

## 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系\*

边归国<sup>1</sup>, 陈 宁<sup>1</sup>, 胡征宇<sup>2</sup>, 刘国祥<sup>2</sup>

(1: 福建省环境保护局, 福州 350003)

(2: 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘 要:** 2009年1-2月份, 在福建某河流发现大面积水华, 河水呈深褐色. 经对气温、水温、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷以及藻细胞密度、叶绿素 a 等因子的监测, 发现水中有甲藻、隐藻、硅藻、绿藻、蓝藻、裸藻和其它常见种, 其中优势种为佩氏拟多甲藻 (*Peridiniopsis penardii*), 细胞密度为  $0.1 \times 10^5 - 333 \times 10^5$  cells/L. 水体营养盐丰富, 总氮浓度为 2.50-8.65 mg/L, 总磷浓度为 0.09-1.15 mg/L. 另外, pH 值、溶解氧异常升高, 水华反反复复持续一个多月时间. 经相关分析, 拟多甲藻细胞密度与气温、pH 值和总氮相关系数分别为  $-0.323$  ( $P=0.027$ )、 $0.327$  ( $P=0.025$ ) 和  $0.316$  ( $P=0.030$ ), 显著相关, 偏相关分析表明, 拟多甲藻细胞密度与水温相关系数为  $-0.4894$  ( $P=0.008$ ), 非常显著负相关. 结果显示, pH 值和溶解氧升高是甲藻水华产生的表征现象, 总氮可能是本次甲藻水华生长的限制因子, 而气温和水温的变化既是甲藻水华产生的重要原因, 但超过甲藻适宜的生长温度对其也起到一定的抑制作用. 由于调查区干旱、少雨、梯级电站过密等因素所导致的水流速过缓, 加上足够的营养盐和合适的温度, 促使本次拟多甲藻水华的发生.

**关键词:** 拟多甲藻; 水华; 总氮; 限制因子

## A river in Fujian algal dinoflagellate relationship with the pollution index

BIAN Guiguo<sup>1</sup>, CHEN Ning<sup>1</sup>, HU Zhengyu<sup>2</sup> & LIU Guoxiang<sup>2</sup>

(1: *Fujian Environmental Protection Bureau, Fuzhou 350003, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

**Abstract:** A large dinoflagellate bloom were found in Fujian Province in January and February of 2009. Water temperature, pH, dissolved oxygen, permanganate index, ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus and algal cell density, chlorophyll-a and other factors were monitored. Dominant species, *Peridiniopsis penardii*, cell density reached  $0.1 \times 10^5 - 333 \times 10^5$  cells/L, and total nitrogen concentration was 2.50-8.65 mg/L, total phosphorus concentration 0.09-1.15 mg/L. In addition, pH, dissolved oxygen unconventionally increased in more than a month duration. By correlation analysis, cell density of *P. penardii* and temperature ( $r = -0.323, P = 0.027$ ), pH value ( $r = 0.327, P = 0.025$ ) and total nitrogen ( $r = 0.316, P = 0.030$ ) were significantly correlated. Partial correlation analysis showed that cell density of *P. penardii* and water temperature was significantly negative correlation ( $r = -0.4894, P = 0.008$ ). The results showed that the increase of pH and dissolved oxygen was the phenomenon of dinoflagellate bloom, and total nitrogen may be the growth limiting factors of dinoflagellate, and changes in air temperature and water temperature was the important reason of occurrence of dinoflagellate bloom. Other factors, drought of the investigation area, slow water flow dense, coupled with sufficient nutrients and suitable temperature, led to occurrence of dinoflagellate bloom.

**Keywords:** *Peridiniopsis penardii*; water bloom; total nitrogen; limiting factor

2009年1-2月期间, 在福建某河流发现多断面甲藻水华. 根据文献介绍, 在意大利某湖泊(2003-2004年)发生过严重的甲藻水华, 细胞密度达  $10^7$  cells/L, 在美国加州某湖泊(1970)发现的甲藻水华只有

\* 2009-04-21 收稿; 2009-07-30 收修改稿. 边归国, 男, 1952年生, 高级工程师; E-mail: bbygg@163.com.

