

# 2006 年渤海湾赤潮监控海域叶绿素-*a* 的影响因子分析研究\*

杨 静 李 海 刘钦政 何恩业 任湘湘

(国家海洋环境预报中心 北京 100081)

**提要** 利用 2006 年夏季渤海湾驴驹河赤潮监控区实测资料, 分析了水文要素、气象要素、化学要素等环境因子与叶绿素-*a* 浓度的相关关系。结果表明, 透明度、化学需氧量、磷酸盐、硅酸盐、溶解氧、pH 值与叶绿素-*a* 的相关关系较好。根据环境因子对叶绿素-*a* 浓度的影响程度, 提取主要的环境因子作为自变量, 以实测的叶绿素-*a* 浓度为因变量, 通过多元回归分析建立了它们之间的定量关系。回归结果表明, 渤海湾中叶绿素-*a* 浓度同溶解氧、pH 值的关系密切。本文研究结果对渤海湾叶绿素-*a* 浓度预测指标因子的确定及渤海湾生态动力学模型变量及参数系统选取有一定的指导作用。

**关键词** 渤海湾, 叶绿素-*a*, 相关关系, 多元回归分析, 环境因子

**中图分类号** Q178

进行初级生产的浮游植物在海洋生态系统中扮演着重要的角色, 它利用各种营养盐把无机物质通过光合作用转化为有机物质, 然后通过食物链把能量传递到下一个营养级中, 因此要了解整个海洋生态系统的结构功能及其变化规律, 水体中的浮游生态系统研究是最基础的部分。叶绿素存在于大多数浮游植物体内, 是反映浮游植物现存量的重要指标。通过分析研究海洋中叶绿素浓度的分布和变化, 能在一定程度上了解水域环境因子对浮游植物生长的影响, 从而进一步搞清浮游生物与非生物环境之间的变化关系。

渤海湾位于渤海的西部, 是一封闭性内湾, 在渤海渔业上占有重要位置, 但由于水交换不良、陆源和养殖废水注入增加等原因, 造成水体富营养化问题突出(邹景忠等, 1983)。为了了解海洋环境与生态系统间的相互关系及变化规律, 我国海洋科学工作者从 80 年代起对渤海开展了大量生态环境调查研究。费尊乐等(1988)分析了 1982—1983 年渤海综合调查

中叶绿素-*a* 时空变化与环境因子的关系, 得出其季节变化具有双峰状结构。孙军等(2002)利用 1999 年实测资料对渤海叶绿素-*a* 浓度和其他环境因子进行了相关分析和显著性检验, 得出浮游植物的生长在秋季与磷酸盐和硅酸盐的浓度有关, 而春季主要和硝酸盐、亚硝酸盐浓度相关; 秦延文等(2005)根据 2003 年 7 月天津渤海湾水体、柱状沉积物调查数据, 发现叶绿素-*a* 含量与  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量显著相关, 与  $\text{PO}_4\text{-P}$  相关性也较大。这些为研究叶绿素与海洋环境因子间的关系奠定了基础。但近年来由于人为因素、自然因素造成的环境变化, 使水体中的营养盐结构发生一定程度的改变, 甚至发生赤潮灾害, 如果能通过生物、物理、化学各因子间的相互作用及动态变化对生态系统进行预测, 将有助于及时制定合理的相关政策, 直接或间接地为渔业管理、环境保护等提供科学依据。这就促使海洋生态系统动力学模型研究越来越受到关注。俞光耀等(1999)、高会旺等(2004)、刘浩等(2006)等针对研究海域建立了不同的生态模型, 但目前尚

\* 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放研究基金项目: 长江口海域赤潮发生环境的数值模拟研究课题, MATHAB200914 号; 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目: 赤潮预警预报、应急及损害评估技术, 2007AA092003-01; 08DZ1206304 号; 国家重点基础研究发展计划(973)项目: 中国近海水母暴发的关键过程、机理及生态环境效应, 2011CB403600 号。杨静, E-mail: yangji@nmefc.gov.cn

收稿日期: 2011-03-31, 收修改稿日期: 2012-05-30

没有一种统一的生态模型能够包含所有浮游生物生产变化过程(魏皓等, 2001), 必须首先根据海区生态系统特征确定模型的状态变量, 才能较好地反映研究海域的生态环境变化规律, 那么对于主要环境参量的选择尤为重要。

本文以 2006 年夏季渤海湾驴驹河赤潮监控区的监测数据为依据, 分析叶绿素-*a* 与其所处的环境因子之间的联系, 找出影响叶绿素-*a* 浓度变化的关键因子。所得研究结果可为渤海湾叶绿素-*a* 浓度预测指标因子的确定及渤海湾生态动力学模型变量及参数系统选取提供参考。

