

福建近海叶绿素 a 和初级生产力的分布特征

蔡玉婷

(福建省水产研究所,福建 厦门 361012)

摘要:以 2001 年福建主要港湾的现场调查资料为基础,对该水域叶绿素 a 含量和初级生产力的分布特征及其对浮游植物生长的限制因子进行了分析和探讨。研究结果表明,该海域的环境因素适合浮游植物的生长繁殖。相关分析显示,叶绿素 a 和初级生产力与浮游植物呈现显著正相关。无机氮不会成为浮游植物生长的限制因素,而浮游植物生长受控于磷酸盐的几率最大。

关键词:主要港湾;营养盐分布特征;叶绿素 a;初级生产力;浮游植物 phytoplankton;限制因子

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2010)增刊-0174-06

Distribution of Chlorophyll. a and Primary Productivity in Fujian Coastal Water

CAI Yu - ting

(Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361012 China)

Abstract: Based on the data of field investigation conducted in the main bays in Fujian during 2000—2001, chlorophyll - a content, distribution characteristic of primary productivity and the role of limitation to phytoplankton growth were analyzed and studied. The results showed that conditions of environment in the sea area seemed suitable for phytoplankton growth. Chlorophyll - a content and distribution of primary productivity were positively correlated to phytoplankton growth. The phytoplankton growth was not limited by nitrogen. Phosphate, however, certainly limited the phytoplankton growth.

Keywords: main bays; nutrients distribution; chlorophyll - a; primary production; phytoplankton; limiting factor

福建沿海是我国南方重要的海上运输通道,鱼虾种类繁多。近 20 年来,由于经济发展迅速,河口区的富营养化和赤潮时有发生,近海生态系统结构和功能的研究日益受到重视。叶绿素 a 是浮游植物光合作用最主要的色素,其分布是浮游植物生物量重要的指标,它反映了水体中浮游植物生物量及其变化规律。在海洋环境质量评价及监测中,也时常用叶绿素 a 的含量作为评价海域是否富营养或发生赤潮的指标参数。初级生产力反映了海域浮游植物通过光合作用生产有机碳的能力,是生物链的第一环,它的变化在很大程度上决定着海洋生物资源的兴衰。初级生产力是海洋生态系统研究的重要内容,也是海域生物资源评估的重要依据。叶绿素 a 和初级生产力在评估港湾环境容量及养殖容量方面起着重要的作用。

1 调查对象和方法

1.1 调查步骤

共开展 3 个航次调查,分别于 2001 年 5、8、11 月大潮期间进行,布设 97 个站位(图 1),分布于整个福建沿海。叶绿素 a 和初级生产力依照《海洋调查规范—海洋生物调查》规定的方法,测定步骤如下:

(1)叶绿素 a:用 2.5 L³ GCC-2 型有机玻璃采水器取各层水样,每层水样取 250 mL,加入 2 滴 1% 碳酸镁溶液,用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,然后用 90% 丙酮萃取,定容至 10 mL,低温下萃取 20 h 后,萃取液用 Turner(Turner10-AU)荧光仪进行测定。

(2)初级生产力:根据现场采样的透明度取 100%、10% 和 1% 表面入射光达到深度的水样,各层水样均取 3 个分样倒入培养瓶(二白一黑),加入¹⁴C 示踪液,放于培养箱中,在自然光和现场流水的条件下培养 4 h 以上,然后用微孔滤膜过滤,滤膜经酸熏后置于闪烁瓶中保存,最后加入闪烁液并在液体闪烁

收稿日期:2009-03-03

作者简介:蔡玉婷(1980—),女,福建厦门人,助理研究员,从事海洋与渔业生态环境研究。E-mail: yuting_cai@163.com

计数仪(LS6500)上进行测定。

同步调查的还有浮游植物种群组成、数量和优势种,用浅水3型浮游生物垂直拖网采集浮游植物,所获样品加入甲醛固定,在实验室进行浓缩、鉴定。水质测定项目有无机氮、活性磷酸盐(以下简称为磷酸盐),按《海洋监测规范》(国家海洋局1998)规定的方法测定:硝酸盐用铈-镉还原法,亚硝酸盐用萘乙二胺分光光度法,氨氮用次溴酸盐氧化法,磷酸盐用磷钼蓝分光光度法,所用仪器均经过计量认证。