$10^6$  cells/L, 日本的一些水库 (1995 - 1997 年) 也发现过<sup>[1]</sup>. 我国淡水甲藻形成水华是最近几年才发现的新现象, 在云南漫湾水库 (2003 年, 挨尔多甲藻)<sup>[2]</sup>、三峡水库香溪河库湾 (2004 - 2005 年, 拟多甲藻)<sup>[3]</sup>、高岚河 (2004 - 2005 年, 拟多甲藻)<sup>[4]</sup>、童庄河和青干河 (2005 年, 拟多甲藻)<sup>[5]</sup>、湖北秭归香溪河高阳镇河段 (2006 年, 波兰多甲藻)<sup>[6]</sup>、广东黄龙带水库 (2005 年, 二角多甲藻)<sup>[7]</sup>、武汉东湖 (2005 年, 拟多甲藻)<sup>[8]</sup> 等地先后发生甲藻水华. 其中, 在三峡库区形成大规模的倪氏拟多甲藻水华多发生在天然河流成库后的淹没回缓流水库湾或支流, 早春是高发季节, 持续时间为 10 - 70d. 有关甲藻水华的研究国内外均有报道, 但其成因、消亡及污染防治方面的研究报道较少. 本文通过对福建某河流甲藻水华发生期间与主要环境因子相关性的分析, 为探索甲藻水华的成因、消亡及污染防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样布点与分析方法

分别在 1<sup>#</sup> (支流入河口), 2<sup>#</sup> (支流入河口), 3<sup>#</sup> (干流电站), 4<sup>#</sup> (干流电站), 5<sup>#</sup> (干流库区), 6<sup>#</sup> (干流库区), 7<sup>#</sup> (干流电站), 8<sup>#</sup> (干流库区), 9<sup>#</sup> (干流库区) 等天然河流成库后的淹没回缓流水库湾或支流采集藻类和水样. 样品分析项目包括理化因子以及藻细胞密度和叶绿素 a 含量. 理化因子包括气温、水温、pH、DO、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub>-N、TN、TP 等, 均按照《水和废水监测分析方法》<sup>[9]</sup> 进行测定.

### 1.2 计算方法

采用 SPSS 10.0 统计软件分别进行 Pearson 积距相关系数、偏相关系数、离散系数、方差分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物的种类组成

监测结果表明, 各点位主要藻类为: 甲藻、隐藻、硅藻、绿藻、蓝藻、裸藻和其它常见种, 拟多甲藻为优势种 (8<sup>#</sup> 17.5% 除外), 所占比例在 76.8% - 96.9% 之间 (表 1).

表 1 各点位藻类密度监测结果\* ( $\times 10^5$  cells/L)

Tab. 1 The algal density of each monitoring point

点位	时间(月.日)	甲藻	隐藻	硅藻	绿藻	蓝藻	裸藻	其它	藻类总密度	甲藻(%)
1 <sup>#</sup>	2.06	64.2	-	-	-	-	-	18.9	83.1	77.3
2 <sup>#</sup>	2.06	9.6	-	-	-	-	-	2.9	12.5	76.8
3 <sup>#</sup>	2.13	8.4	-	-	-	-	-	2.1	10.5	80.0
4 <sup>#</sup>	1.22	333	67.8	12	187	-	-	-	43.2	77.1
5 <sup>#</sup>	2.09	8.0	-	-	-	-	-	1.2	9.2	87.0
6 <sup>#</sup>	2.06	53.8	-	-	-	-	-	1.7	55.5	96.9
7 <sup>#</sup>	1.21	279	2.96	4.93	9.53	0.33	-	-	296.7	94
8 <sup>#</sup>	1.21	3.71	1.11	11.5	4.45	0.37	-	-	21.2	17.5
9 <sup>#</sup>	1.21	133	2.52	2.16	2.88	0.36	0.36	-	141	94.3

\* 表示未监测到该种藻.

### 2.2 拟多甲藻的基本特征

福建某河流的甲藻是佩氏拟多甲藻 *Peridiniopsis penardii*, 板片格式: Po + 4' + 6'' + 5c + 5s + 5''' + 2''''', 细胞近卵形到近菱形, 顶端具孔, 末端具细刺或无. 上下壳大致相等, 横沟轻微左旋. 细胞大小: 26.2 - 37.0  $\mu\text{m} \times$  29.3 - 41.8  $\mu\text{m}$ , 长略大于宽 (1.08 - 1.21 倍于宽) (图 1). 有研究表明<sup>[10]</sup>, 当它们聚集的程度达到  $5 \times 10^4$  cells/L 时, 湖面就开始出现有颜色的特征, 到  $1 \times 10^5$  cells/L 左右时, 开始呈块状出现, 到  $1 \times 10^6$  cells/L 以上时, 用肉眼就能观察到明显的水华现象. 虽然拟多甲藻是广温性藻类, 可在 10 - 28 $^{\circ}\text{C}$  大量繁殖, 形成水华<sup>[8]</sup>, 但最适生长的水温为 13 - 15 $^{\circ}\text{C}$ , 由于具有鞭毛能自主运动, 有昼夜垂直迁移的生态学特征, 白天趋于

