

## 凡纳滨对虾养殖塘叶绿素 a 与水质因子的多元回归分析

江敏<sup>1\*</sup>, 余根鼎<sup>1</sup>, 戴习林<sup>1</sup>, 刘利平<sup>1</sup>,  
顾德平<sup>2</sup>, 胡伟国<sup>3</sup>, Diana James S<sup>4</sup>

(1. 上海海洋大学农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306;

2. 上海市奉贤区农业委员会, 上海 201400;

3. 上海市奉贤区水产技术推广站, 上海 201400;

4. 密西根大学自然资源与环境学院, 美国 密西根 48109-1115)

**摘要:** 2009年4-9月期间,对上海市奉贤区某凡纳滨对虾养殖场22个养殖池塘水体叶绿素a、水温、pH、溶解氧、透明度、悬浮物(SS)、总有机碳(TOC)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)等15项水质因子进行测定。取164组测定数据,进行描述性统计,分析叶绿素a与各项因子的相关性系数。分析结果显示,与叶绿素a呈极显著线性正相关的水质因子为SS、TOC、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TN、TP;呈显著正相关的为DO;而叶绿素a与透明度呈极显著线性负相关,与PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P呈显著线性负相关;与水温、pH、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>3</sub>-N则未呈现显著相关性。根据多元线性回归选择自变量的原则,选择了TOC、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P和TP4项水质因子,建立了叶绿素a与4项水质因子的逐步回归模型: $Chl. a = -0.0545 + 0.00349 TOC + 0.0153 TN - 0.418 PO_4^{3-} - P + 0.276 TP (r = 0.7155)$ 。利用偏回归系数检验各水质因子对叶绿素a的影响,结果表明,对叶绿素a影响从大到小依次是TP、TOC、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P和TN。研究结果对进一步探讨养殖池塘生态系统的变化规律及水环境质量保护提供了依据。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 叶绿素a; 水质因子; 相关性分析; 多元逐步回归分析

**中图分类号:** S 968.22

**文献标识码:** A

浮游藻类是水产动物直接或间接的饵料基础,是水生态系统中的生产者,决定着特定水域的生产性能。水中藻类的种类和数量影响着池塘水质,也影响养殖动物的健康。高密度凡纳滨对虾养殖过程时常会出现池塘水质下降、藻类暴发的现象,有些浮游藻类能分泌出毒素危害对虾生长,有些则会导致养殖动物产生土腥异味而影响食用口感<sup>[1]</sup>。

湖泊等天然水域中藻类大量繁殖造成的富营养化问题日益严重,叶绿素a作为水体中藻类数量的表征早已受到广泛的关注。国内外学者研究表明,叶绿素a与水体中总氮、总磷等主要水环境因子具有相关性<sup>[2-4]</sup>。养殖池塘中叶绿素a与无

机磷、pH、化学耗氧量等相关研究也较少<sup>[5]</sup>。池塘水生态环境具有复杂、多因素等特点,用单因素统计法往往难以有效地分析池塘养殖研究中出现的问题<sup>[6]</sup>。本研究试图通过分析养殖池塘水质生态因子数据,建立叶绿素a和主要水质因子之间的数学模型,探讨影响对虾养殖塘中藻类生长的因素,旨在对凡纳滨对虾养殖池塘生态环境的保护和最佳池塘养殖条件的寻求提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 凡纳滨对虾养殖概况

试验于2009年4月至9月在上海奉贤区一养殖场进行,选取22个池塘,每个池塘面积为

收稿日期:2010-04-13 修回日期:2010-09-11

资助项目:美国ACRSP项目(09BMA05UM);上海市农委推广项目[沪农科推字(2008)第5-1号];上海市教委重点学科建设项目(J50701)

通讯作者:江敏, E-mail: mjiang@shou.edu.cn

4 000 m<sup>2</sup>,池塘深 2 m,有效水深 1.2 m 左右。每个池塘配备 3 台 1.5 kW 水车式增氧机,每天早、晚各开启 4 h。养殖用水为天然河水,经过滤沉淀处理后用于养殖。对虾放养密度为 75 ind/m<sup>2</sup>。养殖期间投喂配合饲料,早晨 5 时、下午 16 时和晚 20 时各投一次,三餐均量。

