

# 胶州湾口内初级生产力的周年定点观测\*

潘友联 郭玉洁 曾呈奎

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

**提 要** 于 1983 年 11 月—1985 年 11 月利用黑白瓶测氧法研究了胶州湾东南部的初级生产力及其与各环境因子的关系。结果表明, 调查区内初级生产力的变化范围是  $0.10\text{--}2.82\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  碳, 年初级生产量的平均是  $206\text{g}/\text{m}^2$  碳, 夏半年(5—10 月)的初级生产量平均占全年生产量的 73.45%, 浮游植物的光合作用对有效太阳辐射能的平均利用率是 0.64%, 初级生产力与水温、日太阳辐射能等均呈明显的正相关, 胶州湾的初级生产力及其季节变化规律与其它典型的温带内湾类似。

**关键词** 初级生产力 浮游植物 光合作用 碳同化数 胶州湾

海洋初级生产力是海洋生物生产力的基础, 是海洋食物链的第一个环节。它是发展海洋经济动物的增养殖, 进行水产生农牧化的潜在效益估算的基本参量。胶州湾是一个半封闭的浅海内湾, 环境条件优越, 是一个良好的海洋动、植物养殖场。为此, 本实验在胶州湾东南部进行了包括海水中的叶绿素和初级生产力的两周年的逐月定点研究, 并同时观测了海水透明度、水温、太阳辐射能、海水盐度和营养盐浓度等环境因子, 旨在对这一海区的初级生产力作比较系统的分析, 为实行胶州湾的农牧化提供依据。

## 1 研究方法

在胶州湾口内设两个站(潘友联等, 1995), 从 1983 年 11 月—1985 年 11 月连续进行了 25 个月的逐月定点实验。采用黑白瓶测氧法 (Strickland et al., 1968) 研究初级生产力, 分别从 0, 3, 6, 9m 或 0, 3, 5, 7m 水深处采水 5—7L。先用 52GG 号 筛绢(孔径为  $335\mu\text{m}$ ) 滤去每份水样中的较大形的浮游动物。再分装到 2 个白瓶、2 个黑瓶和 2 个作本底的黑瓶中, 每瓶含水样约 250ml。然后将黑白瓶放回原采水深度, 培养一昼夜后取回按温格勒法测每瓶中的溶解氧, 根据溶解氧的变化量和  $PQ = 1.25$  计算初级生产力。

同时从上述的每份水样中取 2 份叶绿素水样(潘友联等, 1995), 从表层和最下层(底层)的水样中取 2 份营养盐水样和 1 份盐度水样。用 Autoanalyser II 型营养盐自动分析仪分析水样中的  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  和无机磷的浓度 (Strickland et al., 1968)。用 HD-2 型盐度计分析海水盐度。

在采水当天和翌日实验结束取回黑白瓶时观测水下照度、海水透明度和表层水温。在

\* 潘友联硕士论文的部分扩充。潘友联, 男, 出生于 1957 年 12 月, 博士, 通讯地址: Habitat Ecology Division, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Nova Scotia, Canada B2Y 4A2.

杨则禹、张永山、高玉、周汉秋等同志协助海上实验工作, 李冠国教授、费修硬研究员等对本工作提出宝贵意见, D. V. Subba Rao 博士对本稿提出修改意见, 谨志谢意。

收稿日期: 1988 年 10 月 6 日, 接受日期: 1992 年 1 月 6 日。

挂瓶培养期间按西泽一俊·千原光雄(1979)的方法将距离2号站约6km的陆地上所观察到的一天中的地面照度的平均值,换算成光合作用有效太阳辐射的日平均( $W/m^2$ )。再根据昼长(中国科学院紫金山天文台,1978)计算日有效太阳辐射能 [ $kcal/(m^2 \cdot d)$ ]。