在水体上层聚集分布,晚上趋于在水柱中随机分布,其水华光条件中的日照时间以每 3d 8h 为最佳<sup>[1]</sup>,低于或超过此值时甲藻的增殖速度有减少趋势,这表明甲藻喜薄日厌强光的特性,太阳光的昼夜交替是影响拟多甲藻昼夜垂直迁移的重要环境因素.

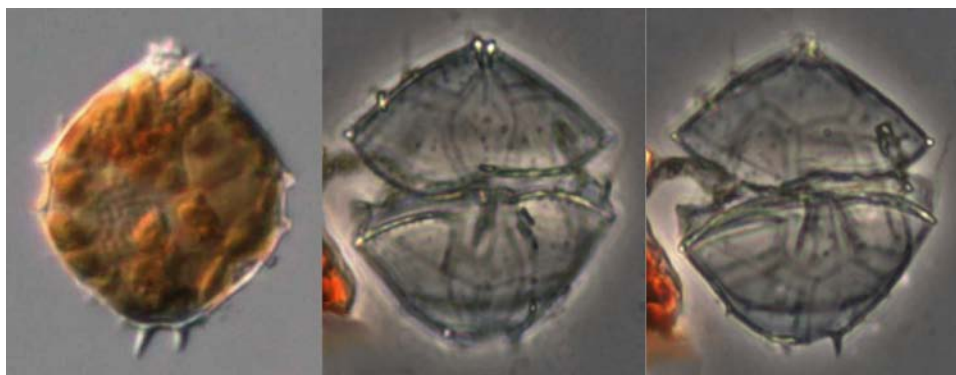


图 1 佩氏拟多甲藻及腹部和背部排列格式

Fig. 1 *Peridiniopsis penardii* and its plate patterns of ventral and dorsal view

一般情况下,甲藻水华宏观形态呈大的团块和条带状,极端情况全部水域为深酱油色<sup>[4]</sup>且分布均匀(图 2),并伴有轻微藻腥味.

a 严重地段水域

b 条带状水域

c 团块状水域

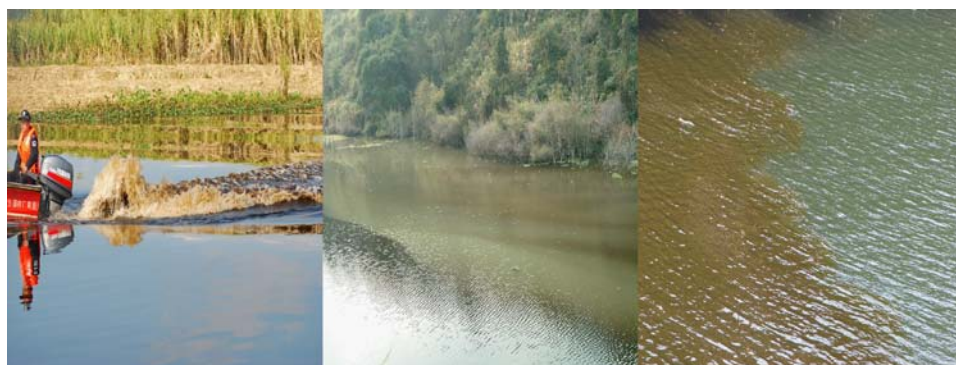


图 2 不同形态甲藻水华

Fig. 2 Different forms of algae bloom

### 2.3 拟多甲藻密度细胞密度及相关的化学和生物指标

拟多甲藻与化学和生物指标统计分析结果见表 2. 经与湖泊、水库富营养化分类标准<sup>[11]</sup>对比,调查区域富营养化指标均超过中富营养水平,甚至达到极富营养.