## 1 赤潮监控区监测概况

渤海湾有海河、永定新河、大沽排污河、独流碱河、子牙新河等十几条入海河流, 径流有明显的季节性, 多集中在夏季。驴驹河赤潮监控区位于渤海湾西部, 监控区内设有 6 个监测站位, 分别记录了渤海湾近岸的水文、气象、生物和化学要素的变化情况。监测站位的分布如表 1 所示。

表 1 驴驹河赤潮监控区监控站位分布位置  
Tab.1 Location of the Lvju river red tide monitoring stations

说明	位置
站位 1	38°54'34"N, 117°55'48"E
站位 2	38°49'20"N, 117°51'21"E
站位 3	38°45'32"N, 117°47'55"E
站位 4	38°55'47"N, 117°50'11"E
站位 5	38°51'54"N, 117°44'42"E
站位 6	38°47'43"N, 117°41'15"E

在国家“十五”863 重点项目“赤潮重点监控区监控预警系统”的支持下, 项目组于 2006 年 5 月 22 日—8 月 28 日在渤海湾西部的天津驴驹河赤潮监控区进行了逐日的赤潮环境条件监测。监测要素包括表层水温、水色、透明度、海况、风速、风向、简易天气现象、气温、气压、化学需氧量、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、磷酸盐、硅酸盐、悬浮物浓度、盐度、pH 值、浊度、溶解氧、叶绿素-*a*、海洋浮游植物种类及密度等。采样和分析方法均按照《海洋监测规范》(GB 17378.7-1998)和《海洋调查规范》(GB 12763.4-1991) 执行。监测频率为 1、2、4 号站每天 1 次, 3、5、6 号站每 3 天 1 次。除去由于海况恶劣等原因造成监测中断数据缺失外, 各站位获得的环境要素纪录数为: 1 号站 72 条, 2 号站 70 条, 3 号站 26 条, 4 号站 73 条, 5 号站 25 条, 6 号站 25 条。

## 2 资料处理与方法

对监测数据进行分析前, 首先需要对其进行必要的处理, 将同一天各站位相同变量的原始观测值求平均, 经插值及质量控制, 用来分析监测海区各环境要素的总体变化特征。在相关分析和回归分析中, 数据为每个站位的观测值, 为反映每个站位各变量与叶绿素-*a* 之间的相关关系, 去除不完整的记录, 只保留各变量监测日期相同的完整记录进行分析, 样本数量为 213 个。

使用相关分析与回归分析的方法对监控区的数据进行分析研究。其具体步骤为: 首先求出监测要素与叶绿素-*a* 的相关系数, 然后根据显著性检验的结果, 选取影响叶绿素变化的主要环境因子。对选出的关键因子分别进行线性、指数、乘幂和对数的单因子拟合试验, 求出拟合方程和拟合度(拟合度定义为拟合方程的预测值与实测值的相关系数, 拟合度的数值越大, 表明拟合的效果越好)。根据拟合度的大小选择最优的拟合函数作为多元回归分析的自变量, 以叶绿素-*a* 作为因变量, 建立回归方程并进行显著性检验。这样, 引入最优的函数关系后虽然形式上是线性的, 但实际上已经包含了线性和非线性化的关系, 使所得方程更接近于实际。

