

# 长江口夜光藻(*Noctiluca scintillans*)年间 变化和水域富营养化趋势\*

徐兆礼

(农业部海洋与河口渔业重点开放实验室 中国水产科学研究院东海水产研究所 上海 200090)

**提要** 根据 1959 年和 2002 年在长江口海域 28°00'—32°00'N, 122°00'—123°30'E 海域 4 个季节 8 个航次海洋调查资料, 分析长江口夜光藻丰度的平面分布和季节变化特征。并结合同步的温度资料进行曲线拟合, 构造数学模型, 计算最适温度。结合夜光藻分布特征、生态类群, 比较不同年间夜光藻丰度变化趋势, 分析长江口富营养化趋势对夜光藻丰度的影响。结果表明, 夜光藻出现率和平均丰度均表现为春季丰度极高而其它季节较低。例如春季长江口夜光藻的最高丰度可以达到 48576.00 ind/m<sup>3</sup>, 出现率为 96.30%。该种在春季有明显的集群性, 其它季节聚集强度指标值较低。盐度是影响夜光藻的平面分布的主要因素。长江口夜光藻适温范围较窄。仅仅在 15—20 之间有较高的数量。通过曲线拟合计算, 其丰度和温度的函数关系符合 Yield Density 模型。进一步通过极值计算得出, 夜光藻最适温度为 17.53。在长江口, 夜光藻往往生活在在长江径流和外海水形成的河口锋水域。因而是暖温性近海种。近年来在春季, 长江口夜光藻数量明显增多, 夜光藻数量的年间变化特征可能与长江口富营养化相关。夜光藻赤潮的爆发就是长江口海域富营养化的结果之一。

**关键词** 夜光藻, 富营养化, 最适温度, 最适盐度, 长江口

**中图分类号** S932.7

夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮发生在我国非常广泛。在渤海的辽河口(周遵春等, 2002)、东海(Tang *et al*, 2002)和南海(黄伟建等, 1993; 黄长江等, 1996)等水域都有发生。在我国, 早期所发生的赤潮中, 夜光藻赤潮较多(周名江等, 2001)。例如, 1988 年 6 月在长江口发生 1400 km<sup>2</sup> 夜光藻赤潮, 使海洋生态系统受到严重的破坏(周名江等, 2001)。由于长江口海域是多种鱼类的产卵场和索饵场, 因此研究夜光藻种群在长江口海域数量分布和变化动态, 对于认识长江口夜光藻赤潮的形成机制, 保护长江口生态系统和渔场环境都具有重要的意义。

以往对夜光藻的研究, 仅仅限于某一区域和某一时间的研究(董婧等, 2000; 黄长江等, 1997; 谢健等, 1993)。夜光藻被认为是南海大鹏湾重要的赤潮生物, 因而对其赤潮爆发成因有较为详细的研究(Qi *et*

*al*, 1996)。相比之下, 对长江口夜光藻的研究不够全面。较重要的仅有徐兆礼等(2003a)采用数学模型研究长江口夜光藻和其它浮游生物之间数量关系; 蒋晓山(1992)对长江口夜光藻赤潮发生过程的描述。有报道显示, 国际上, 在热带印尼沿海(Sidabutar *et al*, 2000), 在温带的韩国沿海(Kim, 1997)和德国北海(Fock *et al*, 2002)都发生过夜光藻赤潮, 显示出夜光藻能够广泛地适应不同的温盐环境。然而, 目前关于夜光藻生态适应的数量分析研究较少。尤其在长周期变化过程中, 有关该种分布和丰度变化的研究仅见 Uhlig 等(1990)对北海夜光藻赤潮的观测。在科学上, 如果对长江口夜光藻数量变化特性认识不足, 势必削弱对其成因的了解, 也不利于对夜光藻赤潮的深入研究。为此, 本文以不同年代夜光藻数量变化为对象, 探讨该种在长江口水域长周期变化和赤潮成因。