## 2 结果

**2.1 环境特点** 胶州湾口小腹大,面积为423km,平均水深为6m,湾口最大水深为50m<sup>3</sup>。除大陆径流带入一些营养盐外,还接纳一些生活污水和工业废水。大多数月份表层海水中无机磷和总无机氮(上述三氮之和)的浓度高于底层。无机磷的平均浓度表、底层分别是0.56和0.43 $\mu mol/L$ ,季节变化明显(图1),冬季较低(1985年1月的在表、底层海水中的无机磷浓度的两站平均值分别为0.20和0.27 $\mu mol/L$ );夏、秋季较高(1984年10月两个站表层的平均为2.55 $\mu mol/L$ )。表、底层总无机氮的平均浓度分别是7.64和6.75 $\mu mol/L$ ,没有明显的季节变化。

胶州湾所接收的光合作用有效太阳辐射(波长为380—720nm)的年平均值是1411 $kcal/(m^2 \cdot d)$ (1984和1985年度分别为1374和1491 $kcal/(m^2 \cdot d)$ )。最高值出现在6,7,8月份,达到3303 $kcal/(m^2 \cdot d)$ (1984年7月4日)。最低值在11,12月,只有387 $kcal/(m^2 \cdot d)$ (1983年11月3日)。

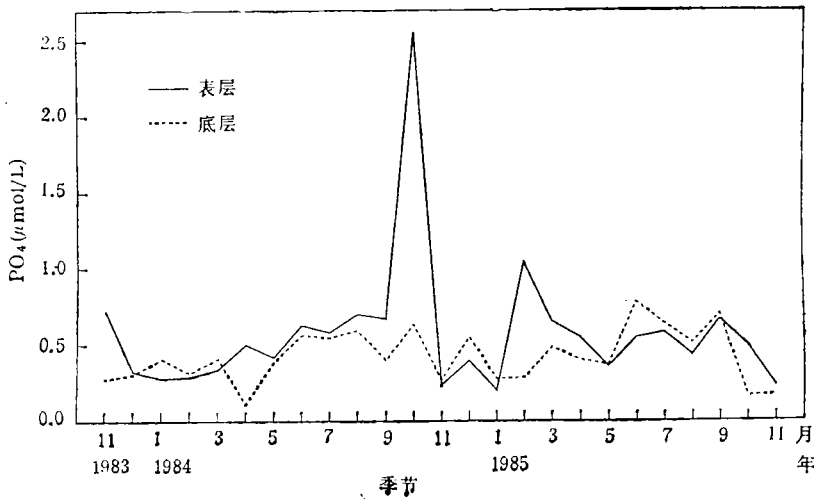


图1 胶州湾海水中无机磷浓度的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of phosphate concentration in the sea water of Jiaozhou Bay

胶州湾口的水温变化明显(图2c),8月最高(25.0—26.0 $^{\circ}C$ );2月最低(1.0—0.7 $^{\circ}C$ );5—8月水温几乎呈直线上升。除1985年秋季外,绝大多数月份的海水盐度均在32.000( $\pm 0.700$ )的范围内变动。1985年,1号站表、底层的盐度分别是24.581和27.932;2号站的盐度也较低。此后,海水盐度逐渐上升,11月两站的平均盐度表、底层分别是30.279和30.418。

**2.2 初级生产力的季节变化** 调查区的年净初级生产量平均是206(160—250)g/

1) 徐鸿楷等,1983,胶州湾污染状况及其自净能力的研究,山东省环境保护局(济南),1—8。

( $m^2 \cdot a$ )碳,毛初级生产量平均为  $303(253-353)g/(m^2 \cdot a)$ 碳(表 2)。1984 年与 1985 年的 9 月初级生产力相差很大(图 2a),净初级生产力分别为  $317$  和  $2820mg/(m^2 \cdot d)$  碳。这两年的初级生产力都是夏、秋季较高:1984 年 6 月的净、毛初级生产力分别是  $1137$  和  $1338mg/(m^2 \cdot d)$  碳,1985 年 9 月的值分别是  $2820$  和  $3308mg/(m^2 \cdot d)$  碳。冬季的初级生产力很低:1984 年 1 月的净、毛初级生产力分别是  $99$  和  $132mg/(m^2 \cdot d)$  碳,12 月分别是  $99$  和  $239mg/(m^2 \cdot d)$  碳。夏半年(5—10月)的净、毛初级生产力分别占当年产量的  $70\%-78\%$  和  $65\%-75\%$ 。