## 3 环境要素变化分析

由图 1 可知渤海湾驴驹河赤潮监控区叶绿素 *a* 含量及其他环境要素的中位数及变化范围。各种环境要素的含量变化范围很不相同, 其中变化范围最大的

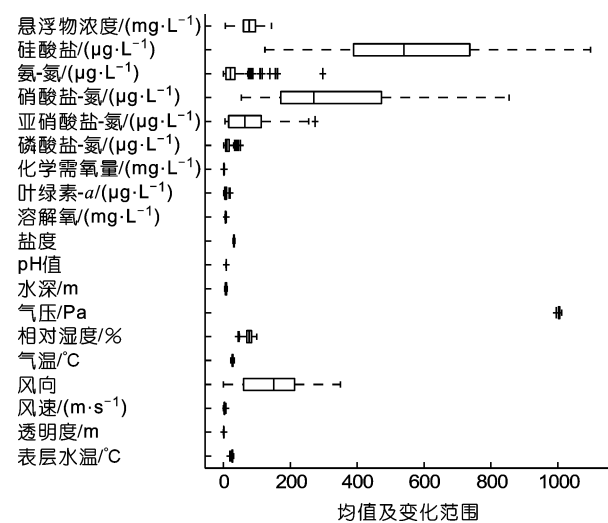


图 1 监测环境因子的中位数及变化范围

Fig.1 The median and range of the monitoring environmental factors

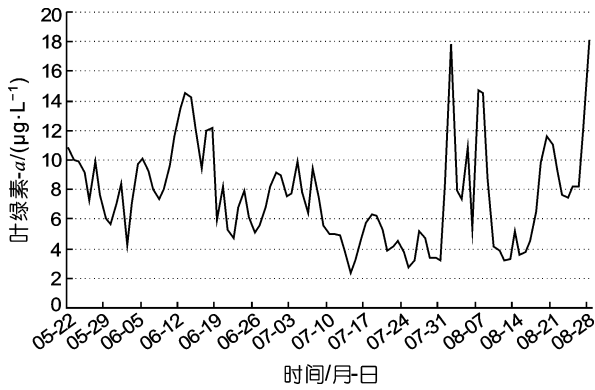


图 2 2006 年夏季渤海湾叶绿素-a 浓度逐日变化

Fig.2 The daily variation of chlorophyll-a concentration in Bohai Bay in summer 2006

是硅酸盐, 最大值达到 1254 µg/L, 平均值为 582.41 µg/L。3 种氮盐的变化范围相对也比较大, 其中硝酸盐氮的变化范围为 53.9—778 µg/L, 亚硝酸盐氮的变化范围为 5.34—389 µg/L, 氨氮的测值范围为 0.0196—296 µg/L。

从图 2 可以看出, 渤海近岸海区表层叶绿素浓度的测值范围为 2.0—18.0 µg/L, 平均值为 7.45 µg/L。进入 6 月份, 在有利于浮游植物生长的条件下, 叶绿素浓度逐渐增大, 达到第一个高峰值。浮游生物量的增加消耗了大量营养盐, 使浮游植物的生长在一定程度上受到限制, 下旬叶绿素浓度有所降低, 7 月出现最低值。浮游生物量的减少使营养盐浓度有所回升, 在适宜的生长条件下 8 月份叶绿素浓度急剧增大, 形成叶绿素浓度的第二个高峰。进入 8 月叶绿素浓度急剧降低, 随后又有所回升。依据日本学者安达六郎提出的赤潮生物数量的判断标准(表 2)认定, 观测期间共发生 3 次赤潮, 分别出现在 6 月 7—14 日、6 月 24—30 日和 8 月 6—11 日, 其中第 1 次和第 3 次赤潮发生的时间与叶绿素浓度变化的两个高峰值相对应, 在一定程度上反映了叶绿素含量的变化情况与浮游植物生物量的变化是一致的。黄良民等(1994)认为叶

表 2 赤潮生物个体与生物量指标

Tab.2 The red tide biological individuals and biomass indicators

细胞大小 (µm)	赤潮生物密度 (个/ml)
<10	> 10 <sup>4</sup>
10—29	>10 <sup>3</sup>
30—99	>3×10 <sup>2</sup>
100—299	>10 <sup>2</sup>
300—1000	>3×10

绿素-a 高值与出现赤潮有关, 根据叶绿素-a 含量变化进行赤潮预测是值得进一步研究的问题。

环境的改变对水体中的生态系统有重要影响, 其中营养盐的比例可以很好地指示水体中的营养状况, 是浮游生物受营养盐限制的重要指标。由驴驹河赤潮监控区内的营养盐比值随时间的变化可知(图 3、图 4), 大部分时间的 N/P 值超过了 Redfield 比值 (N/P=16), 平均值为 48.2, 说明夏季监控区内基本处于氮营养盐过剩的状态, 这与郑丙辉等(2007)对 1985—2003 年渤海湾营养盐结构变化趋势的分析结果吻合; 通常认为 Si/N 值在 1 以下为维持浮游植物正常生长的比值, 监测期间除了 6 月 20 日左右出现波动, Si/N 值基本处于 3 左右。于志刚等(2000)对 20 年来渤海中部实测资料的分析也有类似结论, 营养盐结构发生了显著变化, 表现为从氮限制向磷和硅供给相对不足的方向演化, 控区内 N/P 值和 Si/N 值的变化特征, 说明营养盐结构按此趋势发展, 将造成磷和硅的限制。