### 2.4 拟多甲藻与化学和生物指标相关性分析

经过积距相关系数统计发现拟多甲藻与多项化学和生物指标具有相关性,结果见表 3. 积距相关分析结果表明:拟多甲藻与 pH 值( $r=0.327, P=0.025$ )、与总氮( $r=0.316, P=0.030$ )、与气温( $r=-0.323, P=0.027$ )均显著相关,与藻类总数( $r=0.404, P=0.005$ )非常显著相关. 水温与其它指标没有显著的统计意义. 以点位和总氮为控制因子分别进行偏相关分析结果表明:拟多甲藻与水温相关系数( $r=-0.4894, P=0.008$ )、( $r=-0.4837, P=0.009$ )、与藻类总数( $r=0.6914, P=0.000$ )、( $r=0.6954, P=0.000$ ),均非常显著相关.

表2 拟多甲藻与化学和生物指标统计分析

Tab. 2 *Peridiniopsis penardii* chemical and biological indicators and statistical analysis

项目	样本数	最小值	最大值	均值	标准差	方差	偏度系数	峰度系数
甲藻密度( $\times 10^5$ cells/L)	47	0.10	333.0	36.99	78.033	6089.1	3.123	9.289
平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )	47	16.7	22.6	19.0	1.7318	2.9991	0.940	-0.356
水温( $^{\circ}\text{C}$ )	47	13.0	24.70	18.46	2.1588	4.6604	-0.068	1.755
pH	47	6.62	8.95	7.66	0.6420	0.4122	0.577	-0.742
DO(mg/L)	47	5.60	20.50	10.02	2.7853	7.7579	1.356	3.371
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	44	1.40	28.00	5.57	4.8923	22.966	3.110	11.98
氨氮(mg/L)	46	0.21	6.72	1.23	1.0821	1.1710	3.294	14.40
总氮(mg/L)	47	2.50	8.65	4.95	1.2150	1.4763	0.869	1.718
总磷(mg/L)	47	0.09	1.15	0.23	0.1758	0.0309	3.451	16.01
叶绿素 a( $\mu\text{g/L}$ )	32	4.45	492.0	106.8	129.24	16704	1.634	2.034
藻类总数	47	0.63	432	46.86	79.66	6345.1	3.776	15.45
氮磷比	47	7.52	51.90	27.09	10.69	114.30	0.452	-0.472

表3 拟多甲藻与化学和生物指标相关性分析( $P$ 值双侧)Tab. 3 *Peridiniopsis penardii* chemical and biological related analysis

类别	甲藻	气温	水温	pH	DO	COD <sub>Mn</sub>	氨氮	总氮	总磷	叶绿素 a	氮磷比
甲藻	1.000										
$P$ 值	0.000										
气温	-0.323 <sup>b</sup>	1.000									
$P$ 值	0.027										
水温	-0.275	0.650 <sup>a</sup>	1.000								
$P$ 值	0.062	0.000									
pH	0.327 <sup>b</sup>	-0.034	0.023	1.000							
$P$ 值	0.025	0.818	0.876								
DO	0.214	-0.226	-0.259	0.762 <sup>a</sup>	1.000						
$P$ 值	0.148	0.126	0.079	0.000							
COD <sub>Mn</sub>	0.211	-0.122	-0.149	0.465 <sup>a</sup>	0.297 <sup>b</sup>	1.000					
$P$ 值	0.170	0.431	0.334	0.001	0.050						
氨氮	-0.032	-0.309 <sup>b</sup>	-0.004	0.160	0.161	-0.159	1.000				
$P$ 值	0.833	0.036	0.979	0.289	0.287	0.302					
总氮	0.316 <sup>b</sup>	-0.221	-0.235	0.482 <sup>a</sup>	0.327 <sup>b</sup>	0.688 <sup>a</sup>	0.160	1.000			
$P$ 值	0.030	0.136	0.111	0.001	0.025	0.000	0.288				
总磷	0.274	-0.144	-0.007	0.507 <sup>a</sup>	0.253	0.888 <sup>a</sup>	0.013	0.741 <sup>a</sup>	1.000		
$P$ 值	0.063	0.333	0.961	0.000	0.086	0.000	0.932	0.000			
叶绿素 a	0.210	-0.231	-0.099	0.649 <sup>a</sup>	0.483 <sup>a</sup>	0.828 <sup>a</sup>	0.260	0.743 <sup>a</sup>	0.843 <sup>a</sup>	1.000	
$P$ 值	0.248	0.203	0.590	0.000	0.005	0.000	0.157	0.000	0.000		
藻总数	0.404 <sup>a</sup>	0.226	0.071	0.207	0.081	0.195	-0.121	0.039	0.170	0.266	1.000
$P$ 值	0.005	0.127	0.636	0.162	0.588	0.204	0.422	0.794	0.253	0.142	
氮磷比	-0.159	0.070	-0.207	-0.397 <sup>a</sup>	-0.157	-0.521 <sup>a</sup>	-0.067	-0.242	-0.669 <sup>a</sup>	-0.643 <sup>a</sup>	-0.201
$P$ 值	0.284	0.640	0.163	0.006	0.292	0.000	0.658	0.101	0.000	0.000	0.176