## 1.2 试验方法

每两周采样一次,采样时间为上午 9:00 至 10:00,取 0.5 m 水层处水样进行分析。现场记录采样时间、气象条件、水体物理指标(水温、水色、透明度);监测水温、pH、溶解氧 DO、透明度、悬浮物 SS、总有机碳 TOC、五日生化需氧量 BOD<sub>5</sub>、高锰酸盐指数 COD<sub>Mn</sub>、亚硝酸盐氮 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、硝酸盐氮 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、氨氮 NH<sub>3</sub>-N、总氮 TN、活性磷 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、总磷 TP 等水质指标。具体方法参照地表水和污水监测技术(HJ/T 52-1999)<sup>[7]</sup>和环境质量标准(GB 3838-2002)<sup>[8]</sup>。叶绿素 a 按热乙醇萃取分光光度法测定<sup>[9]</sup>。主要实验仪器包括:日本岛津 TOC-VCPH 非色散红外吸收总有机碳测定仪、美国 HACH BODTrak<sup>TM</sup>生化需氧量分析系统、美国

DIONEX 离子色谱 ICS1500、紫外可见分光光度计 752N、生化培养箱、水浴恒温锅等。

## 1.3 多元回归分析

选取 22 个池塘的 164 组数据进行统计分析。利用 Minitab 对各组数据进行描述性统计,并做多元逐步回归分析,再利用 SAS 对多元回归模型的参数进行假设检验。

## 2 结果

### 2.1 池塘水环境因子检测数据描述性统计

表 1 为 22 个凡纳滨对虾池塘 17 项指标 164 组水质检测数据的描述性统计结果,由表 1 可知,水温和 pH 变异系数分别为 13.4% 和 5.8%,数据离散程度小。其他数据变异系数较大,这表明不同养殖塘或同一养殖池塘不同养殖时期水环境差别较大。比较均值和中位数可知,除 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>3</sub>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的均值和中位数差异分别为 37%、30% 和 48%,其余 11 个水质因子的中位数都接近其平均值,离群的观测数组数据比较少。

表 1 水质因子描述性统计结果  
Tab.1 Results of descriptive statistics of aquatic ecological factors

因子 factors	变化范围 range	标准差 STDEV	平均值 mean	变异系数(%) CFVAR	下四分位数 lower quartile	中位数 median	上四分位数 upper quartile
水温(°C) temperature	27.45 ~ 35.30	3.668	27.451	13.4	24.385	27.850	30.048
pH	7.56 ~ 10.11	0.496	8.565	5.8	8.290	8.522	8.858
DO(mg/L)	2.41 ~ 19.06	2.925	8.418	34.7	6.583	8.025	10.290
透明度(m) transparency	0.08 ~ 1.20	0.195	0.372	52.4	0.25	0.35	0.45
SS(mg/L)	2.00 ~ 156.00	29.797	41.220	72.3	20.00	36.00	58.75
TOC(mg/L)	4.02 ~ 60.59	9.451	18.268	51.7	12.85	15.57	19.72
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	1.80 ~ 48.0	10.539	14.403	73.2	6.93	10.76	20.00
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	7.20 ~ 31.61	7.002	16.816	41.6	10.95	14.33	22.32
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N(mg/L)	0.003 ~ 0.618	0.106	0.145	72.5	0.062 3	0.141	0.201
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg/L)	0.016 ~ 4.361	0.942	0.978	96.3	0.313	0.617	1.257
NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	0.115 ~ 2.651	0.500	0.542	92.3	0.248	0.382	0.570
TN(mg/L)	0.851 ~ 2.651	1.784	3.057	58.4	1.917	2.487	3.465
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(mg/L)	0.002 ~ 0.401	0.077	0.073	106.1	0.023	0.038	0.091 5
TP(mg/L)	0.073 ~ 0.725	0.151	0.286	52.7	0.168	0.257	0.378
Chl. a(mg/L)	0.007 ~ 0.753	0.127	0.105	121.8	0.034 9	0.070	0.112

### 2.2 池塘水环境因子间的相关性分析

利用 Minitab 计算叶绿素 a 与 14 项水质因子的线性相关性。由表 2 可得,与叶绿素 a 呈极显著线性正相关的水质因子为 SS、TOC、BOD<sub>5</sub>、

COD<sub>Mn</sub>、TN、TP;呈显著正相关的为 DO;而叶绿素 a 与透明度呈极显著线性负相关,与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 呈显著线性负相关;与水温、pH、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>3</sub>-N 则未呈现显著相关性。