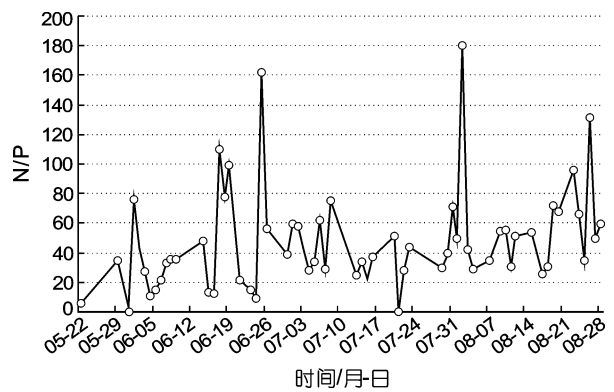


图 3 2006 年夏季驴驹河生态监控区氮磷比逐日变化

Fig.3 The daily variation of nitrogen to phosphorus ratio in the Lvju river monitoring area in summer 2006

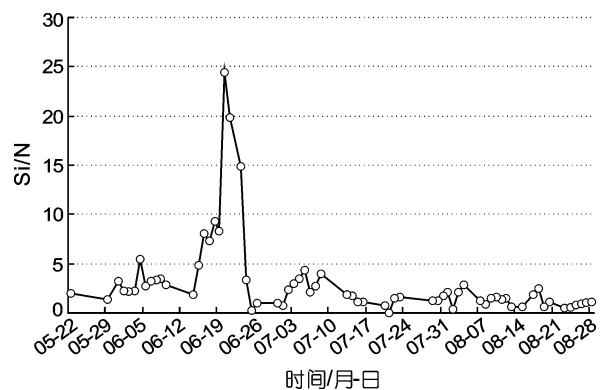


图 4 2006 年夏季驴驹河生态监控区硅氮比逐日变化

Fig.4 The daily variation of Silicon to nitrogen ratio in the Lvju river monitoring area in summer 2006

## 4 统计分析

### 4.1 叶绿素-*a* 浓度与其它环境要素的相关分析

将 6 个站位的观测记录做相关性分析, 不同环境要素与叶绿素-*a* 的相关系数及在 0.05、0.01 显著水平下 *t* 检验的结果, 如表 3 所示。

由表 3 可知, 不同站位同一环境因子与叶绿素-*a* 的相关系数不同。在 0.01 显著水平下 5 个站都通过检验的变量有 pH 值和溶解氧, 化学需氧量、硅酸盐有 3 个站位通过检验, 磷酸盐、透明度只有 2 个站位通过检验。由不同显著水平下 *t* 检验的结果可知, 渤海湾近岸 pH 值和溶解氧浓度与叶绿素-*a* 浓度的相关程度较好, 这说明在渤海湾近岸, 溶解氧浓度和 pH 值是预测叶绿素-*a* 浓度变化的很好指标; 营养盐中磷酸盐和硅酸盐浓度与叶绿素-*a* 浓度的相关性较好, 而 6 个站位的氮盐几乎都没有通过检验, 说明监控区浮游植物的生长与磷酸盐和硅酸盐的浓度相关程度较氮营养盐高, 这两种营养盐可能成为该海区浮游植物生长的限制营养盐, 这与前一节从氮磷比和硅氮比分析得出的结论一致。孙军等(2002)对 1999 年渤海实测资料的相关分析也表明, 叶绿素-*a* 浓度与磷酸盐和硅酸盐浓度密切相关。而秦延文等(2005)根据 2003 年 7 月天津渤海湾水体、柱状沉积物调查数据,

发现叶绿素-*a* 含量与 NO<sub>3</sub>-N 含量显著相关, 与 PO<sub>4</sub>-P 相关性也较大。黄良民等(1994)分析大鹏湾赤潮多发区资料得出, 影响叶绿素-*a* 变化的主要因子是铁、COD、盐度。各个海区的生态环境不同, 决定叶绿素-*a* 的主要影响因子也不尽相同。针对过程研究的渤海湾生态动力学模型建立时, 选择状态变量最好, 同时考虑硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐浓度的变化。

### 4.2 单个环境因子与叶绿素-*a* 的拟合

根据上节相关性分析的结果, 以 6 个站位实测的叶绿素-*a* 浓度为因变量, 分别选择 pH 值、溶解氧、磷酸盐、硅酸盐、透明度、化学需氧量为自变量, 作线性、对数、乘幂、指数和多项式拟合。叶绿素-*a* 与各环境因子的拟合度见表 4, 部分拟合曲线见图 5—图 10(注: 图 5—图 10 中的点代表实际观测值, 曲线代表拟合趋势线)。