\* a 表示( $P < 0.01$ )有非常显著的统计学意义, b 表示( $P < 0.05$ )有显著的统计学意义.

### 3 讨论

#### 3.1 藻类与 pH 值的关系

pH 在水体中主要受  $\text{CO}_2$  含量的影响,但是  $\text{CO}_2$  的含量受水体中的溶解性离子、微生物种类以及数量、水温等多种因素的影响.在富营养水体中  $\text{CO}_2$  的含量主要是受生物过程的控制<sup>[12]</sup>.据报道,天津引滦河道<sup>[13]</sup>、

烟台市夹河流域<sup>[14]</sup>和福建三明东牙溪水库<sup>[15]</sup>、三峡<sup>[16]</sup>等水体中 pH 的升高均与藻类生长相关. 但是, 关于甲藻与 pH 的相关性的研究鲜见报道. 王海珍等<sup>[2]</sup>提出, 当云南漫湾水库埃尔多甲藻个体数占总个体数的 77.9% 以上时, pH 值为 8.78. 而武汉东湖甲藻水华密度为  $2.06 \times 10^7$  cells/L 时, pH 值为 9.6<sup>[8]</sup>.

从机理上分析, 甲藻与其它藻类一样, 在光合作用时释放出  $\text{OH}^-$ , 应该具有一定的相关性. 本研究发现, 甲藻密度与 pH 显著相关 ( $r=0.327, P=0.025$ ), 结果与藻类光合作用机理和相关研究相吻合<sup>[17]</sup>. 藻类细胞的组成主要为  $\text{C}_{106}\text{H}_{181}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$ , 生成 1mg 藻类所需要的  $\text{CO}_2$  量为 1.92mg, 在阳光照射下, 水中植物进行光合作用, 光合作用方程式如下:



从光合作用的方程可以得知, 无机碳是绿色植物光合作用合成碳水化合物的基础物质, 水生藻类繁殖所需要的无机碳, 几乎全靠水中的  $\text{CO}_2$ . 在湖水表层, 如果空气中  $\text{CO}_2$  溶解于水中的速度与水中  $\text{CO}_2$  向空气中释放的速度相等时, 即达到平衡. 这时水中  $\text{CO}_2$  的浓度达到 0.7mg/L. 与藻类对  $\text{CO}_2$  的利用速度相比, 从大气提供的  $\text{CO}_2$  速度是相当缓慢的, 只有藻类光合作用利用速度的 1%~1%. 因而藻类把水中  $\text{HCO}_3^-$  也当作  $\text{CO}_2$  来利用. 首先,  $\text{HCO}_3^-$  在磷酸酐酶的催化作用下变为  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , 然后经脱水反应生成  $\text{CO}_2$  后被利用, 在  $\text{HCO}_3^-$  变成  $\text{H}_2\text{CO}_3$  的过程中, 即电离出 1 个  $\text{OH}^-$ . 因此水体中 pH 值升高主要是藻类在光合作用中吸收  $\text{CO}_2$ 、释放  $\text{O}_2$  影响  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{OH}^-$  平衡的结果.

