物的摄食 或抑制等影响。目前,我国已报道的夜光藻赤潮均为异养型,然而,夜光藻赤潮阶段水体营养盐的含量和 分布情况调查在不同文献资料中存在差别^[3-4,6]。这一现象不仅与赤潮海域的水文动力学因素有关,而 且与夜光藻赤潮所处阶段有关^[21]。

	成分		初始特征值 Initial Eigenvalue	es	Extractio	提取平方和载ノ n Sums of Square	A d Loadings
	Component	合计 Total	方差% % of variance	累积% Cumulative %	合计 Total	方差% % of variance	累积% Cumulative %
非赤潮区	1	12.23	53.16	53.16	12.23	53.16	53.16
Non-bloom area	2	10.77	46.84	100.00	10.77	46.84	100.00
过渡区	1	14.27	62.02	62.02	14.27	62.02	62.02
Transition area	2	8.73	37.98	100.00	8.73	37.98	100.00
十油豆	1	10.36	45.06	45.06	10.36	45.06	45.06
示潮区	2	7.41	32.21	77.27	7.41	32.21	77.27
Bloom area	3	5.23	22.73	100.00	5.23	22.73	100.00

表る	水质因于旳土成分分析尽力差解析	

Tah 3	Total	variance	explained i	n Princi	nal Comn	onent Analy	vsis of	water	utileum	facto
rap. 5	rotai	variance	explained 1	II I IIIICI	par comp	onent Analy	15 01	water	quanty	lacio

从水质因子在非赤潮区、过渡区以及赤潮区的主成分旋转后载荷矩阵分布情况(图4)可见,水质因子 在3个区域的主成分向量载荷上具有显著差别。非赤潮区水质因子的主成分载荷主要在第1和第4象 限,汞、镉、铜、叶绿素、溶解氧、活性磷酸盐、总磷在第2和第3象限且对水质具有显著的影响。过渡区的 水质因子主成分载荷在4个象限中分布较均匀 除砷、铅之外其余金属离子均对水质表现出显著影响。想 浮物、硝酸盐、无机氮也表现出显著影响。与非赤潮区相比,过渡区悬浮物贡献值增加显著,总磷、活性磷 酸盐贡献值降低,这一现象也与过渡区夜光藻数目增加导致的磷酸盐快速吸收有关。赤潮区水质因子的 溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、悬浮物、无机氮、总磷、金属(汞、砷、锌、镉、铜、镍、铬)、叶绿素均表现 出显著影响。其中,溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、悬浮物向量载荷的增加与夜光藻的大量生长有 关,营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、总氮、磷酸盐)的向量载荷降低也与夜光藻的大量吸收有关。

2.3 夜光藻赤潮与浮游植物群落组成的响应分析 本次调查中各站位除夜光藻之外的浮游植物组成和 细胞密度见表 5。各站位浮游植物细胞密度介于 1 500~89 700 cells • L⁻¹之间 物种数目介于 13~28 种之间。除夜光藻之外,浮游植物平均密度在赤潮暴发区(S4 S6 S9 S7)显著高于过渡区,而非赤潮区平均 密度最低。浮游植物的群落组成上,赤潮暴发区平均物种数目为 18 种,高于非赤潮区的 13 种,但低于过 渡区的 24 种。从浮游植物的分类上看,夜光藻赤潮暴发区硅藻门和甲藻门种类浮游植物平均细胞密度 显著增加,分别为过渡区硅藻门和甲藻门浮游植物细胞密度的 1.79 倍和 9.39 倍 相对非赤潮区域硅藻门和甲藻门浮游植物细胞密度则增加到 34.21 倍和 61.89 倍。相反的 绿藻门、隐藻门和蓝藻门的浮游植物 平均数目则在赤潮暴发区显著降低。夜光藻对微藻的摄食研究结果表明,夜光藻能够捕食得粒径大小范围介于细菌和微型浮游动物之间^[22-25]。因此,浮游植物群落的变化也反映了夜光藻赤潮对生态系统群 落组成和结构的干扰。本次调查中,赤潮暴发区绿藻、蓝藻和隐藻等微型浮游植物丰度和物种数呈显著 降低的现象在其他研究中也得到证实^[26]。达达尼尔海峡夜光藻赤潮暴发期间,微型浮游植物和微微型浮 游植物的丰度呈显著降低的趋势^[4]。科钦市西南海岸夜光藻赤潮期间,夜光藻和其他 14 属的硅藻分别 占总浮游植物生物量的 56.2% 和 43.8%。浮游植物物种数目和多样性均呈显著地降低趋势^[27]。