从单个因子与叶绿素-*a* 拟合的变化趋势来看, pH 值与叶绿素-*a* 为正相关, 即 pH 值增加, 叶绿素-*a* 浓度呈增高趋势。此外, 透明度、化学需氧量和溶解氧浓度与叶绿素-*a* 也为正相关。较大的透明度有利于藻类进行光合作用释放氧气, 使海水中溶解氧含量增大。浮游植物繁殖生长, 导致藻类对水中 CO<sub>2</sub> 的需求量增高, 会在短时间内消耗大量 CO<sub>2</sub>, 使水体中的酸

表 3 环境要素与叶绿素-*a* 的相关系数检验表  
Tab.3 Environmental factors and chlorophyll-*a* correlation coefficient test

监测要素	站 1	站 2	站 3	站 4	站 5	站 6
表层水温	-0.056	-0.173	-0.102	0.110	0.295	0.100
透明度	0.475**	0.474**	0.010	0.056	0.159	-0.013
风速	-0.288	-0.150	-0.234	-0.271	-0.349	-0.341
风向	0.170	0.269	0.284	0.167	-0.019	0.258
气温	-0.108	-0.082	0.129	-0.004	0.166	0.196
相对湿度	-0.033	-0.048	0.006	-0.063	0.054	0.035
气压	-0.129	0.173	0.042	-0.075	-0.141	0.061
水深	-0.101	0.135	0.129	-0.089	0.314	0.244
pH 值	0.527**	0.597**	0.564**	0.537**	0.566**	0.419
盐度	-0.048	-0.007	-0.115	-0.428**	-0.260	-0.214
溶解氧	0.356**	0.563**	0.699**	0.778**	0.578**	0.359
化学需氧量	-0.063	0.339*	0.737**	0.355*	0.760**	0.715**
磷酸盐	-0.427**	-0.389**	-0.244	-0.211	-0.388	-0.483*
亚硝酸盐氮	-0.327*	-0.294	0.014	-0.008	0.019	-0.074
硝酸盐-氮	-0.081	-0.143	-0.072	0.066	0.289	0.147
氨-氮	-0.068	-0.057	-0.124	-0.111	-0.200	0.098
硅酸盐	-0.443**	-0.532**	-0.551**	-0.309*	-0.274	-0.207
悬浮物浓度	-0.084	-0.234	-0.418	-0.100	-0.618**	-0.416

注: \*代表在 0.05 水平下通过显著性检验, \*\*代表在 0.01 水平下通过显著性检验, 无\*号代表没有通过检验

表 4 叶绿素-a 与各环境要素的拟合度  
 Tab.4 Fitting degree between chlorophyll-a and environmental factors

变 量	线性拟合	对数拟合	乘幂拟合	指数拟合
pH 值	0.179	0.178	0.179	0.180
溶解氧	0.225	0.208	0.192	0.200
磷酸盐	0.123	0.024	0.027	0.153
硅酸盐	0.101	0.115	0.116	0.104
化学需氧量	0.066	0.020	0.01	0.04
透明度	0.063	0.039	0.038	0.063

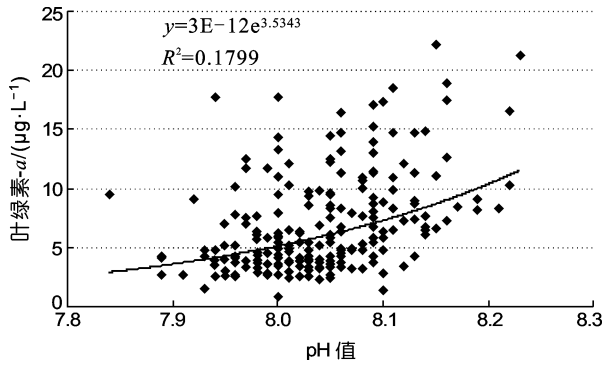


图 5 pH 值与叶绿素-a 的指数拟合  
 Fig.5 Exponential fitting of pH and chlorophyll-a

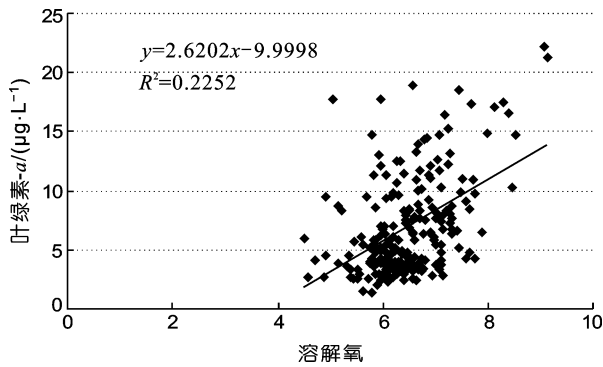


图 6 溶解氧与叶绿素-a 的线性拟合  
 Fig.6 Linear fitting of dissolved oxygen and chlorophyll-a