### 3.2 拟多甲藻与总氮的关系

大量的营养元素可以促进叶绿素和浮游藻类生物量的剧增, 氮和磷是这些营养元素中的限制性因子, 在水生生态系统中, 氮磷比作为关键因子常被用来预测藻类细胞密度的变化和季节的演替<sup>[18]</sup>. 有研究表明, 适当的营养盐可以控制藻类的生长、生物量以及种群结构. 但是究竟氮或磷哪个营养元素是浮游藻类生长的限制因子, 目前尚无一致的结论. 藻类细胞的组成主要为  $\text{C}_{106}\text{H}_{181}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$ , Wynne 等<sup>[19]</sup>认为, 浮游植物的氮磷吸收比例基本上是遵循 Redfield 比值 16:1, 因此常用此比值来判断浮游植物受营养盐的相对限制情况. 当氮磷比偏离 16:1 时, 藻类的生长会受到相对低含量营养要素的限制. Redfield 定律认为, 藻类细胞组成的原子比率 C:N:P = 106:16:1, 如果氮磷比超过 16:1, 磷被认为是限制性因素; 反之, 当氮磷比小于 10:1 时, 氮通常被考虑为限制性因素; 而当氮磷比在 10-20 之间时, 限制性因素则变得不确定<sup>[20]</sup>. 胡章喜等<sup>[21]</sup>提出, 不同藻类各自具有其最适的 N:P 比率, Redfield ratio 仅仅是整个浮游植物群落的平均最适营养比率, 它更多地反映了浮游植物群落中优势类群的 N:P 比率需求. 因此, 水华的发生虽然与 N:P 比率有关, 但首先取决于水体氮、磷浓度是否达到临界水平. 在临界营养水平之下, 即使处于最适氮磷比率, 水华藻的生长速率仍然很低; 而在营养充足的条件下, 即使偏离最适氮磷比率, 其他条件满足时, 水华藻仍有可能保持较高的增殖速率. 因此, 水华藻的种群生长速率首先取决于营养需求, 其次才是营养比率.

云南漫湾水库甲藻水华发生时总氮浓度 1.58mg/L、总磷 0.41mg/L、氮磷比 3.8:1, 虽然氮磷比均小于 8:1, 而磷却是甲藻生长的限制因子. 本调查期间, 各点平均总氮 4.95mg/L、总磷 0.23mg/L、总氮和总磷均已超过富营养化的临界质量浓度(总磷 0.02mg/L, 总氮 0.2mg/L), 氮磷比 > 16:1 占 85.9%, 平均为 27.09:1, 明显高于 Redfield 16:1 的比率. 按 Redfield 定律磷应该是限制性因素, 但是甲藻密度与磷 ( $r=0.274, P=0.063$ ) 和氮磷比 ( $r=-0.159, P=0.284$ ) 关系不密切, 而与总氮显著相关 ( $r=0.316, P=0.030$ ), 结果与汤宏波等<sup>[8]</sup>报道拟多甲藻密度和  $\text{TN}_{1.2m}$  浓度呈显著正相关性 ( $r=0.915, n=5, P=0.0294$ ) 相似, 说明总氮可能是甲藻生长的限制因子. 之所以产生与云南漫湾水库甲藻水华不同的结果, 不在于氮磷比的大小, 主要取决于甲藻对何种营养盐的需求及浓度的高低, 尤其是在总氮浓度远大于富营养化的临界质量浓度的情况下.

### 3.3 拟多甲藻与藻类总数的关系

在所调查点位中有甲藻、隐藻、硅藻、绿藻、蓝藻、裸藻和其它常见种, 虽然拟多甲藻为优势种, 但是毕竟甲藻是总藻数的一部分, 且优势种和其它常见种还相互竞争, 此消彼长, 仍存在一定的关联. 因此, 统计分析表明, 拟多甲藻与藻类总数 ( $r=0.404, P=0.005$ ) 非常显著相关, 也显示拟多甲藻在此次水华期间占据稳定的优势地位.

### 3.4 拟多甲藻与气温和水温的关系

影响藻类繁殖的因素主要是水体营养盐含量以及光照和水温等理化因素<sup>[22]</sup>, 气温、水温的变化是甲藻水华发生不可忽视的诱因, 虽然拟多甲藻是广温性藻类, 但最适宜生长的水温为 13 – 15℃, 三峡库区高岚河甲藻水华发生在晴朗天气的中午, 气温从 9℃ 回升到 16℃, 水温从 10℃ 回升到 12℃<sup>[4]</sup>. 三峡库区童庄河的拟多甲藻水华发生在气温开始逐渐转暖、日照充足的春初, 水温 12.8℃<sup>[5]</sup>. 云南漫湾水库甲藻水华期间水温平均为 14.2℃<sup>[2]</sup>. 武汉东湖发生严重的甲藻水华时水温为 20℃<sup>[8]</sup>. 随着温度的增加, 当超出甲藻生长的最适宜温度范围时, 水华将会自然消失, 不会成为长时间持续性水华<sup>[5]</sup>. 不到或超过最适温度时甲藻的增殖速度有减少趋势, 这反映了水华随季节而变的特性<sup>[1]</sup>.