		-	-		-		
	非赤潮区 No	n bloom area	过渡区 Tra	nsition area	赤	朝区 Bloom ar	rea
	成分 Co	mponent	成分 Co	mponent	Б.	な分 Componer	t
	1	2	1	2	1	2	3
盐度 Sal.	-0.37	0.93	1.00	-0.01	0.20	0.57	-0.80
pН	-0.14	0.99	1.00	0.05	-0.84	-0.16	0.52
溶解氧 DO	-0.77	0.64	0.92	-0.39	-0.65	0.55	-0.52
高锰酸盐指数 COD	0.71	0.71	-1.00	-0.05	0.94	0.23	0.26
生化需氧量 BOD	0.63	0.78	-1.00	-0.08	0.97	0.17	0.16
悬浮物 SS	0.98	0.20	-0.09	1.00	0.83	-0.35	0.43
亚硝酸盐 NO ₂ -	0.99	0.13	-1.00	0.07	0.91	0.35	-0.24
硝酸盐 NO3 ⁻	0.43	0.90	-0.12	0.99	0.63	0.68	-0.38
氨氮 NH4 ⁺	0.98	-0.18	-0.95	-0.32	-0.22	-0.59	0.78
无机氮 DIN	0.87	0.50	-0.64	0.77	0.86	0.43	0.27
总氮 TN	-0.01	1.00	-0.94	0.35	-0.87	0.14	0.47
活性磷酸盐 PO43-	0.65	-0.76	0.99	0.12	-0.78	-0.62	-0.07
总磷 TP	0.80	-0.61	0.80	0.60	-0.56	-0.23	-0.80
石油类 Oil	-0.35	-0.94	-0.83	0.56	-0.52	-0.34	-0.78
汞 Hg	0.63	-0.78	0.39	-0.92	0.36	-0.93	-0.12
砷 As	0.99	-0.13	0.99	-0.13	0.37	-0.90	-0.24
锌 Zn	0.83	0.57	0.05	1.00	0.70	-0.72	0.02
镉 Cd	-0.87	0.49	0.58	0.81	-0.24	0.95	-0.18
铅 Pb	0.80	0.60	0.99	0.13	-0.78	-0.61	0.16
铜 Cu	-0.42	0.91	-0.64	-0.77	-0.34	0.82	0.46
镍 Ni	0.48	0.88	0.21	0.98	-0.47	0.74	0.48
总铬 Cr	-0.98	-0.18	0.37	0.93	0.92	-0.23	0.32
叶绿素 Chl.	-0.86	0.52	0.92	-0.39	-0.35	0.38	0.86



Tab. 4 Component matrix of water quality factors using PCA



图 4 非赤潮区(a)、过渡区(b)以及赤潮区(c)水质因子主成分旋转后载荷矩阵 Fig.4 Component plot in rotated space of principal analysis on water factors in the non-bloom area(a), transition area(b) and bloom area(c)