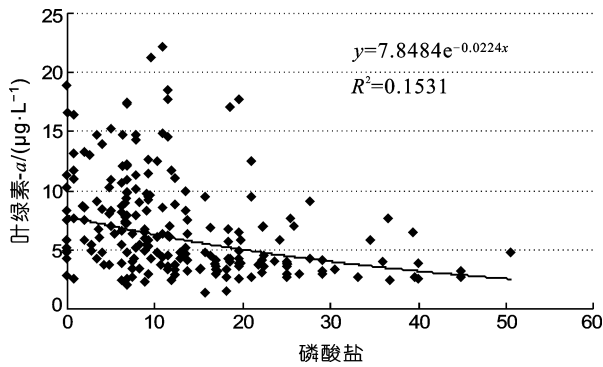


图 7 磷酸盐与叶绿素-a 的指数拟合  
 Fig.7 Exponential fitting of phosphates and chlorophyll-a

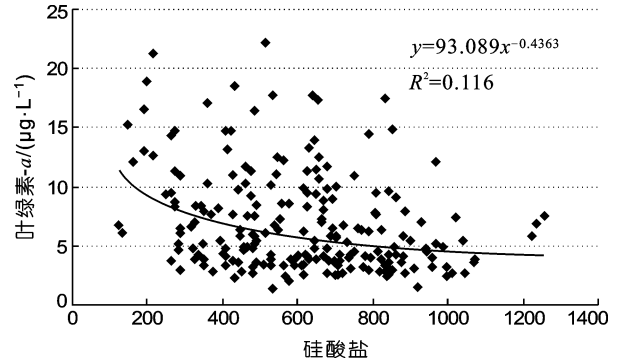


图 8 硅酸盐与叶绿素-a 的乘幂拟合  
 Fig.8 Power fitting of Silicate and chlorophyll-a

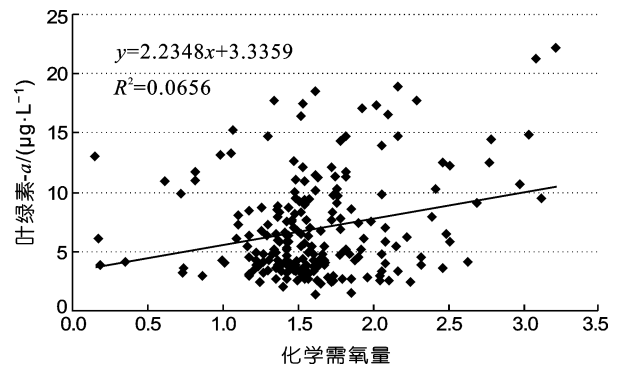


图 9 化学需氧量与叶绿素-a 的线性拟合  
 Fig.9 Linear fitting of chemical oxygen demand and chlorophyll-a

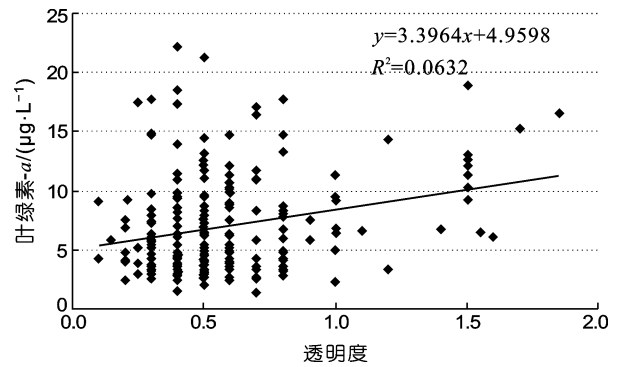


图 10 透明度与叶绿素-a 的线性拟合  
 Fig.10 Linear fitting of transparency and chlorophyll-a

碱度随之发生改变, 同时浮游植物有机体、营养盐等物质还原造成 COD 上升。磷酸盐、硅酸盐与叶绿素-a 呈负相关, 表明浮游植物在生长过程中消耗这两种营养盐, 使营养盐的浓度降低。

由表 4 可知, 在与叶绿素-a 的不同拟合方法中, 溶解氧、化学需氧量、透明度的线性拟合度比其他拟合方案高, 硅酸盐的乘幂形式和磷酸盐、pH 值的指数形式与叶绿素的拟合度较好, 所以在下一步建立

