

# 泉州湾赤潮藻类优势种细胞密度回归方程研究\*

江兴龙<sup>1,2</sup> 宋立荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所 武汉 430072; 2. 集美大学 厦门 361021)

**提要** 于 2006 年 5—11 月对东海泉州湾赤潮监控区四个监测站位开展赤潮常规监测。根据监测结果, 分别以各站位 23 项水质理化生物环境因子指标为自变量, 相应赤潮藻类优势种的细胞密度为因变量, 进行多元逐步回归分析, 建立了各站位优势种中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)和旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)等的细胞密度多参量回归方程。结果表明, 所有回归方程的复相关系数都接近于 1, 方差分析的结果均为回归极显著, 表明所建立的回归方程可作为相应赤潮优势种细胞密度预报方程的高度有效性, 将对今后泉州湾的赤潮预报提供良好的指导作用。

**关键词** 泉州湾, 赤潮生物, 逐步回归分析, 回归方程, 赤潮预报

**中图分类号** X834; X173

赤潮已成为制约海洋可持续发展的严重环境问题之一, 引起了全球广泛关注(Zingone *et al.*, 2000; Batoreu *et al.*, 2005)。赤潮发生原因众多且因种而异(周名江等, 2001), 人类活动所带来的水体富营养化, 即氮磷含量增高为赤潮的发生提供了物质条件(Hodgkiss *et al.*, 1997; Hallegraeff, 1993; Zou *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2003)。但富营养化程度只是引发赤潮的最基本的必要条件, 并不是呈恒定的正相关关系(章守宇等, 2001; 韩秀荣等, 2003; 张传松等, 2003)。海水中赤潮生物的含量及其变化趋势是预测赤潮灾害的重要因子(张利永等, 2004)。海洋浮游微藻是引发赤潮的主要生物, 形成赤潮的浮游藻类以甲藻类和硅藻类所占的种类最多(周名江, 1999; 邹景忠, 1992; 石岩峻, 2004<sup>1)</sup>)。每一类赤潮生物与环境因子的相互关系各不相同, 有它们自身的特点(周名江等, 2001), 多元逐步回归统计可以筛选出相对重要的影响因子(陈宇炜等, 2001)。多元统计方法能够综合

分析引发赤潮发生的多个因子, 对于赤潮预报显示出较强的能力(王修林等, 2003)。随着经济的发展, 我国沿海赤潮频发, 尤其是东海在中国四大海区中赤潮发生情况最严重, 东海赤潮发生数占全国总赤潮数的 45%, 而且赤潮爆发的时间和面积也在不断增长变大, 危害加剧(王修林等, 2004)。

作者于 2006 年 5—11 月对东海泉州湾赤潮监控区开展赤潮常规监测(江兴龙等, 2009), 本研究应用该海域赤潮藻类优势种细胞密度及水质理化生物因子等数据, 经多元逐步回归分析, 建立泉州湾赤潮藻类优势种各种群的细胞密度多参量回归方程, 为今后该海域的赤潮预报预警服务。

## 1 材料与方法

### 1.1 地点

东海泉州湾地处福建东南沿海, 位于 24°46'18"—24°51'33"N, 118°46'51"—118°50'03"E, 海湾面积

\* 福建省海洋与渔业局重点项目赤潮监测专项经费资助, 闽海渔函 200677 号; NSFC-云南联合基金: 滇池蓝藻水华时空演替及驱动机制研究项目资助, U0833604 号; 中国科学院重大交叉项目: 富营养化水体蓝藻水华发生与致灾的关键过程及其监测指标体系项目资助, KZCX1-YW-14-1 号。江兴龙, 副教授, 博士, 博士后, E-mail: xinlongjiang@hotmail.com