	Tab. 5 Species and cell densiti	ies (cells •	L ⁻¹) of phy	toplankton	(except N.	scintillans)	at the samp	ling stations			
	物种名 Species	$\mathbf{S1}$	S5	S8	$\mathbf{S10}$	2	$\mathbf{S6}$	8	S2	$\mathbf{S3}$	S7
	尖刺拟菱形藻 Pseudo-nitzschia pungens		7938	217		1967	2000	161	375	5438	433
	萎软几内亚藻 Guinardia flaccida (castracane) Peragallo	125	2313	506		1999	3688	6251	500	788	20746
	圆柱角毛藻 Chaetocerosteres		5563	181		1047	1625	548	813	2850	813
	丹麦细柱藻 Leptocylindrus danicus		2063			539	3188	1128	313	1838	17658
	角状弯角藻 Eucampiacornuta		4938				750	193		3450	
	双菱藻 Surirella sp.								313	75	
	骨条藻 Skeletonema sp.		625						625	488	
	舟形藻 Navicula sp.		125							113	
	角毛藻 Chaetoceros sp.		375	361		413	750	226	625	563	325
	浮动弯角藻 Eucampia zoodiacus		625	108		1587	2750	5961		488	3575
	圆筛藻 Coscinodiscus sp.	63	438			95	250			150	
	长海毛藻 Thalassiothrix longissima		125					2		300	
	脆指管藻 Dactyliosolen fragilissima		1000	289	140	127		129	313	338	29250
	长菱形藻 Nitzschia longissima							129		38	163
	洛氏角毛藻 Chaetoceros lorenzianus		1375		120	1682	4000	2062		675	4225
铒	柔弱拟菱形藻 Pseudo-nitzschia de licatissima			36						113	
뺐	美丽曲舟藻 Pieurosigma formosum		250			508				75	
Ü	中心圆筛藻 Coscinodiscus centralis		125			95	188	32		38	
	菱形海线藻 Thalassionema nitzschioides		63					76		113	
	海洋曲舟藻 Pleurosigma pelagicum		125			159				113	
	中肋骨条藻 Skeletonema costatum					159			625		
	颗粒直链藻 Melosira granulata		438	217	120	190	688		938	225	596
	曲売藻 Achnanthes sp.								313		
	布氏双尾藻 Ditylum brightwelii		250			32	563	76			488
	根管藻 Rhizosolenia sp.		63								
	蜂腰双壁藻 Diploneis bombus						125				
	哈氏半盘藻 Hemidiscus hardmannianus		250				188				
	脆杆藻 Fragilaria sp.			181							
	嗜盐舟形藻 Navicula halophila	31			20						
	篦形短缝藻 Eunotia factinalis				20						
	扁圆卵形藻 Cocconeis placentula				20						
	楔形藻 Licmophora sp.			36							
	单点条纹藻 Striatella unipunctata		125			127	250			38	163

各调查站位浮游植物(除夜光藻外)物种组成和细胞密度($\operatorname{cells} \cdot \mathrm{L}^{-1}$)

表5

7

			续表 5 Co	ntinued tab.	5						
	物种名 Species	S1	S5	S8	S10	S4	S6	S9	S2	S3	S7
	针形纤维藻 Ankistrodesmus acicularis		63	108		127	375		188	38	
	衣藻 Chlamydomonas sp.	31									
	三角四角藻 Tetraedrontrigonum				20						
	纺锤藻 Elakatothrix sp.				40						
联	小球藻 Chlorella sp.	94			80						
泛	小形月牙藻 Selenastrum Minutum				20						
ŗ	凹顶鼓藻 Euastrum ansutum				40						433
	十字柱形鼓藻 Penium Cruciferum				40						
	卯囊藻 Oocystis sp.	125		144	160						
	小新月藻 Closterium venus	94		253					375		
	梅尼小环藻 Cyclotella meneghiniana	63	375	144			188	64	438	113	
	透明原多甲藻 Potroperidiniumpellucidum									75	
	叉状角藻 Geratiunfurca										163
甲营	拟多甲藻 Peridiniopsis Lemmermann	63		72				64	125		
迷门	海洋原甲藻 Prorocentrum micans		63			32				38	163
	甲藻孢囊 Dinoflagellate resting cysts										3358
	血红哈卡藻 Akashiwo sanguinea		438				188			150	7150
隐藻门	尖尾蓝隐藻 Chroomonas acuta	94	125	217	100	95	375		500	113	
	束丝藻 Aphanizomenon sp.			72					125		
揂 莈	巨颤藻 Oscillatoria princeps	94		722	360						
κГ	伪鱼腥藻 Pseudanabaena sp.	125		542	200						
	色球藻 Chroococcus sp.	188		144							