回归方程时考虑使用硅酸盐的乘幂形式与磷酸盐、pH的指数形式。

#### 4.3 多因子回归分析

为了探明叶绿素-*a* 浓度变化与多环境因子的内在联系,选择上述相关分析中与叶绿素-*a* 相关关系较好的因子,用6个站位的213个样本做多元回归分析。选择6个变量分别为透明度(D)、pH值(pH)、溶解氧(DO)、化学需氧量(CBOD)、磷酸盐( $\text{OPO}_4$ )、硅酸盐( $\text{SiO}_4$ )作为自变量,以叶绿素-*a* 为预报量(CHL),根据最小二乘原理求得回归系数建立方程:

$$\begin{aligned} \text{CHL} = & 1.052D + 0.175 \times 10^{-12} e^{3.5343\text{pH}} + 1.575\text{DO} \\ & + 2.73\text{CBOD} + 4.24e^{-0.0224\text{PO}_4} \\ & + 0.006(\text{SiO}_4)^{-0.4363} - 12.56 \end{aligned}$$

方程的  $F$  值为 23.606, 在 0.05 显著水平下, 分子自由度为 6, 分母自由度为 206 时  $F_{\alpha} = 2.14$ ,  $F > F_{\alpha}$ , 故回归方程是显著的, 残差及 95% 置信区间见图 11(注: 图 11 中的圆圈代表预测值与观测值的差值, 即残差。残差越接近于零, 说明预测值越接近观测值; 贯穿于圆圈的竖杠代表了预测值在可信度为 95% 下的置信区间)。

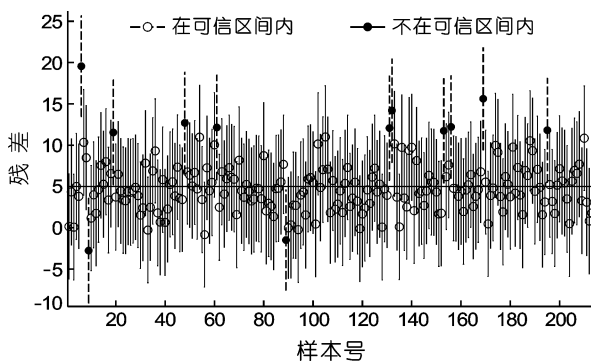


图 11 残差及其 95% 置信区间

Fig. 11 The Residuals and 95% confidence interval

由残差及 95% 置信区间分布图可知, 预测值与实测值的变化趋势是一致的, 说明回归方程能够描述总体的变化关系。第 6、9、19、48、61、89、131、132、153、156、169、195 个样本的残差置信区间不含零点, 这 12 个点为异常点, 它们对应的日期分别为 1 号站位的 6 月 15 日、6 月 16 日、7 月 8 日、8 月 23 日, 2 号站点 6 月 18 日、8 月 8 日, 4 号站点 6 月 15 日、6 月 16 日、8 月 1 日、8 月 5 日、8 月 20 日, 5 号站点 8 月 28 日。在回归分析使用的观测样本中, 从 6 月 4—14 日叶绿素-*a* 的观测记录很少, 而 1

号站位附近在 6 月 11 日前后曾发生了一次赤潮过程, 8 月 8 日前后又发生了第 3 次赤潮。由于所用数据样本的时间观测序列不连续, 不能把它作为奇异点轻易剔除。注意到多数异常值都出现在 1 和 4 号站位, 而这两个站位空间位置是最接近海河入海口的, 这也可能与河流的淡水输入作用有关。有研究表明(吴玉霖等, 2004), 长江径流量同长江口海域浮游植物种类组成和数量季节变化关系密切, 丰水期数量要明显高于枯水期。夏季径流量的增加会导致营养盐输入通量的增加(Ornolf, 2004), 引起河口附近海域营养盐结构的改变, 从而影响河口水域浮游微藻的数量分布和群落结构。

第 2 次赤潮发生的范围位于监测站位之间, 这期间检测数据相对于回归方程没有出现异常值。第 1、3 次赤潮爆发时期均有观测的数值不符合回归方程, 说明赤潮的演变具有突变特征(吴增茂等, 2004), 它的发生是受多种因素的综合作用的结果, 叶绿素-*a* 的变化反映了水体中浮游植物生物量的变化, 虽然检验的回归方程是显著的, 但生态系统本身的非线性特点要求进行进一步深入研究。