\* 国家自然科学基金重大研究计划, 90511005 号。徐兆礼, 研究员, E-mail: xu\_zhaoli@126.com, xiaomin@public4.sta.net.cn  
收稿日期: 2008-11-25, 收修改稿日期: 2009-01-19

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究海域及取样方法

1959年和2002年,在长江口28°00'—32°00'N, 122°00'—123°30'E海域,分别进行春(5月)、夏(8月)、秋(11月)和冬(2月)4个季节8个航次的调查。调查站位见图1。浮游动物样品采集和室内处理均按照“海洋调查规范”进行(国家海洋局,1991)。用大型浮游生物网(口径50cm、网目孔径0.160mm)由底至表层垂直拖曳采集,所获样品均经5%福尔马林溶液固定后,按个体计数法在立体显微镜下计数样品中的夜光藻丰度(ind/m<sup>3</sup>)。

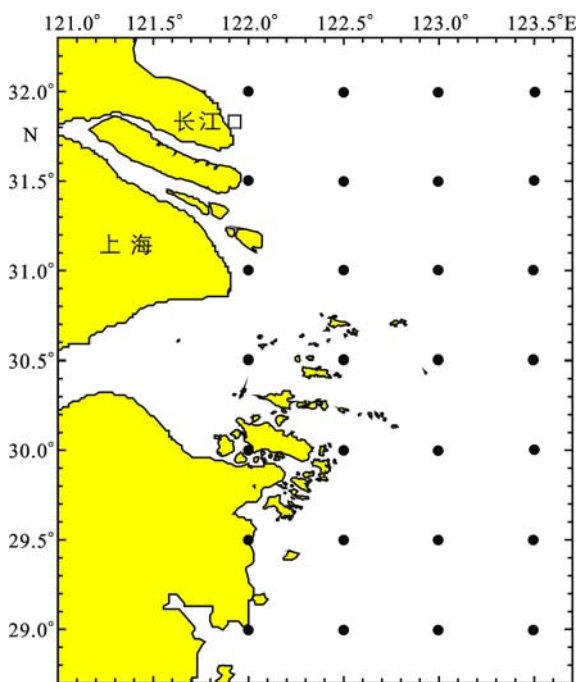


图1 采样站位  
Fig.1 Sampling stations

### 1.2 数据处理

本文分析夜光藻数量变化,采用平均丰度和出现率指标,出现率是指调查海域夜光藻出现的站位数占总站位数的百分数。

分析长江口夜光藻分布不均匀性。计算丛生指标值  $I$ , 采用以下公式:

$$I = \frac{S^2}{\bar{X}} - 1 \quad (1)$$

式中,  $\bar{X}$  为夜光藻的平均丰度;  $S$  为标准差。该指标是估计种群空间格局非随机程度的统计量。  $I$  正值越大, 其聚集强度越高(徐兆礼等, 1989)。

采用 Yield Density 模型(Holliday, 1960)拟合夜光

藻丰度和温盐之间的函数关系, Yield Density 模型(YDM)由下式表示

$$y = \frac{1}{a + bx + cx^2} \quad (2)$$

采用麦夸特非线性最小二乘法(Marquardt, 1963)估计上述模型中参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ , 从而获得公式2。在此基础上, 对函数极值点进行分析, 依据 Rolle 中值定理原理(同济大学应用数学系, 2002)求导。设导函数为零, 解方程。导函数为零点所对应的自变量值, 即为最适温度和最适盐度点。有关计算方法和数学原理参考文献(Christensen, 1996)。

## 2 结果

### 2.1 夜光藻水平分布特征

1959年春秋两季, 夜光藻在调查海域 122°00'—122°30'E 仅有零星分布。夏冬季出现站位相对较多, 冬季有较为广泛的出现, 但数量极少, 而夏季数量较多。就出现地点而言, 春秋两季在浙江沿海相对较多, 但数量不超过 5 ind/m<sup>3</sup>。夏季在舟山的泗礁、岱山海域, 长江口北部海域都有高丰度站位存在, 最高丰度达到 1575 ind/m<sup>3</sup>。而冬季的分布区主要在长江口北部, 数量都不超过 0.5 ind/m<sup>3</sup>。