1) 石岩峻, 2004. 赤潮藻对营养盐的吸收及生长和相关特性研究. 北京: 北京化工大学博士学位论文

通讯作者: 宋立荣, 研究员, 博士生导师, E-mail: LRSong@ihb.ac.cn

收稿日期: 2009-10-29, 收修改稿日期: 2009-12-23

189.0km<sup>2</sup>, 水面面积 138.5km<sup>2</sup>, 滩涂面积 88km<sup>2</sup>。泉州湾是晋江入海口, 北侧还有洛阳江流入, 年均径流量  $1.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。这些水系的注入为泉州湾带来大量有机质和营养盐(卢振彬等, 2005)。

### 1.2 监测站位、时段及频率

在泉州湾赤潮多发海域(赤潮监控区)布设了 4 个监测站位: S1(118°39'37"E, 24°49'18"N)、S2(118°40'42"E, 24°51'43"N)、S3(118°43'21"E, 24°50'20"N)、S4(118°48'26"E, 24°51'16"N)。其中 S1 站位地处晋江入海口区, S2 站位地处洛阳江入海的河口区。监测时段为 5—10 月。监测频率为每月 2 次。

### 1.3 常规监测项目及分析方法

水文要素: 表层水温—表层水温表法, 透明度—目视法(国家海洋局, 1998a)。

气象要素: 风速、风向、气压、气温、光照(晴天, 阴天)(国家海洋局, 1991)。

水化学要素: pH 值—pH 计法、盐度—盐度计法、溶解氧—碘量法、叶绿素 *a*—分光光度法、化学需氧量—碱性高锰酸钾法、活性磷酸盐—磷钼蓝分光光度法、亚硝酸盐氮—萘乙二胺分光光度法、硝酸盐氮—锌镉还原法、氨氮—靛酚蓝分光光度法、活性硅酸盐—硅钼黄法(国家海洋局, 1998a)。

生物学要素: 粪大肠菌群—发酵法、弧菌—平板计数法; 浮游植物细胞总数(cell/L)、优势种及细胞数量(cell/L)—一个体计数法(国家海洋局, 1998b, 2005)。

### 1.4 水样采集

用有机玻璃采水器采集海水表层(水下 0.5m)水样。用于浮游植物定量分析的水样, 样品以 5% 甲醛固定保存, 采用浓缩计数法对浮游植物进行定量计数。水样的采集、处理、按《海洋监测规范》执行(国家海洋局, 1998c)。

### 1.5 数据统计分析

应用 SAS 软件(V9.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.)进行多元逐步回归分析, 以各监测站位的 23 项理化生物因子指标为自变量, 赤潮藻类优势种各种群的细胞密度为因变量, 在逐步回归过程中, 视情况选择临界值 0.15—0.25 的显著水平筛选自变量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浮游植物优势种的组成

各站位的优势种, 以各站位每航次所采水样中, 浮游植物的第一优势种的种类组成。以样品中某种藻类的细胞密度(细胞数量/L)占样品中总藻类细胞密度

(细胞数量/L)的比值为某种藻类的优势度。

S1 站位优势种为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve 1900);

S2 站位的优势种有中肋骨条藻; 太平洋海链藻(*Thalassiosira pacifica* Gran & Angst 1931); 微小原甲藻(*Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller 1933)。中肋骨条藻细胞密度达  $10^7$  个/L 时, 即可判断为赤潮(国家海洋局, 2005), 在 7 月初, 中肋骨条藻细胞密度达  $1.8 \times 10^7$  个/L, 发生了中肋骨条藻赤潮;

S3 站位的优势种有中肋骨条藻和太平洋海链藻。在 8 月初, 中肋骨条藻细胞密度达  $2.09 \times 10^7$  个/L, 发生了中肋骨条藻赤潮;

S4 站位的优势种有中肋骨条藻; 尖刺拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens* (Grunow & Cleve) Hasle 1965); 丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus* Cleve 1889); 旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus* Cleve 1889)。