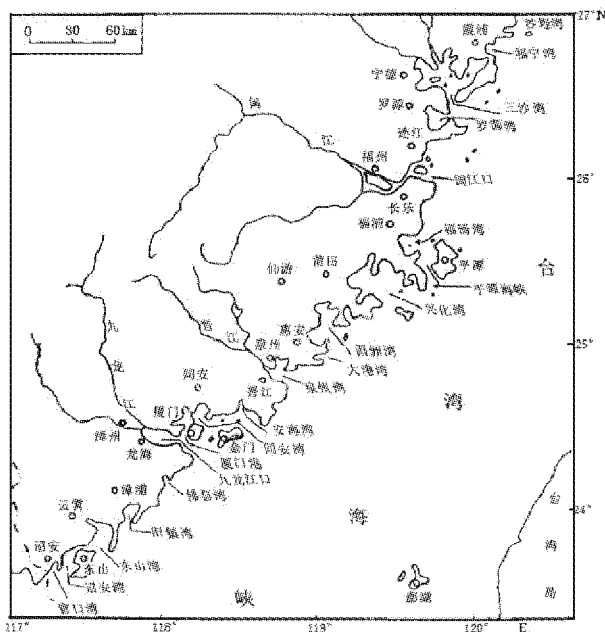


图1 福建主要港湾调查站位

Figure 1 Map of investigated stations in the main bays in Fujian

1.2 初级生产力评价指标

初级生产力是海洋中生物通过同化作用生产有机物的能力,它是海洋生态系的基本功能之一,通常以单位时间(a或d)内单位面积(或体积)所生产的有机物质量(以C计)来计算:

$$P_v = \frac{(R_s - R_b) \times \rho(C)}{R \times N}$$

式中: P_v ——海洋初级生产力, $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; R ——加入 ^{14}C 的量, kBq ; R_s ——白瓶样品中 ^{14}C 放射性活度平均值, kBq ; R_b ——零时间样品中 ^{14}C 的放射性活度, kBq ; $\rho(C)$ ——海水中二氧化碳总浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; N ——培养时间, h。

2 结果与分析

2.1 叶绿素a的季节变化

浮游植物是食物链的第一环,其生产能力是海洋

生物赖以生存的物质基础。由于浮游植物种类繁多,不同种类之间的个体差异较大,将水体中叶绿素a的含量作为研究浮游植物生物量和动态变化的主要指标^[1]。叶绿素a是浮游植物进行光合作用的主要色素,利用叶绿素a的含量可以估算海区初级生产力。在不同季节里水温等不同环境因素,引起叶绿素a的季节变化。

福建主要港湾叶绿素a范围 $0.93 \sim 5.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 年平均值 $3.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 除三沙湾外,其余各港湾的叶绿素a年平均超过 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 大部分在 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。夏季兴化湾最高,达 $16.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 其次是罗源湾为 $7.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从所处的地理位置看,兴化湾位于福建省的中部偏北,罗源湾位于福建省的北部,这两个港湾叶绿素a较高,其余港湾叶绿素a含量相差不大。夏季除了兴化湾和罗源湾较特殊外,春季和秋季,叶绿素a的平面分布格局,基本上呈现南部高于北部,湾内高于湾外的特点,这与以前的调查结果一致^[2]。海水中营养盐的平面分布呈现同样特点,表明营养盐对浮游植物数量分布有相当大的影响。

主要港湾5、8、11月表层叶绿素a和初级生产力分布见表1,其中2001年8月罗源湾和兴化湾已出现赤潮。不同港湾具有其特殊性,某些生物受地形和陆缘环境的影响,使港湾的生态过程显得复杂,因此难于确定发生浮游植物赤潮的原因。比如骨条藻是港湾和近岸性种类,有其生存的环境范围,在水温、营养盐,或是几种因素的综合作用下,就可能产生赤潮。从调查的结果分析,湄洲湾以南港湾表层叶绿素a总体上高于北部,三沙湾、兴化湾和湄洲湾等近年来叶绿素a值有所升高,而同安湾、东山湾和诏安湾在某些季节有所降低,这种降低与大量养殖滤食性贝类有关,尤其是牡蛎。近几年来养殖规模不断扩大,已成为福建海水养殖的支柱产业。牡蛎分布范围广,滤水率高,被认为是海湾浮游生物数量变动的主控因素之一,牡蛎的大规模养殖对调控浮游生物数量起了很大作用。