由图2可见, 与1959年相比, 2002年夏秋冬这三个季节夜光藻的数量没有显著的变化。例如, 秋季没有分布, 冬季夜光藻只出现在两个站位, 出现的位置在 29°50'—30°00'N, 122°00'E 海域, 数量仅为 0.20 和 0.25 ind/m<sup>3</sup>。2002 夏季长江口夜光藻的数量低于 1959 年夏季。显著不同的是春季: 春季长江口北部和南部分别出现两个丰度极高的中心, 前者最高丰度为 22908.34 ind/m<sup>3</sup>, 后者最高丰度为 48576.00 ind/m<sup>3</sup>。在春季, 长江口外冲淡水主轴经过水域(30°00'—31°00'N)的丰度显著低于南北两侧, 丰度不超过 2000.00 ind/m<sup>3</sup>。

### 2.2 夜光藻季节变化的比较

见表1。夜光藻丰度的季节变化总体上表现为秋冬季低而夏春季高的特征, 特别是 2002 年春季夜光藻丰度极高, 最高丰度达 48576.00 ind/m<sup>3</sup>。

夜光藻出现率表现为 2002 年春季夏季显著高于其它年份和季节。例如 2002 年春季夏季出现率分别为 96.30% 和 88.46%, 远远高于其它季节。

从丛生指标看, 夜光藻爆发时有明显的集群性, 特别是 2002 年春季, 丛生指标达到 19309.12。其次是 1959 年夏季, 为 163.24。一般而言, 该种在秋冬季聚集强度值较低, 呈现均匀分布的特征。