据《赤潮监测技术规程》(国家海洋局, 2005), 上述四个站位的浮游植物优势种均属于赤潮生物。

### 2.2 优势种各种群细胞密度与环境因子的逐步回归分析

以各监测站位的 23 项理化生物因子指标为自变量: 水温 WT、盐度 Sali、pH、透明度 SDV、溶解氧 DO、化学需氧量 COD、氨氮 TAN、亚硝态氮 NO<sub>2</sub>-N、硝态氮 NO<sub>3</sub>-N、活性磷酸盐 DIP、活性硅酸盐 DISi、叶绿素 *a* Chl-*a*、粪大肠菌群 FC、弧菌 Vibr、溶解氧饱和度 DOFP、无机氮 DIN、氨氮与 DIN 之比 TDR、亚硝态氮与硝态氮之和与 DIN 之比 NDR、无机氮磷(摩尔)比 NPR、无机硅氮(摩尔)比 SiNR、无机硅磷(摩尔)比 SiPR、营养指数 E(国家海洋局, 2005)、有机污染指数 A(国家海洋局, 2005)等; 以赤潮藻类优势种各种群的细胞密度为因变量; 进行多元逐步回归分析。

**2.2.1 S1 站位的逐步回归分析** 据偏相关系数和回归方程的偏回归系数(表 1), S1 站位优势种中肋骨条藻的细胞密度, 主要受 8 个环境因子的影响, 依次为 pH 正相关、SDV 正相关、DO 正相关、FC 正相关、NO<sub>2</sub>-N 负相关、TDR 正相关、Vibr 负相关、WT 负相关, 尤其受 pH 正相关的影响, 由于中肋骨条藻胞外碳酸酐酶最强, 对无机碳的利用也可能主要依赖于胞外碳酸酐酶(Rost *et al.*, 2003), 在高 pH 条件下其胞外碳酸酐酶的活性最强, 因而生长最佳。环境中 pH 的改变显著影响中肋骨条藻胞外碳酸酐酶的活性, 并因此影响该藻细胞对无机碳的利用及其生长增殖

(石岩峻, 2004<sup>1)</sup>)。因为 S1 站位处于河口区, 受沿岸冲淡水的影响, 水质的 pH 波动较大, 故中肋骨条藻种群增殖主要受 pH 正相关影响。回归方程的复相关系数趋于 1, 表明极高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

**2.2.2 S2 站位的逐步回归分析** S2 站位的优势种有中肋骨条藻、太平洋海链藻、微小原甲藻, 与其相对应建立了三个回归方程(表 1)。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响中肋骨条藻细胞密度的 10 个环境因子, 依次为 Chl-*a* 正相关、NPR 负相关、pH 负相关、DOFP 负相关、NO<sub>2</sub>-N 负相关、DIP 正相关、Sali 负相关、WT 负相关、TAN 正相关、SiPR 正相关, 尤其受叶绿素 *a* 正相关的影响, 海水中叶绿素 *a* 含量是衡量浮游植物生物量的一种指标(王朝晖等, 2001), 由于 S2 站位中肋骨条藻的细胞密度占浮游植物细胞密度的 95%, 因此海水中叶绿素 *a* 的高低与其细胞数量密切相关。回归方程的复相关系数等于 1.0000, 表明几乎完全相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响太平洋海链藻细胞密度的 10 个环境因子, 依次为 TDR 正相关、TAN 负相关、SDV 正相关、DIP 负相关、NO<sub>3</sub>-N 正相关、pH 正相关、Chl-*a* 负相关、SiNR 负相关、FC 负相关、COD 负相关, 尤其受 TDR 正相关的影响。回归方程的复相关系数等于 1.0000, 表明几乎完全相关, 且方差分析结果回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响微小原甲藻细胞密度的 10 个环境因子, 依次为 SiNR 正相关、NO<sub>3</sub>-N 负相关、NO<sub>2</sub>-N 正相关、NDR 正相关、Vibr 正相关、Chl-*a* 负相关、NPR 正相关、WT 正相关、DIP 正相关、pH 负相关, 尤其受 SiNR 正相关、NO<sub>3</sub>-N 负相关的影响, 表明微小原甲藻的种群增殖倾向于无机硅氮比较高, 及硝态氮浓度较低的水质环境。回归方程的复相关系数等于 1.0000, 表明几乎完全相关, 且方差分析结果回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