福建主要港湾叶绿素a的分布趋势,除2001年2月份无调查数据外,与1990年比较,11年后的2001年调查海域的叶绿素a生物量有数倍的上升,而且增加的幅度非常大(表2),显然是近几年来某些海域大规模发展养殖业造成水体叶绿素a上升的原因。

2.2 初级生产力的季节变化

初级生产力范围 $20 \sim 1712 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 年

表 1 福建主要港湾 5、8、11 月叶绿素 a 和初级生产力(平均值)*
Table 1 Concentration of chlorophyll - a and primary productivity in the main bays
in Fujian in May, Aug. and Nov. (average values)

调查 海域	2001 年 5 月			2001 年 8 月			2001 年 11 月		
	表层	初级	浮游植物	表层	初级	浮游植物	表层	初级	浮游植物
	叶绿素 a/ mg · m ⁻³	生产力/ mgC · m ⁻² · d ⁻¹ 10 ³ 个 · m ⁻³	细胞数/ 10 ³ 个 · m ⁻³	叶绿素 a/ mg · m ⁻³	生产力/ mgC · m ⁻² · d ⁻¹ 10 ³ 个 · m ⁻³	细胞数/ 10 ³ 个 · m ⁻³	叶绿素 a/ mg · m ⁻³	生产力/ mgC · m ⁻² · d ⁻¹ 10 ³ 个 · m ⁻³	细胞数/ 10 ³ 个 · m ⁻³
三沙湾	1.69	54	50.7	1.90	95	604.2	0.96	20	57.57
罗源湾	1.54	134	74.4	7.27	1708	1001.7	0.93	50	160.7
兴化湾	1.70	104	1 486.9	16.88	1712	90 316.8	1.89	42	305.0
湄洲湾	2.70	174	7 158.4	3.50	437	2 689.8	2.15	35	478.7
泉州湾	2.98	166	21 506.5	4.36	147	3 566.6	1.87	36	864.6
深沪湾	2.82	265	74 608.2	2.51	221	2 256.7	1.69	47	126.8
围头湾	4.64	213	122 267.0	3.72	163	2 054.2	1.38	90	94.8
佛昙湾	5.40	193	859.3	2.20	81	113.3	1.79	92	236.8
旧镇湾	5.24	196	57 490.7	4.45	103	2 899.0	1.78	69	218.2
诏安湾	5.23	241	12 745.6	2.96	97	2 034.5	3.45	138	40 102.8

* 注:97 个样品的平均值。

表 2 福建主要港湾表层叶绿素 a 与其他海域比较
Table 2 Surface Chl - a in different month
in the main bays in Fujian and other area

调查海域与时间	2 月	5 月	8 月	11 月
主要港湾(2001 年 5、8 和 11 月)*	/	7.72	9.02	6.01
海岛资源综合调查(1990 年 5、8 和 11 月,1991 年 2 月)* *	2.05	1.17	3.17	2.31
海岸带(1984 年 5、8 和 11 月,1985 年 2 月)* * *	0.65	1.89	2.01	2.06

注:* 本文调查;* * 福建省海岛资源综合调查;* * * 福建省海岸带和海涂资源综合调查。

平均值 237 mgC · m⁻² · d⁻¹。除夏季,三沙湾、湄洲湾和泉州湾外,其余各港湾的初级生产力年平均都超过 40 mgC · m⁻² · d⁻¹,大部分在 100 mgC · m⁻² · d⁻¹以上。夏季,兴化湾最高,达 1 712 mgC · m⁻² · d⁻¹,其次是罗源湾为 1 708 mgC · m⁻² · d⁻¹。各港湾初级生产力平面分布与叶绿素 a 的情况相似。

以上调查结果表明:福建主要港湾叶绿素 a、初级生产力的含量属中等偏高水平。这与海区地处亚热带,水温较高,阳光充足,营养盐丰富分不开。按照日本对海区营养盐的划分,认为夏季寡营养、富营养和过营养海域的叶绿素 a 含量分别是小于 1 mg · m⁻³、1 ~ 10 mg · m⁻³ 和 10 ~ 20 mg · m⁻³。据以上标准对照本次调查结果可以看出,调查海区介于寡营养和富