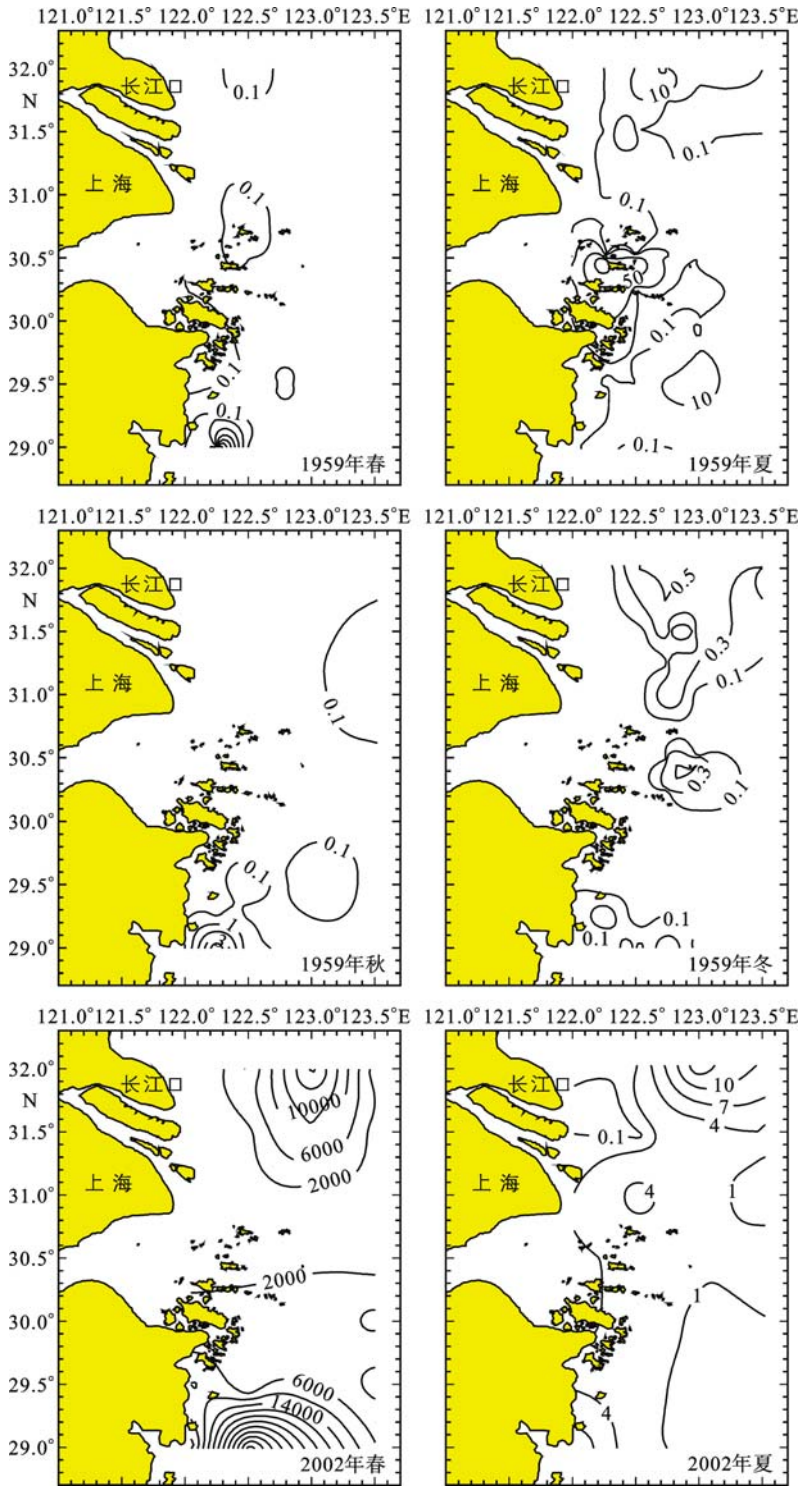


图2 长江口水域夜光藻水平分布

Fig.2 The horizontal distribution of *N. scintillans* abundance in the Changjiang estuary

2.3 夜光藻的温度适应

对2002年夜光藻丰度和温度函数关系分析(图3)表明夜光藻适温范围较窄, 仅仅在15—20 之间有较高的数量。曲线拟合计算得到的函数关系符合

Yield Density 模型, 即  $y = 1 / (0.153685 - 0.017525t + 0.000500t^2)$  ( $R = 0.37, F = 8.67, P = 0.0003$ )。由此可以认为拟合统计结果有非常高的置信度。依据上述方程计算得出夜光藻最适温度为 17.53 。

2.4 营养盐数量变化的比较

1959、2002年5月 PO<sub>4</sub>-P 和 NH<sub>4</sub>-N 对比分析结果表明, 2002年的测定值明显低于1959年的测定值。

3 讨论

3.1 夜光藻数量分布和季节变化特征

在长江口海域, 夜光藻主要分布在 122°20'E 及其以东水域(图2), 这些水域主要属于长江口河口锋水域, 盐度往往大于31(沈焕庭, 2001)。而调查海区 122°30'E 以西水域(图2)数量很少或没有分布。在长江口, 122°30'E 以西水域是最大浑浊带位置所在(沈焕庭等, 2001)。由于长江携带入海的沙量年平均为  $4.86 \times 10^8$ t。流域来沙到了口门区, 也就是 122°30'E 以西水域, 因表面离子发生变化产生泥沙絮状凝集。同时在河口特有的滞流点附近存在重力环流。流域来沙、重力环流、风浪、水流紊动、潮流和波浪的共同作用将导致高浓度悬沙的产生, 从而形成最大浑浊带(沈焕庭等, 2001)。高浓度悬沙对浮游植物生长不利, 影响初级生产力的提高(徐兆礼等, 1995, 1999)。夜光藻主要以浮游植物和浮游动物为饵料, 在生产力较低的环境条件下难以形成数量巨大的种群。在河口峰, 由于水体变清, 营养丰富, 浮游植物生长迅速, 浮游动物数量较多, 从而改善了夜光藻生长的饵料基础。这可能是长江口夜光藻赤潮在 122°20'E 及其以东水域爆发的原因。