表 2 水质因子间线性相关矩阵  
Tab. 2 The linear correlation matrix of aquatic ecological factors

	Chl. a	水温 temperature	pH	DO	透明度 transparency	SS	TOC	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>3</sub> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP
Chl. a	1														
水温 temperature	0.087	1													
pH	-0.125	0.100	1												
DO	0.192 <sup>a</sup>	0.190 <sup>a</sup>	0.724 <sup>b</sup>	1											
透明度 transparency	-0.391 <sup>b</sup>	-0.237 <sup>b</sup>	0.038	-0.109	1										
SS	0.515 <sup>b</sup>	0.334 <sup>b</sup>	-0.103	0.039	-0.584 <sup>b</sup>	1									
TOC	0.601 <sup>b</sup>	0.254 <sup>b</sup>	-0.317 <sup>b</sup>	-0.029	-0.404 <sup>b</sup>	0.512 <sup>b</sup>	1								
BOD <sub>5</sub>	0.583 <sup>b</sup>	0.378 <sup>b</sup>	-0.204 <sup>a</sup>	-0.066	-0.470 <sup>b</sup>	0.487 <sup>b</sup>	0.543 <sup>b</sup>	1							
COD <sub>Mn</sub>	0.493 <sup>b</sup>	0.637 <sup>b</sup>	-0.087	0.017	-0.523 <sup>b</sup>	0.626 <sup>b</sup>	0.589 <sup>b</sup>	0.780 <sup>b</sup>	1						
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	-0.091	0.274 <sup>b</sup>	0.035	0.038	0.019	0.073	-0.088	0.159	0.050	1					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.112	-0.496 <sup>b</sup>	-0.022	-0.075	0.243 <sup>a</sup>	-0.208 <sup>a</sup>	-0.260 <sup>b</sup>	-0.381 <sup>b</sup>	-0.435 <sup>b</sup>	-0.059	1				
NH <sub>3</sub> -N	-0.122	-0.160 <sup>a</sup>	-0.420 <sup>b</sup>	-0.392 <sup>b</sup>	0.058	-0.035	0.107	0.057	0.021	0.017	0.002	1			
TN	0.592 <sup>b</sup>	0.031	-0.333 <sup>b</sup>	-0.086	-0.337 <sup>b</sup>	0.398 <sup>b</sup>	0.609 <sup>b</sup>	0.608 <sup>b</sup>	0.513	0.077	0.080	0.252 <sup>b</sup>	1		
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.209 <sup>a</sup>	-0.040	0.082	-0.019	0.060	-0.129	-0.125	-0.224 <sup>a</sup>	-0.176	-0.005	0.098	0.363 <sup>b</sup>	-0.050	1	
TP	0.537 <sup>b</sup>	0.264 <sup>b</sup>	-0.257 <sup>b</sup>	-0.073	-0.494 <sup>b</sup>	0.494 <sup>b</sup>	0.550 <sup>b</sup>	0.691 <sup>b</sup>	0.619 <sup>b</sup>	0.077	-0.256 <sup>b</sup>	0.229 <sup>a</sup>	0.634 <sup>b</sup>	0.268 <sup>b</sup>	1

注:  $r_{0.05}(1,162) = 0.159$ ,  $r_{0.01}(1,162) = 0.245$ ; a 为显著相关 ( $0.01 < P < 0.05$ ); b 为极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

Notes: a indicated significant correlation ( $0.01 < P < 0.05$ ), b indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

### 2.3 叶绿素 a 与各水质因子逐步多元回归模型建立

建立叶绿素 a 与众多水质因子之间多元回归方程的目的之一是能以最便捷的方式显现叶绿素 a 的变化规律, 从而对水华的发生提供有效预警。通常认为, 多元回归方程的自变量应满足两个条件: 一是自变量与因变量之间因果关系明确且相关性显著; 二是各自变量之间相互独立性比较强。

TOC、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Mn</sub> 是水体有机物含量的不同表示方式, 三者之间存在极显著相关性, 而 TOC 与叶绿素 a 相关性高于 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Mn</sub>, 因此选择 TOC 作为有机污染指标进行后续回归分析。养殖水体中, 溶解氧含量一方面因藻类的光