3 讨 论

3.1 夜光藻斑块状分布与水环境质量状况密切相关 珠江口所在的南海近岸海域水质的富营养化和轻度污染状况是导致夜光藻赤潮暴发的首要前提和基础。根据 2016 年《广东省海洋环境质量公报》的监测数据 2016 年 4 月 深圳大鹏湾和大亚湾以及珠海、汕头等海域也先后观测到明显的夜光藻赤潮。结合本次调查,可见 2016 - 04 的夜光藻赤潮不仅局限于调查海域,大亚湾一虎门一珠海一广海湾之间近 300 km 的近岸海域也观测到了夜光藻的斑块化分布现象。王雨等的研究也证实了南海北部大尺度海区空间上 夜光藻斑块化分布的现象,其丰度变化范围介于 0 ~ 645 inds • L⁻¹之间,春季夜光藻细胞密度高值区(100 inds • L⁻¹)在粤西近岸临近万山群岛西侧,粤东汕头近岸存在次高值区;广西西部近岸也有较高密度的夜 光藻被检出,而珠江口近邻海域、粤东大鹏湾、雷州半岛东部近岸细胞密度保持 10 ~ 25 inds • L⁻¹的水平 空间格局总体呈现近岸高于远海的趋势^[17]。本次调查结果也显示, 夜光藻赤潮在河口区、码头港口区和 水产养殖区 3 个水质类群的局部海域中也发生了赤潮,因此,可以推测夜光藻在大空间尺度(大亚湾一广 海湾)和局部小空间尺度上(广海湾)的斑块化分布特征不仅与生物因子(饵料密度、小颗粒有机物含量) 有关,而且受海域的水质理化因子的影响。

3.2 夜光藻赤潮对局部海域水质因子存在显著影响 本次调查海域的水质因子在非赤潮区、过渡区和赤潮区存在显著差别。夜光藻赤潮发生显著增加了悬浮物含量和高锰酸钾指数与主成分之间的相关性;同时也显著影响了砷、锌、镉、叶绿素与主成分之间的相关性,揭示了夜光藻对金属离子的吸附以及对其他浮游植物的抑制现象。夜光藻赤潮前期的细胞数目累计过程,其细胞密度的快速增加导致了溶解态或小颗粒态营养盐的快速降低。进入高细胞密度的扩散期,由于部分细胞的老化及死亡,夜光藻的细胞内含物(营养盐、有机物等)会随着细胞破裂而释放进入海水中,间接导致了水体中营养盐含量的波动^[5,10]。赤潮暴发区水质因子的主成分旋转后载荷矩阵分布揭示了夜光藻暴发引起的高锰酸盐指数、生化需氧量、悬浮物等指标的升高,以及营养盐(氨氮、总氮、磷酸盐、总磷)的显著降低。赤潮暴发区营养盐含量的降低主要是受夜光藻赤潮快速增长过程的吸收影响,金属离子的向量载荷普遍增加,仅铅离子表现出了降低的现象,其原因可能是夜光藻细胞破裂后的释放或藻细胞对金属离子的选择性吸附能力差异。

3.3 夜光藻赤潮显著改变了局部海域的浮游植物群落结构组成 与过渡区和非赤潮区相比,赤潮区硅 藻门和甲藻门浮游植物细胞密度增加显著,而绿藻、隐藻和蓝藻门却呈相反趋势。且物种数目上低于过 渡区。浮游植物细胞密度的降低一方面与营养盐的竞争、氮磷比变化有关,另一方面也可能受夜光藻直 接摄食的影响。另外,本次调查赤潮区浮游植物优势种主要为链状或条形的硅藻为主,且甲藻门的血红 哈卡藻呈显著增加的趋势,由此推测夜光藻的快速增长也诱导或刺激某些种类浮游植物的快速生长,如 血红哈卡藻(Akashivo sanguinea)、叉状角藻(Ceratium furca)、脆指管藻(Dactyliosolen fragilissima)、萎软几 内亚藻(Guinardia flaccida (castracane) Peragallo)、浮动弯角藻(Eucampia zoodiacus)等,这一现象与达达尼 尔海峡夜光藻赤潮暴发过程的浮游植物群落结构相类似^[4]。然而,本次调查中夜光藻直接捕食其他种类 浮游植物的证据未在活体夜光藻中得到证实,因此,夜光藻通过直接摄食其他浮游生物作为食物或增加 种间的竞争优势研究尚需进一步开展。