**2.2.3 S3 站位的逐步回归分析** S3 站位的优势种有中肋骨条藻及太平洋海链藻, 与其相对应建立了二个逐步回归方程(表 2)。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响中肋骨条藻细胞密度的 4 个环境因子, 依次为 Chl-*a* 正相关、TAN 负相关、DIP 负相关、DOFP 负相关, 尤其受叶绿素 *a* 正相关的影响, 由于 S3 站位中肋骨条藻的细胞密度占浮游植物总细胞密度的 97.5%, 因此海水中叶绿素 *a* 的高低与其细胞数量密切相关。回归方程的复相关系数趋于 1, 表明极高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响太平洋海链藻细胞密度的 3 个环境因子, 依次为 NO<sub>2</sub>-N 正相关、SDV 正相关、DIN 负相关, 尤其受 NO<sub>2</sub>-N 正相关的影响, 表明太平洋海链藻的细胞密度主要与海水中亚硝态氮的浓度正相关。回归方程复相关系数为 0.8224, 表明高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

**2.2.4 S4 站位的逐步回归分析** S4 站位的优势种有中肋骨条藻、尖刺拟菱形藻、丹麦细柱藻、旋链角毛藻, 与其相对应建立了四个逐步回归方程(表 2)。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响中肋骨条藻细胞密度的 3 个环境因子, 依次为 Chl-*a* 正相关、COD 负相关、有机污染指数 A 正相关, 尤其受叶绿素 *a* 正相关的影响, 由于 S4 站位中肋骨条藻的细胞密度占浮游植物总细胞密度的 90%, 因此海水中叶绿素 *a* 的高低与其细胞数量密切相关。回归方程的复相关系数趋于 1, 表明极高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响尖刺拟菱形藻细胞密度的 10 个环境因子, 依次为 NO<sub>2</sub>-N 正相关、营养指数 E 负相关、Chl-*a* 负相关、SDV 正相关、COD 正相关、WT 正相关、DIP 正相关、NPR 正相关、TDR 正相关、FC 负相关, 尤其受 NO<sub>2</sub>-N 正相关及营养指数 E 负相关的影响, 表明, 尖刺拟菱形藻的种群增殖倾向于亚硝态氮浓度较高, 及富营养化程度相对较低的水质环境。回归方程的复相关系数为 1.0000, 表明几乎完全相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响丹麦细柱藻细胞密度的 5 个环境因子, 依次为 pH 负相关、NPR 负相关、Chl-*a* 正相关、DIP 负相关、FC 负相关, 尤其受 pH 负相关及 NPR 负相关的影响, 表明, 丹麦细柱藻的种群增殖倾向于 pH 较低, 及无机氮磷比值较

1) 石岩峻, 2004. 赤潮藻对营养盐的吸收及生长和相关特性研究. 北京: 北京化工大学博士学位论文

表 1 S1 与 S2 站位优势种细胞密度与水质因子的逐步回归分析

Tab.1 Stepwise regression analyses among cell densities of the dominant algae and water quality parameters at the S1 and the S2 sampling station