主要位于河口锋水域, 是长江口夜光藻水平分布的重要特征。依据有关资料, 该种是中国北方沿海最主要的浮游动物种类之一, 主要分布在沿海, 而外海数量很少。东、黄、渤海比较, 依据20世纪80年代中国海岸带调查资料(刘瑞玉等, 1996), 渤海的平均丰度 ( $1248 \text{ind}/\text{m}^3$ ) 大于江苏近海 ( $776 \text{ind}/\text{m}^3$ ), 东海因营养

表 1 长江口水域夜光藻丰度的季节变化  
Tab.1 The seasonal abundance of *N. scintillans* in the Changjiang estuary

季节	年份	平均温度 ( )	生态特征值			
			最大丰度(ind/m <sup>3</sup> )	平均丰度(ind/m <sup>3</sup> )	丛生指标 <i>I</i>	出现频率(%)
春	1959	15.45	3.00	0.08	5.26	11.34
	2002	17.53	48576.00	5864.19	19309.12	96.30
夏	1959	27.06	157.00	5.34	163.24	48.94
	2002	27.26	14.67	2.19	3.84	88.46
秋	1959	19.67	5.00	0.14	21.68	10.20
	2002	18.84	0.00	0.00	—	—
冬	1959	9.42	0.50	0.11	- 1.00	22.83
	2002	10.36	0.25	0.02	- 0.96	6.90

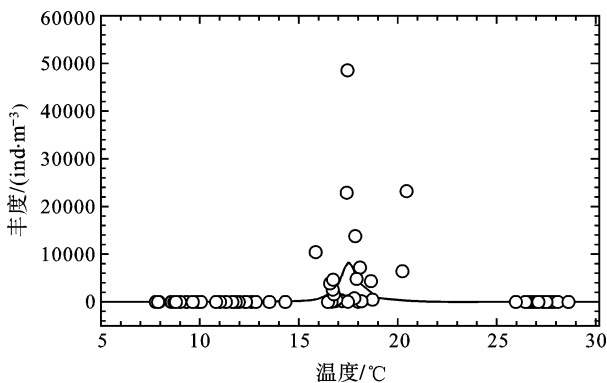


图 3 2002 年夜光藻温度-丰度散点图

Fig.3 The diagram of abundance vs. temperature in 2002

表 2 不同年度 PO<sub>4</sub>-P 和 NH<sub>4</sub>-N 测定值的比较  
Tab.2 The comparison of PO<sub>4</sub>-P (g/m<sup>3</sup>) and NH<sub>4</sub>-N (g/m<sup>3</sup>) in different years

指标	年度	平均值	最大值	最小值	标准差
PO <sub>4</sub> -P (g/m <sup>3</sup> )	1959	21.290	44.00	4.500	9.900
	2002	0.210	0.70	0.050	0.180
NH <sub>4</sub> -N (g/m <sup>3</sup> )	1959	0.021	0.04	0.005	0.010
	2002	0.007	0.02	0.002	0.006

丰富数量最多(>30000ind/m<sup>3</sup>)。但是不同海区数量的季节变化相同,均为春季丰度较高,东、黄、渤海夜光藻赤潮大多数发生在春季的5—6月。

依据以上分析可以认为,在东、黄、渤海,夜光藻数量的地理分布和季节变化具有类似中华哲水蚤的特征,因而可以认为该种是暖温性近海种。

### 3.2 夜光藻的季节变化

水温是影响夜光藻季节变化的主要因素。东、黄、渤海夜光藻赤潮的爆发基本上都是5—6月,在南海夜光藻也是5—6月较多。但是大亚湾每年1—6月都可能夜光藻赤潮爆发(黄长江等,1996)。同样是5—6月,南海和东、黄、渤海表层水温相差较大:南海是