**2.3 初级生产力的垂直变化** 绝大多数月份,这两个站的表层毛初级生产力均高于 3m 层。在夏、秋季,3m 层净初级生产力常常高于表层:1984 年 7 月 4 日 2 号站表层和 3m 层的净初级生产力分别为  $82$  和  $129mg/(m^3 \cdot d)$  碳;1985 年 7 月 10 日的 1 号站分别是  $118$  和  $182mg/(m^3 \cdot d)$  碳。3m 以下的各水层的初级生产力均随深度增加而逐渐下降。因此,水柱中的最高净初级生产力出现在 0—3m 层之间。

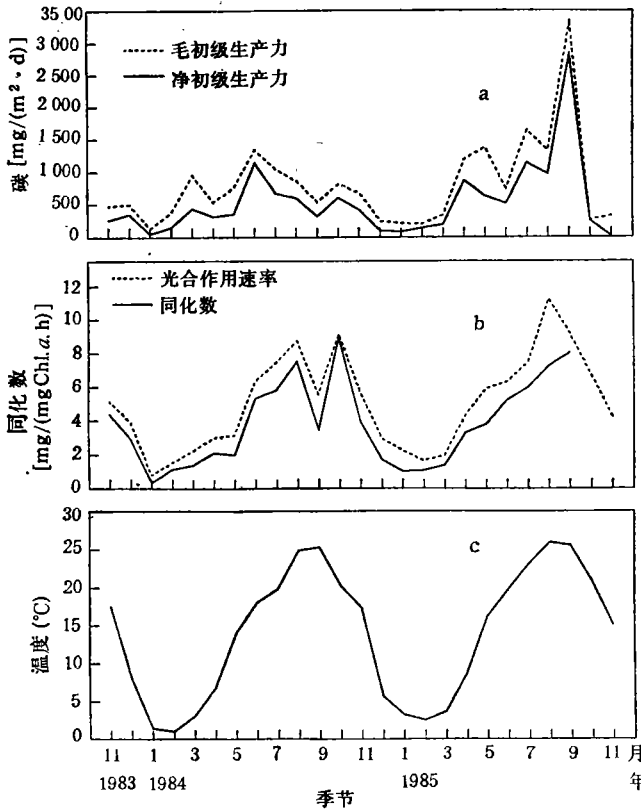


图 2 胶州湾的初级生产力 (a)、同化数 (b) 和水温 (c) 的季节变化  
 Fig. 2 Seasonal variations of primary production (a), assimilation number (b) and water temperature (c) in Jiaozhou Bay

**3 讨论与结语**

**3.1 太阳辐射对初级生产力的作用** 太阳辐射是植物光合作用的能量来源,对海洋初级生产力及其变化的影响较大(表 1):

$$P_n = 30.07 + 36.76S, (r = 0.52, p < 1\%)$$

$$P_g = 146.16 + 0.47S, (r = 0.56, p < 1\%)$$

式中,  $P_n$  为净初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  碳];  $P_g$  为毛初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  碳];  $S$  为日有效太阳辐射能 [ $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]。如上所述, 夏、秋季表层的初级生产力往往不及 3m 层。这主要是表层海水所接收的太阳辐射太强, 产生光抑制作用 (Platt et al., 1980), 光合作用的最大层一般出现在次表层。例如 1984 年 7 月 4 日, 光合作用有效太阳辐射日平均为  $263\text{W}/\text{m}^2$ , 2 号站表层和 3m 层的净初级生产力分别是 82 和  $129\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  碳。又如 1985 年 8 月 4 日太阳辐射平均为  $213\text{W}/\text{m}^2$ , 1 号站的表层和 3m 层的净初级生产力分别是 186 和  $266\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  碳。冬季的太阳辐射较弱, 虽然表层海水中所接收的辐射达到或超过光饱和条件, 次表层海水所接收的辐射却尚未达到光饱和, 因此光合作用的最大值往往出现在表层。

表 1 胶州湾的初级生产力与诸环境因子的相关矩阵

Tab. 1 Correlation matrix of photosynthetic and environmental parameters in Jiaozhou Bay