站位	入选变量	偏相关系数 $R^2$	逐步回归方程	复相关系数 $R^2$	$P$ 值
S1	1 pH	0.7720	RTOSD = - 804.5 - 0.728WT + 49.58SDV +	0.9994	<0.0001
	2 SDV	0.0720	90.67pH + 12.29DO - 360NO <sub>2</sub> -N + 49.92TDR +		
	3 DO	0.0705	1.85FC - 2.06Vbri		
	4 FC	0.0441			
	5 NO <sub>2</sub> -N	0.0264			
	6 TDR	0.0098			
	7 Vibr	0.0025			
	8 WT	0.0020			
S2	1 Chl- <i>a</i>	0.9661	RTOSD = 63.17 - 0.305WT - 6.95pH -	1.0000	0.0025
	2 NPR	0.0254	0.213Sali - 0.103DOFP + 3.98TAN -		
	3 pH	0.0036	220.5NO <sub>2</sub> -N + 580.9DIP - 0.00196NPR +		
	4 DOFP	0.0025	0.00262SiPR + 2.43Chl- <i>a</i>		
	5 NO <sub>2</sub> -N	0.0013			
	6 DIP	0.0008			
	7 Sali	0.0004			
	8 WT	0.0001			
	9 TAN	0.0000			
	10 SiPR	0.0000			
S2	1 TDR	0.4147	RTOTD = - 17.73 + 2.56SDV + 1.74pH -	1.0000	0.0025
	2 TAN	0.1961	0.0121COD - 6.98TAN + 2.74NO <sub>3</sub> -N +		
	3 SDV	0.1263	18.18TDR - 62.05DIP - 0.217SiNR -		
	4 DIP	0.1210	0.0454Chl- <i>a</i> - 0.0154FC		
	5 NO <sub>3</sub> -N	0.0664			
	6 pH	0.0524			
	7 Chl- <i>a</i>	0.0159			
	8 SiNR	0.0030			
	9 FC	0.0006			
	10 COD	0.0000			
S2	1 SiNR	0.2889	RTOPRD = - 3.85 + 0.024WT - 0.049Ph +	1.0000	0.0059
	2 NO <sub>3</sub> -N	0.2074	23.95NO <sub>2</sub> -N - 0.504NO <sub>3</sub> -N + 3.74NDR +		
	3 NO <sub>2</sub> -N	0.1617	2.46DIP + 0.000008NPR + 0.188SiNR -		
	4 NDR	0.1437	0.0131Chl- <i>a</i> + 0.182Vibr		
	5 Vibr	0.1069			
	6 Chl- <i>a</i>	0.0290			
	7 NPR	0.0283			
	8 WT	0.0041			
	9 DIP	0.0012			
	10 pH	0.0001			

注：中肋骨条藻细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOSD)、太平洋海链藻细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOTD)、微小原甲藻细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOPRD)、水温( ) (WT)、盐度(Sali)、透明度(m)(SDV)、溶解氧(mg/L)(DO)、化学需氧量(mg/L)(COD)、氨氮(mg/L)(TAN)、亚硝态氮(mg/L)(NO<sub>2</sub>-N)、硝态氮(mg/L)(NO<sub>3</sub>-N)、活性磷酸盐(mg/L)(DIP)、活性硅酸盐(mg/L)(DISi)、叶绿素 *a*( $\mu$ g/L)(Chl-*a*)、粪大肠菌群( $10^3$ 个/L)(FC)、弧菌( $10^3$ CFU/ml)(Vibr)、溶解氧饱和度(%) (DOFP)、无机氮(mg/L)(DIN)、TAN/DIN(TDR)、(NO<sub>2</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N)/DIN (NDR)、DIN(mol)/DIP(mol) (NPR)、DISi(mol)/DIN(mol) (SiNR)、DISi(mol)/DIP(mol) (SiPR)

低的水质环境。回归方程的复相关系数趋于 1, 表明极高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预报方程。

据偏相关系数和偏回归系数, 影响旋链角毛藻细胞密度的 2 个环境因子, 依次为 DO 正相关、SiPR 正相关, 尤其受 DO 正相关的影响, 表明, 旋链角毛藻的种群增殖倾向于溶解氧较高的水质环境。回归方程的复相关系数为 0.9116, 表明高度相关, 并且方差分析结果为回归极显著, 因此该回归方程可作为预

报方程。

### 2.3 赤潮多参量回归方程的科学建立

随着赤潮成因及预报研究的发展, 多元统计分析方法在赤潮数值分析研究中得到了广泛的运用 (Quchi *et al*, 1981, 1984; 霍文毅等, 1999; 黄奕华等, 1997; 齐雨藻等, 1991), 并在赤潮预测预报中发挥了重要作用 (齐雨藻等, 1991; Quchi, 1984; Quchi *et al*, 1984; Kaito *et al*, 1985)。当前赤潮预测常用的多元统计分析方法, 主要有判别分析、主成分分析、逐步回