亚热带水域;东海是暖温带向亚热带过渡的海域;黄渤海则是暖温带环境的海域。关于上述水域夜光藻赤潮爆发季节相同但环境存在差异的原因可能有两点:其一是夜光藻具有适应不同温度条件的能力,温度不是夜光藻赤潮爆发的限制因子。但是这种说法并不能解释2002年长江口春季夜光藻数量极多,而其它季节数量很少这一现象,也难以解释东、黄、渤海夜光藻赤潮为何大多发生在春季的现象。因此作者推测南海夜光藻和东、黄、渤海夜光藻可能属于不同的种群,因而具有不同的适温属性。根据东、黄、渤海夜光藻赤潮大多发生在春季这一事实,以及长江口夜光藻的最适温度在17.53的计算结果,可以认为17.53正是近年来5月中上旬长江口水域的表层平均水温(国家海洋局,2002)。从季节变化和最适温度这两个方面都说明,在长江口,该种具有暖温种的特征。

### 3.3 夜光藻分布与水团的关系

水团变化对长江口夜光藻的平面分布也有较大的影响。长江径流与外海水混合,形成河口锋,在河口锋海域,悬沙浓度已经降低,营养盐丰富,浮游植物数量较多(吴玉霖等,2004)。同时温度条件合适,由此形成了夜光藻爆发的饵料条件和营养条件。从图2可见,春季夜光藻极高丰度区域位于长江冲淡水主轴南北两侧,即冲淡水与外海水交汇偏外海水一侧,而冲淡水经过的水域夜光藻数量相对较少。由此推测,太低的盐度不利于夜光藻赤潮爆发。由于冲淡水与外海水交汇,在海水一侧水流较缓有利于夜光藻聚集,加上径流源源不断地提供充足的养分,形成夜光藻爆发的水文、化学和生物的环境条件。长江口夜光藻平面分布特征可能与河口锋海域特有的水团条件以及由此形成特有的环境条件密切相关。

### 3.4 夜光藻赤潮爆发与近年来长江口富营养化的关系

2002 年长江口水域可溶性磷酸盐和无机氮含量有所减少(表 2)。这可能与 2002 年调查水域发生了大规模的赤潮(徐兆礼等, 2003b)有关。表 2 中极低的可溶性营养盐水平已经可以证实这一点。在赤潮的条件下, 水体中的总磷和总氮将呈现出一个极大值, 是水域富营养化的有力证据。夜光藻的爆发就是长江口海域富营养化的结果之一。