合作用和呼吸作用而发生变化, 同时又受增氧机开启等人为因素影响, 从而有别于天然水体。因此, 尽管溶解氧含量变化与叶绿素 a 含量变化在统计学上存在相关性, 但两者之间并不存在显著因果的关系。悬浮物 SS 包含残饵、粪便、泥沙和浮游动物等, 从数值上看与叶绿素 a 存在显著正相关, 但后者是因、前者是果; 透明度与叶绿素 a 之间的因果关系也是如此, 藻类多从而在一定程度上导致透明度低, 因此两者均不列入回归分析。综上分析, 本实验最终选择 TOC、TN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 这 4 项水质因子作为逐步回归方程的自变量, 逐步回归分析结果列于表 3。

表 3 叶绿素 a 和各水质因子的回归方程  
Tab. 3 Stepwise multiple regression between chlorophyll a and other water quality parameters

步骤 progress	逐步多元回归方程 multiple regression	r	F	自由度 df
1	Chl. a = -0.0434 + 0.00810 TOC	0.600 8	91.71	1,162
2	Chl. a = -0.067 9 + 0.005 15 TOC + 0.025 7 TN	0.665 6	63.98	2,161
3	Chl. a = -0.046 3 + 0.004 85 TOC + 0.026 1 TN - 0.240 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	0.681 2	46.13	3,160
4	Chl. a = -0.054 5 + 0.003 49 TOC + 0.015 3 TN - 0.418 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P + 0.276 TP	0.715 5	41.65	4,159

逐步多元回归的结果显示, TOC、TN、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 这 4 项水质因子最终都入选为回归方程。由表 4 显示, 所获回归方程的回归关系达到极显著

水平 ( $P < 0.01$ ), 方程的决定系数值 ( $r = 0.715 5$ ) 也达到极显著水平, 可知该方程的拟合度较好, 用这 4 项水质因子能够估算叶绿素 a 的含量。

表 4 对回归模型的假设检验  
Tab.4 Hypothesis test of the model

来源 source	自由度 df	回归平方和 sum of squares	均方 mean squares	F	P Pr > F	r
回归 model	4	1.351 34	0.337 84	41.65	0.000 1	0.715 5
残差误差 error	159	1.289 64	0.008 11			
合计 corrected total	163	2.640 98				

在统计学中,利用标准偏回归系数(standard partial regression coefficient)绝对值的大小,可衡量自变量对因变量贡献的大小。多元线性回归方程中,各自变量的单位不同,其偏回归系数之间是无

法直接比较,需要对偏回归系数标准化,以消除量纲的影响。利用 SAS 编程计算得到的各项水质因子标准偏回归系数(表 5)显示,对叶绿素 a 影响从大到小依次是:TP、TOC、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 TN。

表 5 水质因子的参数估计  
Tab.5 Estimates of the water quality parameters

变量 variable	自由度 df	偏回归系数 parameter partial regression coefficient	标准误 standard error	t Pr >  t	P	标准偏回归系数 standardized partial regression coefficient
常数 constant	1	-0.054 53	0.0181 9	-3.00	0.003 2	0
TOC	1	0.003 49	0.001 01	3.46	0.000 7	0.258 99
TN	1	0.015 31	0.005 69	2.69	0.007 9	0.214 56
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	1	-0.418 07	0.102 42	-4.08	<0.000 1	-0.253 96
TP	1	0.276 09	0.069 90	3.95	0.000 1	0.326 97

利用回归方程计算得出的叶绿素 a 值与实测值进行对比,从图 1 中可以直观的看出叶绿素 a 计算值与实测值之间满足回归方程  $y = 1.001x - 3 \times 10^{-5}$  ( $r = 0.715 3$ ),即计算值与实测值很接近,说明通过回归方程得出的叶绿素 a 计算值是可以被接受的。

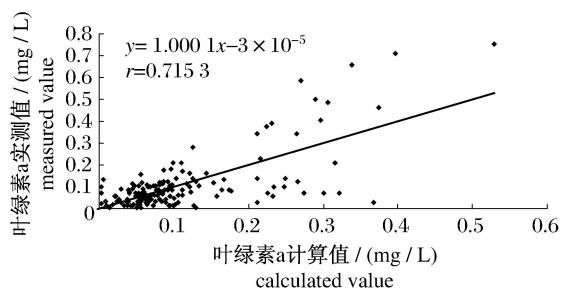


图 1 叶绿素 a 计算值与实测值之间相关性分析  
Fig.1 The correlation analysis between calculated value and measured value of Chl. a