营养之间,大部分海域夏季叶绿素 a 在 2 mg · m⁻³ 以上,说明调查海区浮游植物比较丰富。个别港湾,如兴化湾叶绿素 a 达 10 mg · m⁻³ 以上,含量较高,应引起足够重视,适当控制养殖面积,减少富营养废水的排入,防止海区进一步富营养化。

2.3 营养盐与叶绿素 a 浓度之间的变化关系

将叶绿素 a 数据与现场同步取样测定的无机氮和磷酸盐数据进行比较,结果显示,叶绿素 a 与营养盐有明显的相关关系。从季节上看,浮游植物数量的变化对福建主要港湾水体中营养盐浓度具有一定的调控作用。

一些学者依据港湾水体中营养盐变化的不平衡性以及计算营养盐限制的标准,提出目前磷酸盐作为浮游植物的主要限制因子^[3]。近年来研究表明,随着近海富营养化的不断加剧,浮游植物的群落结构发生了变化,从而导致食物网结构和功能的改变^[4]。

海洋生物过程的基础是光合作用,主要是将可溶性的碳、氮、磷和硅等营养盐按一定比例转化成浮游植物。在阳光下,浮游植物对营养盐的吸收速率远远超过在黑暗时的吸收速率,太阳光充足时,浮游植物优先吸收氨氮,然后是硝酸氮和亚硝酸氮。在很低的光照时,浮游植物吸收磷酸盐比无机氮相对要多。福建的江河是陆源物质输入海洋的主要途径,江河径流把大量悬浮的泥沙和丰富的营养盐带入海洋。因此,

抑制海水的富营养化可以维护近海生态平衡,保护海洋环境,减少赤潮和病害的发生^[5]。

无机氮、磷酸盐与叶绿素 a、初级生产力、浮游植物之间存在正相关关系,相关关系较显著,尤其是秋季无机氮与叶绿素 a 相关系数达到 0.599。秋季磷酸盐与叶绿素 a 相关系数达到 0.481。其余为 0.022 ~ 0.165(表 3)。

表 3 福建主要港湾无机氮、磷酸盐与叶绿素 a、初级生产力和浮游植物的相关系数

Table 3 Spearman rank coefficient of nitrogen and chlorophyll - a with primary productivity and phytoplankton in the main bays in Fujian

调查时间	项目	叶绿素 a	初级生产力	浮游植物细胞数
2001.5	无机氮	0.077	0.159	0.165
2001.8	无机氮	0.165	0.171	0.298
2001.11	无机氮	0.599	0.401	0.291
2001.5	磷酸盐	0.055	0.309	0.187
2001.8	磷酸盐	0.022	0.301	0.130
2001.11	磷酸盐	0.481	0.128	0.158

注:97 个样品的平均值。

历年来夏季的初级生产力均是全年最高值,具有明显的季节变化特征,调查海域的初级生产力属中等偏高的水平,与 1990 年的福建省海岛资源综合调查时的含量相近,与 1984 年的福建省海岸带和海涂资源综合调查的含量比较,呈下降趋势。2001 年叶绿素 a 的平均值比 1990 年升高了数倍,但初级生产力未形成相应的倍值,这可能与不同种类的浮游植物的光合作用能力不同有关(表 4)。

表 4 福建主要港湾初级生产力与其他海域比较

Table 4 Surface primary productivity in different month in the main bays in Fujian and other area

调查海域与时间	2 月	5 月	8 月	11 月
主要港湾 (2001 年 5、8 和 11 月) *	-	153.9	412.8	54.9
海岛资源综合调查 (1990 年 5、8 和 11 月,1991 年 2 月) **	17	110	635	68
海岸带 (1984 年 5、8 和 11 月,1985 年 2 月) **	10	376	458	257