本调查研究由于是在水华暴发和逐渐消失期间进行监测分析, 并且温度逐渐升高超出甲藻生长的最适宜温度范围, 平均气温在 16.7 – 22.6℃ 范围, 相关分析结果表明, 平均气温与拟多甲藻相关系数 ( $r = -0.323$ ,  $P = 0.027$ ) 显著负相关, 而水温在 13 – 16℃ 范围所占比例仅为 8.1%, 91.9% 的水温都高于拟多甲藻最适宜生长的水温, 偏相关分析结果也证明, 拟多甲藻与水温呈非常显著负相关 ( $r = -0.4894$ ,  $P = 0.008$ ), 说明温度升高对拟多甲藻还是有一定的抑制作用, 这也符合其喜薄日厌强光的特性, 所以甲藻与气温和水温成负相关. 如果在水华形成的初期, 甲藻与气温和水温有可能正相关.

### 3.5 综合影响

拟多甲藻水华的产生, 除了与总氮、气温、水温等密切相关外, 由于调查区干旱、少雨、梯级电站过密等因素所导致的水流速过缓, 也是拟多甲藻水华产生的主要原因之一. 足够的营养盐和合适的温度, 辅以缓慢的水体流速, 促使拟多甲藻水华的发生.

致谢: 对厦门大学洪华生、黄邦钦, 福建师范大学庄惠茹, 厦门市环境保护局谢海生、孙孤梅, 福建省环境监测中心站陈晓秋、郑洪萍, 福建省漳州市环境保护局谢卫东等协助现场调查的教授和高级工程师以及严观表示感谢!

## 4 参考文献

- [1] 朱木兰, 陈飞勇, 金峰等. 水库甲藻水华与防治效果数值模拟. 人民长江, 2007, **38**(11): 157-159.
- [2] 王海珍, 刘永定, 沈银武等. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究. 水生生物学报, 2004, **28**(2): 213-215.
- [3] 徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究. 武汉植物学研究, 2008, **26**(6): 608-612.
- [4] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 47-51.
- [5] 周广杰, 况琪军, 胡征宇等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 337-341.
- [6] 胡圣, 刘国祥, 周广杰等. 波兰多甲藻, 中国淡水产毒甲藻新记录. 武汉植物学研究, 2008, **26**(5): 454-457.
- [7] 孙育平, 游江涛, 雷腊梅等. 黄龙带水库甲藻水华的脂肪酸组成特征. 生态科学, 2008, **27**(5): 395-398.
- [8] 汤宏波, 胡圣, 胡征宇等. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 632-636.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法, 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88-285, 649-654.
- [10] 畑幸彦. 长濑水库中的 *Peridinium* 赤潮现象. 国立公害研究所报告第 24 号(日), 1983.
- [11] 赵秀春, 孟春霞. 青岛市部分中型水库富营养化调查及评价. 水利水电技术, 2008, **39**(3): 6-8, 18.
- [12] 游亮, 崔莉凤, 刘载文. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析. 环境科学与技术, 2007, **30**(9): 42-44.
- [13] 秦保平, 孙韧, 王德龙等. 引滦河道中水质偏碱的起因研究. 环境科学研究, 1999, **12**(5): 38-42.
- [14] 林影, 徐家明, 张广谱等. 烟台市夹河流域 pH 偏高的原因. 山东环境, 1995, (2): 12-13, 45.
- [15] 边归国. 东牙溪水库偏碱性污染的成因研究. 福建环境, 2003, **20**(6): 15-17.
- [16] 黄钰铃, 纪道斌, 陈明曦等. 水体 pH 值对蓝藻水华生消的影响. 人民长江, 2008, **39**(2): 63-65.
- [17] 刘春光, 金相灿, 孙凌等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 294-298.
- [18] Hosub K, Soonjin H, Jaeki S *et al.* Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 255-267.
- [19] Wynne D, Rhee GY. Effects of light intensity and quality on the relative N and P requirement (the optimum N:P ratio) of marine phytoplankton algae. *J Plank Res*, 1986, **8**: 91-103.
- [20] Li RX, Zhu MY, Chen S *et al.* Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 603-607.
- [21] 胡章喜, 徐宁, 李爱芬等. 氮磷比率对 3 种典型赤潮藻生长的影响. 水生生物学报, 2008, **32**(4): 482-487.
- [22] 刘其根, 陈立侨, 陈勇. 千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析. 海洋湖沼通报, 2007, (1): 117-124.