参考文献:

- [1] 宋书群,李才文,孙军. 夜光藻有性繁殖研究进展[J]. 生态学报,2016,36(9):2451-2459.
- [2] Mikaelyan A S, Malej A, Shiganova T A, et al. Populations of the red tide forming dinoflagellate Noctiluca scintillans (Macartney): A comparison between the Black Sea and the northern Adriatic Sea [J]. Harmful Algae, 2014, 33: 29 - 40.
- [3] Baliarsingh S K, Lotlikeraneesh A, Trainer V L, et al. Environmental dynamics of red Noctiluca scintillans bloom in tropical coastal waters [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 111: 277 – 286.
- [4] Turkoglu M. Red tides of the dinoflagellate Noctiluca scintillans associated with eutrophication in the Sea of Marmara (the Dardanelles, Turkey) [J]. Oceanologia, 2013, 55 (3): 709 – 732.
- [5] Escalera L, Pazos Y, MOROÑOÁ, et al. Noctiluca scintillans may act as a vector of toxigenic microalgae [J]. Harmful Algae, 2007, 6: 317 – 320.

- [6] Mohamed Z A, Mesaad I. First report on Noctiluca scintillans blooms in the Red Sea off the coast of Saudi Arabia: consequences of eutrophication [J]. Oceanologia, 2007, 49: 337-351.
- [7] Fock H O, Greve W. Analysis and interpretation of recurrent spatio-temporal patterns in zooplankton dynamics: a case study on *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in the German Bight (North Sea) [J]. Marine Biology , 2002, 140: 59 - 73.
- [8] Sidabutar T, Praseno D P, Fukuyo Y. Harmful algal blooms in Indonesian waters [R]. Intergovernmental Oceanographic Commission of NESCO 2000, 124 – 128.
- [9] Kim H G. Recent harmful algal blooms and mitigation strategies in Korea [J]. Ocean Research , 1997 , 19: 185 192.
- [10] Miyaguchi H, Fujiki T, Kikuchi T, et al. Relationship between the bloom of Noctiluca scintillans and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay [J]. Japan. Journal of Plankton Research , 2006, 28: 313 – 324.
- [11] Tang D L, Di B P, Wei G F, et al. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea [J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1): 245 – 253.
- [12] 徐兆礼. 长江口夜光藻(Noctiluca scintillans)年间变化和水域富营养化趋势[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(6): 743-748.
- [13] 周名江,朱明远,张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学,2001,13(2):54-59.
- [14] 周遵春,马志强,薛克,等. 对辽东湾夜光藻赤潮和叉状角藻赤潮成因的初步分析[J]. 水产科学,2002,21(2):9-12.
- [15] 黄长江,齐雨藻,黄奕华,等. 南海大鹏湾夜光藻种群生态及其赤潮成因分析[J]. 海洋与湖沼,1997,28(3):245-255.
- [16] 尹翠玲, 张秋丰, 邹涛, 等. 渤海湾天津近岸海域夜光藻赤潮生消过程初探[J]. 海洋湖沼通报, 2013(2):99-104.
- [17] 王雨,叶又茵,林茂,等. 南海北部夜光藻种群的时空分布及其环境适应性[J]. 生物多样性,2012,20(6):685-692.
- [18] 何雪琴,温伟英,何清溪.海南三亚湾海域水质状况评价[J].台湾海峡,2001,20(2):165-170.
- [19] 周艳荣,马文斋,高振会. 唐岛湾海域营养状态及有机污染状况分析[J]. 海洋环境科学,2008,27(2):70-73.
- [20] 刘炜,李奶姜,李婕. 福宁湾水质状况及其水体富营养化的初步探讨[J]. 海洋通报,2008,27(1):111-115.
- [21] 吴瑞贞,林端,马毅. 南海夜光藻赤潮概况及其对水文气象的适应条件[J]. 台湾海峡, 2007, 26(4): 590-595.
- [22] Umani S F, Beran A, Parlato S, et al. Noctiluca scintillans Macartney in the Northern Adriatic Sea: long-term dynamics, relationships with temperature and eutrophication, and role in the food web [J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26: 545 – 561.
- [23] Yilmazï N, Okus E, Yüksek A. Evidences for influence of a heterotrophic dinoflagellate (*Noctiluca scintillans*) on zooplankton community structure in a highly stratified basin [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 64: 475 - 485.
- [24] Frangópulos M, Spyrakos E, Guisande C. Ingestion and clearance rates of the red Noctiluca scintillans fed on the toxic dinoflagellate Alexandrium minutum (Halim) [J]. Harmful Algae, 2011, 10: 304 – 309.
- [25] Azanza R V, Cruz L J, Carino F A, et al. Paralytic shellfish toxin concentration and cell density changes in Pyrodiniumbahamense-Noctiluca scintillans feeding experiments [J]. Toxicon, 2010, 55: 1017 – 1023.
- [26] Mohanty A K, Satpathy K K, Sahu G, et al. Red tide of *Noctiluca scintillans* and its impact on the coastal water quality of the near-shore waters, off the Rushikulya River, Bay of Bengal [J]. Current science, 2007, 93(5): 616-618.
- [27] Padmakumar K B, Sreerenjima G, Fanimol C L, et al. Preponderance of heterotrophic Noctiluca scintillans during a multi-species diatom bloom along the southwest coast of India [J]. International Journal of Oceans and Oceanography, 2010(1): 55-63.