表 2 S3 与 S4 站位优势种细胞密度与水质因子的逐步回归分析

Tab.2 Stepwise regression analyses among cell densities of the dominant algae and water quality parameters at the S3 and the S4 sampling station

站位	入选变量	偏相关系数 $R^2$	逐步回归方程	复相关系数 $R^2$	P 值
S3	1 Chl- <i>a</i>	0.9867	RTOSD = 67.30 - 0.264DOFP - 12.62TAN -	0.9958	<0.0001
	2 TAN	0.0040	1845DIP + 2.13Chl- <i>a</i>		
	3 DIP	0.0026			
	4 DOFP	0.0025			
S3	1 NO <sub>2</sub> -N	0.5070	RTOTD = - 0.554 + 0.519SDV + 12.18NO <sub>2</sub> -N	0.8224	0.0023
	2 SDV	0.2040	- 0.174DIN		
	3 DIN	0.1114			
S4	1 Chl- <i>a</i>	0.7885	RTOSD = 10.97 - 54.79COD + 3.81Chl- <i>a</i> +	0.9791	<0.0001
	2 COD	0.1220	2.97A		
	3 A	0.0686			
S4	1 NO <sub>2</sub> -N	0.3491	RTOPSD = - 6.98 + 0.126WT + 1.62SDV +	1.0000	0.0051
	2 E	0.2827	1.25COD + 47.9NO <sub>2</sub> -N + 0.569TDR +		
	3 Chl- <i>a</i>	0.0943	65.1DIP + 0.00179NPR - 0.0437Chl- <i>a</i> -		
	4 SDV	0.0909	0.0229FC - 0.745E		
	5 COD	0.0687			
	6 WT	0.0683			
	7 DIP	0.0256			
	8 NPR	0.0119			
	9 TDR	0.0076			
	10 FC	0.0008			
S4	1 pH	0.2930	RTOLD = 7.95 - 0.942pH - 14.3DIP -	0.9459	0.0010
	2 NPR	0.2749	0.00281NPR + 0.0378Chl- <i>a</i> - 0.101FC		
	3 Chl- <i>a</i>	0.1472			
	4 DIP	0.1221			
	5 FC	0.1087			
S4	1 DO	0.8497	RTOCD = - 3.075 + 0.46DO + 0.00241SiPR	0.9116	<0.0001
	2 SiPR	0.0619			

注: 中肋骨条藻细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOSD)、太平洋海链藻细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOTD)、尖刺拟菱形藻种群细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOPSD)、丹麦细柱藻种群细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOLD)、旋链角毛藻种群细胞密度( $10^5$ cells/L)(RTOCD)、水温(°C)(WT)、盐度(Sali)、透明度(m)(SDV)、溶解氧(mg/L)(DO)、化学需氧量(mg/L)(COD)、氨氮(mg/L)(TAN)、亚硝态氮(mg/L)(NO<sub>2</sub>-N)、硝态氮(mg/L)(NO<sub>3</sub>-N)、活性磷酸盐(mg/L)(DIP)、活性硅酸盐(mg/L)(DISi)、叶绿素 *a* ( $\mu$ g/L)(Chl-*a*)、粪大肠菌群( $10^3$ 个/L)(FC)、溶解氧饱和度(%) (DOFP)、无机氮(mg/L)(DIN)、TAN/DIN (TDR)、DIN(mol)/DIP(mol) (NPR)、DISi(mol)/DIP(mol) (SiPR)、营养指数(E)、有机污染指数(A)