### 3 讨论

#### 3.1 各水质因子与叶绿素 a 的相关性

通常人们认为,水温通过对藻类细胞光合作

用及呼吸代谢速率的控制而影响叶绿素 a 含量,两者呈现正相关关系。但这些研究皆针对天然水体进行,而我们研究的是凡纳滨对虾养殖塘,养殖生产有着鲜明的季节性,试验于夏季进行,水温整体较高且变化不大,在此期间,水温已不是藻类生长的限制因子,从而导致两者未呈现显著的正相关关系。

以往的研究认为 pH、无机氮营养盐等与叶绿素 a 之间有正负相关或无相关的结论都存在。刘辉宇等<sup>[10]</sup>2007 年对滇池进行的研究发现,硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、pH 对叶绿素 a 的影响不显著;张晓晶等<sup>[11]</sup>的调查发现,乌梁素海部分测点的叶绿素 a 与 pH 之间无显著相关性,但总体上却显示显著负相关。这与本实验中,水体叶绿素 a 与 pH 之间不存在显著相关性的结论相似。

溶解氧是浮游植物代谢过程中的重要能源物质<sup>[12]</sup>。本实验中叶绿素 a 含量与 DO 呈显著的正相关关系,叶绿素 a 含量越高,浮游植物数量越多,水中 DO 浓度增加。但养殖水体中 DO 含量受多因素影响,例如水温、微生物等<sup>[13]</sup>,此外还受增氧机开启时间、养殖密度等的影响。因此,养殖池塘中叶绿素 a 含量变化不是 DO 含量变化的主

导因素。

浮游植物对营养物质有一定的浓度范围要求,然而,由于不同营养物质各自的来源与补充因水体环境而异,浮游植物总量与各种营养盐的关系亦不尽相同<sup>[14]</sup>。本研究中,总磷含量与叶绿素 a 呈极显著的线性关系。但也有研究者调查认为,天然水体中磷含量较低,磷是浮游植物生长的主要限制因子,叶绿素 a 含量的对数与 TP 含量的对数呈直线关系<sup>[15-16]</sup>。本研究中,养殖水体提供较为充足的磷,其均值达 0.286 mg/L。说明养殖水体中,磷含量的增加对叶绿素 a 的影响不如天然水体中大。本研究中,总氮含量与叶绿素 a 呈极显著的线性关系,理论上叶绿素 a 与三态氮之间应存在一定相关性,但本文统计分析叶绿素 a 与  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_3$ -N 三者相关性并不太显著。刘辉宇等<sup>[10]</sup>对滇池的水体的研究中也得到  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 等对叶绿素 a 含量影响不显著的结论。具体原因仍不明确,有待进一步研究。

TOC 作为主要有机污染指标是影响叶绿素 a 含量变化的主要因子之一。TOC 与叶绿素 a 呈现极显著正相关的关系。刘子琳<sup>[17]</sup>对南大洋的研究表明,水体中溶解性 TOC 与叶绿素 a 有很好的相关性。叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,是表征水体初级生产者浮游植物生物量的一个重要指标,在一定程度上反映了水体中初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力<sup>[18]</sup>。浮游植物在其生长繁殖期间会排泄出有机物质,据研究其可占到光合作用产物的 30%~40%<sup>[19]</sup>。这意味着,水体中浮游植物初级生产力高,TOC 浓度也随着升高。

### 3.2 各水质因子与叶绿素 a 相关方程

国内外许多学者对不同水体中各水质因子与叶绿素 a 之间的相对性进行大量的研究,选择的因子和回归模型都存在很大差异,得出的结果也不尽相同。

赖子尼等<sup>[20]</sup>对鳊鱼养殖池塘水体叶绿素 a 与主要 16 种水质生态因子进行研究,通过多元线性回归模型建立了他们之间的回归方程。Liu 等<sup>[3]</sup>在对齐鲁湖的叶绿素 a 分布研究中,选择氨氮、总磷、透明度、氰化物、总砷、镉、氟化物和水温 8 个水质因子,运用多元线性回归并结合主成分分析得出影响叶绿素 a 含量的主要水质因子有水温、总磷和透明度。黄良民等<sup>[4]</sup>在对大鹏湾海域