Correlation Between the Patch Distribution of *Noctiluca scintillans* Bloom and Aquatic Environmental Factors

QI Shibin , QIN Chaomei , HUANG Shaojian , ZHONG Chao , SUN Kaifeng

South China Institute of Environmental Sciences. Ministry of Environmental Protection, Guangzhou, Guangdong 510535, China;
Zhanjiang Environmental Protection Monitoring Station, Zhanjiang, Guangdong 524022, China)

Abstract: Based on the data of Noctiluca scintillans bloom happened in the Guanghai Bay and Zhenhai Bay of the Pearl River Estuary in April 2016, the water quality and the change of the community composition of phytoplankton in the sea area under algal bloom were analyzed by using water quality evaluation, hierarchical cluster analysis and principal component analysis in order to establish a correlation between the patch distribution of N. scintillans bloom and the aquatic environmental factors. The results showed that the sea area under investigation was eutrophicated according to the trophic status index , and was slightly or moderately polluted based on the toxic substances of the sea water evaluated by the organic contamination index, the toxic pollution index and the comprehensive pollution index. The abundance of N. scintillans varied from 0 to 29 443.7 ind $\cdot L^{-1}$ among the sampling stations, which indicated a notable patch distribution of the algal bloom. The composition of phytoplankton community was changed during the algal bloom. The average abundance of Bacillariophyta and Pyrrophyta increased evidently, while that of Chlorophyta, Cryptophyta and Cyanophyta decreased significantly in the algal bloom area. Moreover, the number of average species of the alga was 18, 24 and 13 in the bloom area, the transition area and the non-bloom area, respectively. The dinoflagellate species, second to N. scintillans, were Akashiwo sanguinea and Ceratium furca, while the diatoms mainly included Dactyliosolen fragilissima, Guinardia flaccida (castracane) and Eucampia zoodiacus. Cluster analysis of the water quality factors revealed that N. scintillans bloom was detected in all the sampling stations in the river estuary, harbor area and aquaculture area where N. scintillans was distributed obviously in patches. The principal component analysis of water quality factors indicated that bloom of N. scintillans induced significant changes of the contribution rate and correlation coefficient of water quality factors. According to the rotated component matrix , the first principal component indicated the huge algal growth brought about consumption of nutrient (ammonia, total nitrogen, phosphate and total phosphorus) and increase of SS and CODMn, while the second principal component indicated the selected absorption of metals. Eutrophication of the sea water was the aquatic environmental basis of N. scintillans bloom. The patch distribution of N. scintillans changed obviously the structure of the phytoplankton community and the composition of the physical and chemical factors in the sea water of partial sea area.

Keywords: N. scintillans; harmful algal bloom; aquatic environmental factor; phytoplankton

(责任编辑:叶 静)