归分析及灰关联分析法等。黄奕华等(1997)验证了应用主成分分析法预测赤潮发生预报的可行性和有效性。判别分析法显示出预测赤潮的可行性,但在选择变量因子上仍然存有一定的盲目性(王修林等, 2003),目前应用较多的线性判别方程不能准确揭示各环境因子对赤潮发生的影响(霍文毅等, 1999)。多元逐步回归统计可以筛选出对藻类相对重要的影响因子(陈宇炜等, 2001)。黄伟建等(2001)对拟尖刺菱形藻的种群增殖与各海水理化因子间的关系进行灰关联分析,模型值与测量值较相吻合。本研究中建立各优势种细胞密度的回归方程的复相关系数普遍较高,有的甚至高达 1.0000,表明回归方程可作为预报方程的高度有效性。这是由于本研究考虑了赤潮藻类种群动力学及赤潮发生机理可能涉及的环境物理化学及生物因子,使可用于逐步回归方程筛选的自变量达 23 个,高于其它学者通常选取的十几个因子。只有综合考虑赤潮生态发育过程和环境参量,选择恰当的表征赤潮的因子,才有可能对赤潮做出准确预报(丛丕福等, 2008)。此外,由于赤潮发生的原因比较复杂,涉及的环境影响因子较多(周名江等, 2001),因此在逐步回归过程中,视情况适当地扩大引入自变量时的显著水平  $P$  值,如可从 0.15 放宽到 0.2 甚至 0.25,从而使引入方程的自变量增多,使回归方程的复相关系数增大,有助于提高回归方程作为预报方程的预测精度。

### 3 结语

以 23 项水质理化生物环境因子指标为自变量,赤潮藻类优势种各种群的细胞密度为因变量,进行多元逐步回归分析,建立了泉州湾赤潮藻类优势种中肋骨条藻、太平洋海链藻、微小原甲藻、尖刺拟菱形藻、丹麦细柱藻和旋链角毛藻等的细胞密度多参量回归方程,回归方程的复相关系数普遍较高,有的甚至高达 1.0000,表明回归方程可作为赤潮预报方程的高度有效性,有助于对泉州湾今后赤潮的预报提供指导。

### 参 考 文 献

王修林, 孙 霞, 韩秀荣等, 2004. 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构及分布特征的比较. 海洋与湖沼, 35(4): 323—331

王修林, 孙培艳, 高振会等, 2003. 中国有害赤潮预测方法研究现状和进展. 海洋科学进展, 21(1): 93—98

王朝晖, 陈菊芳, 徐 宁等, 2001. 大亚湾甲藻种群的季节变化与环境条件的关系. 生态学报, 21(11): 1825—1832

卢振彬, 杜 琦, 许翠娅等, 2005. 福建泉州湾贝类养殖容量评估. 热带海洋学报, 24(4): 22—29

丛丕福, 张丰收, 曲丽梅, 2008. 赤潮灾害监测预报研究综述. 灾害学, 23(2): 127—130

齐雨藻, 黄伟建, 邱璇鸿, 1991. 大鹏湾夜光藻种群动态的时间序列模型. 暨南大学学报, 12(3): 96—103

江兴龙, 宋立荣, 2009. 泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨. 海洋与湖沼, 40(6): 761—767

邹景忠, 1992. 赤潮生物与赤潮灾害研究. 见: 曾呈奎主编. 中国海洋科学研究与开发. 青岛: 青岛出版社, 284—287

张传松, 王修林, 石晓勇等, 2003. 东海赤潮高发区 COD 和石油烃分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究. 应用生态学报, 14(7): 1093—1096

张利永, 刘东艳, 孙 军等, 2004. 胶州湾女姑山水域夏季赤潮高发期浮游植物群落结构特征. 中国海洋大学学报, 34(6): 997—1002

陈宇炜, 秦伯强, 高锡云, 2001. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 13(1): 63—71

国家海洋局, 1991. 海洋调查规范 GB 12763.3-1991. 北京: 中国标准出版社, 1—23

国家海洋局, 1998a. 海洋监测规范 GB 17378.4-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—182

国家海洋局, 1998b. 海洋监测规范 GB 17378.7-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—86