注: * 本文调查; * * 福建省海岛资源综合调查; * * * 福建省海岸带和海涂资源综合调查。

2.4 营养盐与初级生产力变化之间的关系

在营养盐输入港湾后,中肋骨条藻增长促进了初级生产力的水平,同时随着海水的涨落潮,外海水在湾内消长,使得高浮游植物生物量的湾内水体和低浮游植物生物量的湾外水体的分布发生规律性变化,这个规律就是浮游植物生物量湾内高而湾外低。

春季营养要素为全年的最低值,结果表明:这个季节是浮游植物生长旺盛期,浮游植物消耗了水体中大量的营养物质,因此生物要素成为春季营养盐时空变化的主控因子。夏季水体中的营养盐含量较高,明显是江河水等陆源物质补充所致。秋季高的营养盐含量则与春、夏季产生的大量有机物的氧化分解,使水体中的营养盐得到补充有关,各种营养要素的平面分布趋势相似。

秋季无机氮与初级生产力存在正相关关系,相关系数达到 0.401。春季、夏季磷酸盐与初级生产力相关系数分别达到 0.309、0.301,其余的为 0.128 ~ 0.171。

2.5 营养盐与浮游植物细胞数量变化之间的关系

近来研究表明,随着近海富营养化的不断加剧,浮游植物的群落结构发生变化,从而导致食物网结构和功能的改变。海洋浮游植物数量大、分布广,种类组成也十分复杂,与调查海域的理化环境条件关系密切,是海洋生态学的重要组成部分。同时,浮游生物是海洋经济动物的饵料基础,其产量和分布对水生动物的繁殖、洄游和渔业产量都有重大影响。

影响浮游植物繁殖生长的环境因素很多,主要有水温、盐度、光照、透明度、营养盐和浮游动物。由于调查海区地处亚热带,终年水温较高,为浮游植物生长提供有利条件。夏季、秋季无机氮与浮游植物细胞数存在正相关关系,相关系数分别达到 0.298、0.291。其余的相关系数为 0.130 ~ 0.187。说明福建主要港湾无机氮和磷酸盐与浮游植物细胞数的相关性较好。不难看出,夏季浮游植物的高峰显然与无机氮和磷酸盐的贡献有关,到了秋季海水的垂直混合已较剧烈,浙闽沿岸流开始影响本海区,秋季本海区浮游植物出现较低值。

夏秋两季,氮与磷的比例(原子比)均高于 17:1(表 5),大部分港湾 DIN/P 之比远远大于通常情况下海洋浮游植物生长所需要的 N:P = 16:1。结果显示在控制浮游植物生物量中磷酸盐起了重要的作用。由于 11 月份罗源湾磷酸盐含量较高,其余均低于 0.031 mg · L⁻¹。氮与磷的比例除了极少数外,均高

表 5 福建主要港湾 5、8、11 月无机氮和磷酸盐含量(平均值)

Table 5 Concentration of nitrogen and primary productivity in the main bays in Fujian in May, Aug. and Nov. (average values)

调查 时间	2001 年 5 月			2001 年 8 月			2001 年 11 月		
	无机氮/ mg · dm ⁻³	磷酸盐/ mg · dm ⁻³	氮磷 比值	无机氮/ mg · dm ⁻³	磷酸盐/ mg · dm ⁻³	氮磷 比值	无机氮/ mg · dm ⁻³	磷酸盐/ mg · dm ⁻³	氮磷 比值
三沙湾	0.232	0.016	32:1	0.225	0.027	18:1	0.482	0.029	38:1
罗源湾	0.156	0.008	55:1	0.245	0.027	19:1	0.494	0.070	17:1
兴化湾	0.046	0.008	15:1	0.099	0.011	23:1	0.250	0.029	20:1
湄洲湾	0.065	0.005	50:1	0.104	0.010	23:1	0.232	0.025	20:1
泉州湾	0.808	0.023	83:1	0.463	0.012	82:1	0.525	0.017	74:1
深沪湾	0.082	0.008	30:1	0.119	0.001	80:1	0.328	0.028	25:1
围头湾	0.063	0.009	13:1	0.170	0.018	20:1	0.362	0.025	32:1
佛昙湾	0.193	0.015	28:1	0.171	0.013	30:1	0.329	0.028	25:1
旧镇湾	0.169	0.008	60:1	0.270	0.010	63:1	0.243	0.027	19:1
诏安湾	0.090	0.007	30:1	0.113	0.007	40:1	0.256	0.024	22:1