叶绿素 a 分布研究时认为,水温、溶解氧、浊度、COD、亚硝氮、磷酸盐和铁锰等微量元素与叶绿素 a 含量相关性较好。张晓晶等<sup>[11]</sup>在对乌梁素海叶绿素 a 与各种水质因子关系研究中,运用多元逐步回归模型发现,主要的影响因子有浊度、悬浮物、总磷、总氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮。刘辉宇等<sup>[10]</sup>2007 年对滇池进行的研究中也使用了多元逐步回归模型。

综上所述,国内外学者普遍认为,影响天然水体中叶绿素 a 分布的主要水质因子包括主要物理因子、氮磷营养盐、有机污染指标、微量元素及有毒物质。回归模型多数选择多元逐步回归。多元逐步回归模型除了反映叶绿素 a 含量与多种水质因子变动规律,而且能分辨出解释变量和干扰变量,将对叶绿素 a 影响最大的一些因子列入回归模型。因此本文中也选用了逐步回归模型。

### 3.3 相关性分析和建立回归方程的意义

本文分析了凡纳滨对虾养殖水体中叶绿素 a 与主要水质因子之间的相关性。一方面筛选出了与养殖水体叶绿素 a 相关性较大的水质因子,同时也为后续回归方程的建立提供了参考。

叶绿素 a 与各水质因子之间逐步回归模型显示,影响叶绿素 a 含量的主要因子为 TP、TOC、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和 TN。这 4 个指标具有很强的代表性,其包括池塘中有机污染含量和氮磷营养盐的含量。这 4 项指标都与浮游植物生长状况密切相关且都为养殖生产中必须监测的常规项目。在实际养殖生产过程中通过这些指标就能便捷而准确地估算出养殖池塘中叶绿素 a 的含量,从而反映养殖池塘中浮游植物的生长状况。

### 3.4 氮磷比探讨

国际经合组织(OECD)对理化因子和叶绿素 a 动态变化的相互关系进行了大量的研究表明,水体磷为唯一主导因子的占 80%,氮为主导因子的占 11%,其余 9% 的水体为氮和磷共同起作用<sup>[21]</sup>。许多学者认为氮磷的比值与藻类的生长有更直接的关系,藻类正常代谢所需的 N/P 为 11,当 N/P 大于 11 时,P 是可能的限制性营养盐;当 N/P 小于 11 时,则 N 可能是限制性营养盐<sup>[22]</sup>。本研究中 22 个养殖池塘,有效氮(三态氮之和)/有效磷(活性磷) = 49.70。因此,磷是凡纳滨对虾养殖池塘中藻类生长潜在的限制因子之一。养殖池塘中叶绿素 a 含量与活性磷呈显著负

相关、与总磷浓度变化呈显著相关的结论与童万平等<sup>[23]</sup>对不同对虾养殖水体中叶绿素 a 与无机磷关系研究取得的结果一致。叶绿素 a 和活性磷浓度的负相关,可能是由于浮游藻类生长旺盛,其生长代谢吸收大量的活性磷,活性磷被高度利用而得不到及时的补给所致。