致谢 温、盐度资料由朱德弟研究员提供, 浮游动物样品由马名玄先生帮助采集, 高倩、周晓东、陈佳杰同学等做了部分工作, 沈晓民在论文构思中提供了非常有益的建议, 谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 同济大学应用数学系, 2002. 高等数学. 北京: 高等教育出版社, 59—65, 126—133
- 刘瑞玉, 崔玉珩, 1996. 中国海岸带生物. 北京: 海洋出版社, 116—123
- 吴玉霖, 傅月娜, 张永山等, 2004. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关. 海洋与湖沼, 35(3): 246—251
- 沈焕庭, 2001. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社, 24—25
- 沈焕庭, 潘定安, 2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 39—56
- 周名江, 朱明远, 张 经, 2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学, 13(2): 54—59
- 周遵春, 马志强, 薛 克等, 2002. 对辽东湾夜光藻赤潮和叉状角藻赤潮成因的初步分析. 水产科学, 21(2): 9—12
- 徐兆礼, 王云龙, 白雪梅等, 1999. 长江口浮游动物生态研究. 中国水产科学, 6(5): 51—55
- 徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿等, 1995. 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究. 中国水产科学, 2(1): 39—48
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鱼渔场的关系. 生态学杂志, 8(4): 13—15
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 朱明远等, 2003a. 夜光藻(*Noctiluca scintillans*)与浮游生物关系的数学模型. 水产学报, 27(增刊): 64—68
- 徐兆礼, 洪 波, 朱明远等, 2003b. 东海赤潮高发区春季浮游动物生态特征的研究. 应用生态学报, 14(7): 1081—1085
- 黄长江, 齐雨藻, 杞 桑等, 1996. 大鹏湾夜光藻种群的季节变化和分布特征. 海洋与湖沼, 27(5): 493—498
- 黄长江, 齐雨藻, 黄奕华等, 1997. 南海大鹏湾夜光藻种群生态及其赤潮成因分析. 海洋与湖沼, 28(3): 245—255
- 黄伟建, 齐雨藻, 1993. 大鹏湾海水理化因子对夜光藻生长影响的因子分析. 海洋通报, 12(2): 17—12
- 董 婧, 王文波, 刘海映, 2000. 辽宁近海浮游植物与夜光藻赤潮的关系. 水产科学, 19(1): 17—20
- 蒋晓山, 1992. 长江口赤潮多发区夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮发生过程分析. 暨南大学学报, 13(3): 134—139
- 谢 健, 李锦蓉, 吕颂辉等, 1993. 夜光藻赤潮与环境因子的关系. 海洋通报, 12(2): 1—6
- Christensen R, 1996. Analysis of variance, design and regression: applied statistical methods, New York: Chapman and Hall, 391—408
- Fock H O, Greve W, 2002. Analysis and interpretation of recurrent spatio-temporal patterns in zooplankton dynamics: a case study on *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in the German Bight (North Sea). Marine Biology, 140: 59—73
- Holliday R, 1960. Plant population and crop yield. Field Crop Abstracts, 13: 159—167
- Kim H G, 1997. Recent harmful algal blooms and mitigation strategies in Korea. Ocean Research, 19(2): 185—192
- Marquardt D W, 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear inequalities. SIAM Journal on Applied Mathematics, 11: 431—441
- Qi Y Z, Lei Z, Lv S H *et al*, 1996. The ecology and occurrence of harmful algal blooms in the South China Sea. Harmful and Toxic Algal Blooms, 33—36
- Sidabutar T, Praseno D P, Fukuyo Y, 2000. Harmful algal blooms in Indonesian waters. In: Hallegraeff G M, Blackburn S I, Bolch C J *et al* ed. Intergovernmental Oceanographic Commission of NESCO, 124—128
- Tang D L, Di B P, Wei G F *et al*, 2006. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. Hydrobiologia, 568(1): 245—253
- Uhlig G, Sahling G, 1990. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968—1988. NETH. J Sea Res, 25(1—2): 101—112



## THE INTER-ANNUAL VARIATIONS IN *NOCTILUCA SCINTILLANS* ABUNDANCE AND EUTROPHICATION IN CHANGJIANG ESTUARY

XU Zhao-Li

(Key and Open Laboratory of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture of China, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai, 200090)

**Abstract** Data gathered in eight seasonal oceanographic investigations in the Changjiang (Yangtze River) estuary (28°00'—32°00'N, 122°00'—123°30'E) in 1959 and 2002 were used to study the temporal-spatial distribution of *Noctiluca scintillans* in the waters, with which the ecological groups were classified using mathematical modeling. The impact of environmental factors on the eutrophication and the relation between eutrophication and the abundance of the species were studied. Clear seasonal variations in the abundance and occurrence frequency of *N. scintillans* have been recognized: very high abundance (48576.00ind/m<sup>3</sup>) and occurrence frequency (96.30%) in spring and low in other seasons; they assembled in spring, but scattered in other seasons. Salinity was shown a critical factor in determining the distribution in the estuarine waters, so did temperature as it inhabited coastal temperate zone in a narrow range of 15—20 °C, best around 17.53 °C. Notably, the abundance in spring of the estuary has been increasing significantly in recent years, resulted from eutrophication and caused HAB. Therefore, the species can be used to estimate eutrophication status.

**Key words** *Noctiluca scintillans*, Eutrophication, Optimal temperature, Optimal salinity, The Changjiang estuary