国家海洋局, 1998c. 海洋监测规范 GB 17378.3-1998. 北京: 中国标准出版社, 1—13

国家海洋局, 2005. 赤潮监测技术规程 HY/T069-2005. 北京: 中国标准出版社, 1—58

周名江, 1999. 赤潮藻毒素研究进展. 中国海洋药物, 18(3): 48—54

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

黄伟建, 黄贵虹, 陈菊芳等, 2001. 大鹏湾春季海水理化因素与拟尖刺菱形藻种群密度的灰色系统模型研究. 海洋环境科学, 20(4): 13—17

黄奕华, 楚建华, 齐雨藻, 1997. 南海大鹏湾盐田海域骨条藻数量的多元分析. 海洋与湖沼, 28(2): 121—127

章守宇, 邵君波, 戴小杰, 2001. 杭州湾富营养化及浮游植物多样性问题的探讨. 水产学报, 25(6): 512—517

韩秀荣, 王修林, 孙 霞等, 2003. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究. 应用生态学报, 14(7): 1097—1101

霍文毅, 郝建华, 俞志明等, 1999. 有害赤潮数值分析研究进展. 海洋与湖沼, 30(5): 568—574

Batoreu M C C, Dias E, Pereira P *et al*, 2005. Risk of human exposure to paralytic toxins of algal origin. Environmental Toxicology and Pharmacology, 19: 401—406

Hallegraef G M, 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. Phycologia, 32: 79—99

Hodgkiss I J, Ho K C, 1997. Are changes in N: P ratios in coastal

- waters the key to increased red tide blooms? *Hydrobiologia*, 352: 141—147
- Huang X, Huang L, Yue W, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Mar Pollu Bull*, 47: 30—36
- Kaito S, Hirobe H, Maegawa T, 1985. On the essential sea water parameters to discriminant between red tide and non red tide by discriminant analysis. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 51(1): 1—12
- Quchi A, 1984. Prediction of red tide occurrence by means of discriminant analysis. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 50(10): 1647—1651
- Quchi A, Takayama H, 1981. A red tide map study by the principal component analysis. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 47(10): 1275—1279
- Quchi A, Takayama H, 1984. Prediction of *Gymnodinium* type 65 red tide by means of red tide map. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 50(7): 1201—1205
- Rost B, Riebesell U, Burkhardt S *et al*, 2003. Acquisition of bloom-forming marine phytoplankton. *Limnol Oceanogr*, 48: 55—67
- Zingone A, Enevoldsen H O, 2000. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. *Ocean and Coastal Management*, 43: 725—748
- Zou L, Zhang J, Pan W *et al*, 2001. *In situ* nutrient enrichment experiment in the Bohai and Yellow Sea. *J Plank Res*, 23(10): 1111—1119

## FORECAST EQUATIONS FOR CELL DENSITY OF THE DOMINANT RED-TIDE ALGAE AT THE QUANZHOU BAY

JIANG Xing-Long<sup>1, 2</sup>, SONG Li-Rong<sup>1</sup>

(1. *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072*; 2. *Jimei University, Xiamen, 361021*)

**Abstract** Red-tide routine monitoring at the Quanzhou Bay, East Sea, was implemented at four sampling stations from May to November, 2006. There were six types of dominant red-tide algae: *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira pacifica*, *Prorocentrum minimum*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Leptocylindrus danicus* and *Chaetoceros curvisetus*. Based on the red-tide routine monitoring results, multi-parameter regression equations were established by stepwise regression analysis, with totally 23 kinds of environmental, physical, chemical and biological factors as the independent variables, and cell densities of individual dominant red-tide algae as the dependant variables. All multiple correlation coefficients of these multi-parameter regression equations were close to 1.0000, and the results of variance analysis for each of regression equations showed that the correlation was significant. Therefore, these multi-parameter regression equations will be useful forecast equations for forecasting cell densities of the dominant red-tide algae at the Quanzhou Bay in the future.

**Key words** Quanzhou Bay, Red-tide organisms, Stepwise regression analysis, Regression equations, Red-tide forecast