#### 参考文献:

- [1] 徐立蒲,殷守仁. 淡水浮游藻类在池塘养殖中的负面影响[J]. 中国水产,2002(6):66-67.
- [2] Håkanson L. A general process-based mass-balance model for phosphorus/eutrophication as a tool to estimate historical reference values for key bioindicators, as exemplified using data for the Gulf of Riga [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(2): 226-244.
- [3] Liu Y, Guo H C, Yang P J. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis [J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 681-688.
- [4] 黄良民. 大鵬湾赤潮多发区的叶绿素 a 分布与环境关系初探 [J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 680-683.
- [5] Muangkeow B. Effects of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone), and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., stocking density on growth, nutrient conversion rate and economic return in integrated closed recirculation system [J]. *Aquaculture*, 2007, 269: 363-376.
- [6] 赖子尼, 吴淑勤, 石存斌, 等. 鳊塘水体生态因子的计算机模式识别法应用 [J]. 水产学报, 2000, 24(2): 146-150.
- [7] 国家环境保护总局. HJ/T 91-2002, 地表水和污水监测技术规范 [S]. 2002.
- [8] 国家环境保护总局. GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S]. 2002.
- [9] 刘永定, 范晓, 胡征宇. 中国藻类学研究 [M]. 武汉: 武汉出版社, 2001: 245.
- [10] 刘辉宇, 宋立荣, 万能, 等. 滇池水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析 [J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 87-90.
- [11] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海叶绿素 a 与理化因子的统计分析 [J]. 环境科学, 2010, 29(2): 315-319.
- [12] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 556-562.
- [13] 游亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(9): 42-44.
- [14] 刘冬燕, 宋永昌, 陈德辉. 苏州河叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的关联分析 [J]. 上海环境科学, 2003, 22(4): 261-264.
- [15] 宋敬阳. 湖泊富营养化相关物理量的定量关系 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 1999, 9(1): 33-36.
- [16] 葛大兵, 吴小玲, 朱伟林. 岳阳南湖叶绿素 a 及其水质关系分析 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(4): 69-71.
- [17] 刘子琳, 潘建明, 陈忠元. 南大洋浮游植物现存量对颗粒有机碳的贡献 [J]. 海洋科学, 2004, 28(5): 44-491.
- [18] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度 [J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109-118.
- [19] 彭兴跃, 洪华生, 商少凌. 台湾海峡真光层有机碳动力学研究—DOC 大幅度的日变化 [J]. 海洋学报, 1997, 19(3): 57-65.
- [20] 赖子尼, 余煜棉, 庞世勋, 等. 鳊鱼养殖池塘水体叶绿素 a 与 16 项水生态因子的关系 [J]. 中国水产科学, 2004, 11(5): 426-432.
- [21] 世界经济合作与发展组织. 水体富营养化监测评价与防治 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [22] Vollenweider R A. Primary production in aquatic environments [M]. 2nd ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford IBP Handbok, 1974: 12.
- [23] 童万平, 韦蔓新, 何本茂, 等. 不同对虾养殖水体中无机磷与叶绿素 a 的关系研究 [J]. 广西科学, 2005, 12(3): 227-229.

## Multivariate statistical analysis of chlorophyll-a and water quality parameters in ponds of *Litopenaeus vannamei* culturing

JIANG Min<sup>1\*</sup>, YU Gen-ding<sup>1</sup>, DAI Xi-lin<sup>1</sup>, LIU Li-ping<sup>1</sup>,  
GU De-ping<sup>2</sup>, HU Wei-guo<sup>3</sup>, Diana James S<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Utilization, Ministry of Agriculture,  
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Fengxian Municipal Agriculture Commission, Shanghai 201400, China;

3. Fengxian Fisheries Technology Extension Station, Shanghai 201400, China;

4. School of Natural Resources and Environment, University of Michigan, MI 48109 – 1115, USA)

**Abstract:** Water quality parameters in 22 ponds of a *Litopenaeus vannamei* culture farm in Fengxian District of Shanghai were investigated from April to September in 2009. Fifteen parameters including chlorophyll-a (*Chl. a*), temperature, pH, dissolved oxygen (DO), transparency, suspended substance (SS), total organic carbon (TOC), biological oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), chemical oxygen demand (COD<sub>Mn</sub>), nitrite nitrogen (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N), nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total nitrogen (TN), active phosphorus (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P) and total phosphorus (TP) were determined. Descriptive statistics was conducted and the correlation between *Chl. a* and other parameters was analyzed. The statistical analysis results showed that *Chl. a* had extremely significantly linear positive correlation with SS, TOC, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TN and TP. Significantly linear positive correlation existed between *Chl. a* and DO. Extremely significantly linear negative correlation was confirmed between *Chl. a* and transparency while *Chl. a* had significantly linear negative correlation with PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P. *Chl. a* had no significant correlation with water temperature, pH, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>3</sub>-N. According to the principles of selecting independent variables in the multiple linear regression analysis, four water quality parameters including TOC, TN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P and TP were used for establishing the stepwise regression model which was  $Chl. a = -0.0545 + 0.00349 TOC + 0.0153 TN - 0.418 PO_4^{3-} - P + 0.276 TP$  ( $r = 0.7155$ ). The effects of these four factors on *Chl. a* were tested using the partial regression coefficient. The most influential water quality parameter on *Chl. a* were TP and then TOC, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, TN in turn. The results would help further study on ecological rules and water environmental protection in aquaculture ponds.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; chlorophyll-a; water quality parameters; correlation analysis; multiple stepwise regression analysis

**Corresponding author:** JIANG Min. E-mail: mjiang@shou.edu.cn