注:97 个样品的平均值。

于 17:1,磷酸盐已成为浮游植物生物量和初级生产力分布及其变化的主要限制因子。王保栋^[6-7]发现,夏季近岸海域浮游植物生产力明显受到磷限制,是一年中最明显的季节。北方的胶州湾等海域,在赤潮发生时,常常出现因磷酸盐耗尽而限制浮游植物继续增殖的现象^[8]。

2.6 叶绿素 a 和初级生产力之间的关系

在 2—5 月,随着水温的上升浮游植物开始生长繁殖,冬季水体积累的营养盐逐渐被消耗,形成高叶绿素 a 和低营养盐的关系。在 5—8 月,水温适宜,光照充足,光合作用能力增强,使得叶绿素 a 和初级生产力均维持较高的水平。此后,随着水温下降,秋季的生物量开始明显下降,虽然浙闽沿岸流带来了大量营养盐,使海水中营养盐大幅度上升,但低温和低光照抑制了生物的生长和光合作用能力,使得秋、冬季叶绿素 a 含量趋于低值。

将调查期间 3 个季度表层叶绿素 a 和初级生产力作回归方程分析(见图 2),结果如下:

$y = 114.59x - 150.56 \quad (r = 0.8317, P < 0.01)$

这表明叶绿素 a 和初级生产力的相关性显著,如果在有足够多的现场观测资料的情况下,可以根据叶绿素 a 的浓度来大致估算海区的初级生产力。Ryther 等^[9]通过多年的研究,并根据文献的数据得到了在光饱和的情况下叶绿素 a 每小时可以固定 3.7 g 碳,以此来估算大洋的初级生产力,为评价海洋初级生产力提供很大的方便^[10]。

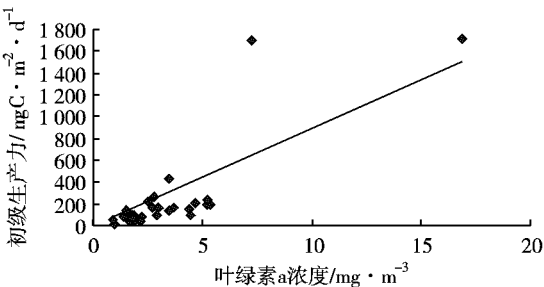


图 2 叶绿素 a 浓度和初级生产力的关系
Figure 2 The relationship between chlorophyll - a with primary productivity and phytoplankton

3 讨论与评价

福建主要港湾叶绿素 a 和初级生产力的研究,对于阐明生态系统的结构和功能及其诸如富营养化和赤潮等环境问题、生物资源的开发都具有重要意义。该海域初级生产力的分布和变化受营养要素的调控,而影响营养要素分布的因素主要有:

(1)调查区主要受 2 种性质差异很大的水体影响,有内源水(沿海的江河水)和外源水(台湾海峡海水)。江河水具有季节变化大、营养盐含量高和盐度低的特点,台湾海峡海水具有高盐和低营养盐、低污染物的特点。九龙江以南海域基本上受外海水影响;闽江口以北海域春、夏季受沿岸流和闽江径流的影响,秋冬季主要受浙闽沿岸流影响,营养盐较丰富。调查结果反映了内源水系和外源水系对环境的影响,使调查区的初级生产力和环境营养要素呈现湾内高,

向湾外有规律地递减的平面分布趋势。营养盐与叶绿素 a、初级生产力、浮游植物存在明显的依存关系,而叶绿素 a、硝酸盐与盐度有显著的负相关关系,表明调查区内、外水系消长对这两者的影响。

(2) 营养要素分布决定了浮游植物生物量的分布,浮游植物生物量反过来又影响营养要素的分布。夏季,当浮游植物大量繁殖消耗了水体中营养要素,超过陆源的补充量时,则形成低营养盐。如果将温度和光照(包含光学状况)作为恒定的自然生态要素,那么营养盐的变化就成为主要的调控因素,而 2001 年 11 月整个调查海域的高营养盐(无机氮平均达 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷酸盐平均达 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显然是某些海域养殖业较发达造成的。