## 5 结论与讨论

本文利用实测的观测资料分析了 2006 年夏季驹河赤潮监控区各环境要素与叶绿素-*a* 浓度的关系。分析结果显示, 溶解氧与叶绿素-*a* 之间的相关关系最好。依据相关程度从大到小, 2006 年夏季渤海湾与叶绿素-*a* 相关性较强的主要环境因子依次为溶解氧、pH 值、化学需氧量、硅酸盐、磷酸盐、透明度, 而营养盐中的氮盐相对叶绿素-*a* 的影响不大, 磷酸盐和硅酸盐可能成为渤海湾近岸浮游植物生长的主要限制性营养盐。统计相关和回归分析表明, 叶绿素-*a* 浓度变化是诸多环境因素综合作用的结果。在海洋水体环境中, 各种环境要素均对其中的浮游生物生长与繁殖产生影响, 为探明浮游生物的生长与这些环境因子的内在联系, 作者利用选取的主要影响因子, 通过回归分析的方法建立了它们之间的关系式, 从而对叶绿素-*a* 的浓度变化进行有效预测; 本文的分析结果对挑选用于渤海湾叶绿素-*a* 浓度统计预测的指标因子可以起到一定的参考作用。同时, 溶解氧、pH 值、化学需氧量、硅酸盐、磷酸盐、透明度等关键因子的选取对于渤海湾生态动力学模型的进一步研究具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- 于志刚, 米铁柱, 谢宝东等, 2000. 20 年来渤海生态环境参数的演化和相互关系. 海洋环境科学, 19(1): 15—19
- 刘 浩, 尹宝树, 2006. 渤海生态动力过程的模型研究: I. 模型描述. 海洋学报, 28(6): 21—31
- 孙 军, 刘东艳, 柴心玉等, 2002. 1998—1999 年春秋季节渤海中部及其邻近海域叶绿素 *a* 浓度及初级生产力估算. 生态学报, 23(3): 517—526
- 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系. 海洋与湖沼, 35(3): 246—251
- 吴增茂, 谢红琴, 张志南等, 2004. 海洋生态预报的复杂性与研究方法的讨论. 地球科学进展, 19(1): 81—86
- 邹景忠, 董丽萍, 秦保平, 1983. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学, 2(2): 41—53
- 郑丙辉, 秦延文, 孟 伟等, 2007. 1985—2003 年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析. 环境科学, 28(3): 494—499
- 俞光耀, 吴增茂, 张志南, 1999. 胶州湾北部水层生态动力学模型与模拟: I. 胶州湾北部水层生态动力学模型. 青岛海洋大学学报, 29(3): 421—428
- 费尊乐, 毛兴华, 朱明远等, 1988. 渤海生产力研究 I. 叶绿素 *a* 的分布特征与季节变化. 海洋学报, 10(1): 99—106
- 秦延文, 孟 伟, 郑丙辉等, 2005. 渤海湾水环境氮、磷营养盐分布特点. 海洋学报, 27(2): 173—176
- 高会旺, 王 强, 2004. 1999 年渤海浮游植物生物量的数值模拟. 中国海洋大学学报, 34(5): 867—873
- 黄良民, 谭焯辉, 黄小平等, 2002. 近海赤潮发生与环境条件之间的关系. 海洋环境科学, 21(4): 63—69
- 魏 皓, 赵 亮, 武建平, 2001. 浮游植物动力学模型及其在海域富营养化研究中的应用. 地球科学进展, 16(2): 220—225
- Ornolf sdottir E B, 2004. Nutrient pulsing as a regulator of phytoplankton abundance and community composition in Galveston Bay, Texas. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 303: 197—220

## ENVIRONMENTAL FACTORS AFFECTING CHLOROPHYLL-*a* CONCENTRATION IN THE BOHAI BAY

YANG Jing, LI Hai, LIU Qin-Zheng, HE En-ye, REN Xiang-Xiang  
(National Marine Environmental Forecast Center, Beijing, 100081)

**Abstract** On the basis of observed data in the Lujia River red tide monitoring area of the Bohai Bay during the summer of 2006, the correlations between physical, chemical, meteorological factors and chlorophyll-*a* were analyzed. It was shown that the phosphate, silicate, dissolved oxygen and pH had a close relationship with the concentration of chlorophyll-*a*. The multivariate regression analysis showed that the main factors affecting the concentration of chlorophyll-*a* in the Bohai Bay were phosphate and dissolved oxygen. This study was helpful in developing statistical and ecosystem model for chlorophyll-*a* prediction in the Bohai Bay.

**Key words** The Bohai Bay, Chlorophyll-*a*, Correlation, Multivariate regression analysis, Environmental factors