(3) 大部分调查海域叶绿素 a 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,个别港湾叶绿素 a 在 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。说明海区浮游植物比较丰富,有些港湾已达到富营养水平,应适当控制养殖面积,减少高浓度氮、磷废水的排入,防止港湾进一步富营养化。调查海区氮与磷的比例(原子比)均高于 17:1,说明该水域无机氮丰富,浮游植物生长受控于磷酸盐,因此,磷酸盐会成为浮游植物生长的限制因素。

(4) 无机氮、磷酸盐与叶绿素 a、初级生产力、浮游植物存在正相关关系,相关关系显著,尤其是秋季无机氮与叶绿素 a 相关系数达到 0.599。秋季磷酸盐与叶绿素 a 相关系数达到 0.481。秋季无机氮与初级生产力存在正相关关系,相关系数达到 0.401。夏季、秋季无机氮与浮游植物细胞数存在正相关关系,相关系数达到 0.298~0.291。

(5) 根据早期的文献^[11-15],港湾在冬季的初级生产力通常为全年最低,夏季或春季则为全年最高,秋季居中。本次调查除 2 月外(未进行调查),其他各季节的变化与早期报道的相符。夏季初级生产力平均值为 $412.8 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,春季的平均值为 $153.9 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,秋季的平均值为 $54.9 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。本次调查在 8 月份出现比较大范围较高的叶绿素 a 含量,显然是由于环境因素的改变,比如温度的变化,富营养化导致的浮游植物大量繁殖的结果,也必然导致高的初级生产力含量。

(6) 根据初级生产力推算调查海区年平均生产量为 $101 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,结果与 Ryther^[16]提出的世界近

岸水域生产量为 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 一致,也与瓦等海^[17]和渤海^[18]的结果相近。

参考文献:

- [1] 李超伦,张芳,申欣,等. 胶州湾叶绿素的浓度、分布特征及其周年变化[J]. 海洋与湖沼,2005,36(6):499-506.
- [2] 宁修仁,史君贤,蔡立明,等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J]. 海洋学报,2004,26(6):97-107.
- [3] 胡明辉,杨逸萍, Harrison P J. 长江口浮游植物的磷酸盐限制[J]. 海洋学报,1989,11(4):439-443.
- [4] 陈兴群,林荣澄,唐森铭. 泉州湾初级生产力的时空变化特点[J]. 海洋学报,2007,29(1):161-169.
- [5] 钱鲁闽,徐永健,焦念志. 环境因子对龙须菜和菊化心江蓠 N、P 吸收速率的影响[J]. 中国水产科学,2006,13(2):257-262.
- [6] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. 应用生态学报,2003,14(7):1122-1126.
- [7] 王保栋,战闰,藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径[J]. 海洋学报,2002,24(1):53-58.
- [8] 宋秀贤,俞志明. 胶州湾东北部养殖海域夏季营养盐分布特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼,2003,36(5):446-452.
- [9] Ryther J H, Yentsch C S. The estimation of phytoplankton population in the ocean from chlorophyll and light dar[J]. *Limnol Oceanogr*,1957,2:281-286.
- [10] 周伟华,袁翔城,霍文毅,等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报,2004,26(3):143-150.
- [11] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志,第七分册(福建北部海湾)[M]. 北京:海洋出版社,1994:1-293.
- [12] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志,第八分册(福建南部海湾)[M]. 北京:海洋出版社,1994:1-48.
- [13] 福建省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 福建省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社,1990.
- [14] 陈其焕,陈兴群,张明. 福建沿岸叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. 海洋学报,1996,18(6):99-105.
- [15] 李文权,王宪,郭劳动,等. 罗源湾初级生产力评价叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 厦门大学学报(自然科学版),1989,28(增刊):65-70.
- [16] Ryther J H. Photosynthesis and fish production in the sea. The Production of Organic Matter and Its Conversion to Higher Forms of Life Vary Throughout the World, Scien N. Y. 1968,116,72-76.
- [17] Ryther J H. Photosynthesis and fish production in the sea. The Production of Organic Matter and Its Conversion to Higher Forms of Life Vary Throughout the World ocean[J]. *Science*,1969,166:72-76.
- [18] Wafer M V M, P Lecorre and J L Birrien. Nutrients and primary production in permanently well-mixed temperate coastal water. *Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science*,1983,17:431-446.