环境因子	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	叶绿素 $a$		光合作用有效太阳辐射	
		表层 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	真光层 ( $\text{mg}/\text{m}^2$ )	( $\text{W}/\text{m}^2$ )	( $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )
毛初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	0.56 <sup>1)</sup>	0.52 <sup>2)</sup>	0.39 <sup>3)</sup>	0.54 <sup>4)</sup>	0.56 <sup>1)</sup>
净初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	0.56 <sup>1)</sup>	0.50 <sup>1)</sup>	0.34 <sup>4)</sup>	0.52 <sup>1)</sup>	0.52 <sup>1)</sup>
光合作用速率 [ $\text{mg}/(\text{mg Chl.} a \cdot \text{h})$ ]	0.93 <sup>2)</sup>	—	—	0.71 <sup>2)</sup>	0.60 <sup>2)</sup>
同化数 [ $\text{mg}/(\text{mg Chl.} a \cdot \text{h})$ ]	0.88 <sup>2)</sup>	—	—	0.68 <sup>2)</sup>	0.51 <sup>2)</sup>

环境因子	无机磷 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )		总无机氮 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ )		溶解氧 饱和度 (%)
	表层	底层	表层	底层	
毛初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	0.12 <sup>ns</sup>	0.54 <sup>1)</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	-0.20 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>
净初级生产力 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	0.16 <sup>ns</sup>	0.55 <sup>1)</sup>	-0.02 <sup>ns</sup>	-0.09 <sup>ns</sup>	0.22 <sup>ns</sup>
光合作用速率 [ $\text{mg}/(\text{mg Chl.} a \cdot \text{h})$ ]	0.47 <sup>2)</sup>	0.52 <sup>1)</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>	0.18 <sup>ns</sup>
同化数 [ $\text{mg}/(\text{mg Chl.} a \cdot \text{h})$ ]	0.61 <sup>2)</sup>	0.51 <sup>1)</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	-0.06 <sup>ns</sup>	0.22 <sup>ns</sup>

$n = 25$ ; 置信水平: 1) = 99%, 2) = 99.9%, 3) = 95%, 4) = 90%; ns = not significant.

一般认为, 当光合作用有效辐射为  $60\text{W}/\text{m}^2$  时, 浮游植物的光合作用就已经达到了光饱和 (Platt et al., 1976; Platt, 1983)。在光强低于饱和条件时, 浮游植物光合作用对光量子的利用率较高 (Platt et al., 1980; Pan et al., 1991)。例如 1983 年 11 月和 1984 年 3 月, 光合作用有效辐射都只有  $42\text{W}/\text{m}^2$ , 浮游植物对辐射能的利用率分别是 1.14% 和 3.43%。其它月份的辐射都超过了  $60\text{W}/\text{m}^2$ , 除 1985 年 9 月外, 所有其它月份浮游植物对有效辐射能的利用率均低于 1%。实验期间 (1983 年 11 月—1985 年 11 月) 观察区内浮游植物对有效辐射能的利用率平均为 0.64%。

**3.2 水温对初级生产力的影响** 温度是一切酶促反应的控制因子, 虽然它对光合作用的原初光反应过程影响不大, 它对暗反应中的诸酶促反应过程的影响却很大, 因此水温的高低与海洋初级生产力的关系密切。观测区内的水温变化于 1.0—26.0℃ 之间, 初级生产力与水温 ( $T, ^\circ\text{C}$ ) 呈显著的正相关(表 1):

$$P_n = 37.01T + 38.96, (r = 0.56, p < 1\%),$$

$$P_g = 43.70T + 205.75, (r = 0.56, p < 1\%).$$

光合作用速率和同化数与水温的相关更加显著(表 1, 图 2b)。这主要是因为它们排除了昼长和生物量(叶绿素  $a$  浓度)的干扰(潘友联等, 1992)。

**3.3 营养盐类和大陆径流的影响** 相关分析结果表明胶州湾海水中无机氮浓度较高, 不成为初级生产力的限制因子(表 1)。无机磷浓度与光合作用速率和同化数显著相关, 因此也影响初级生产力。如 1984 年 10 月的高初级生产力主要是由于海水中的无机磷浓度特别高促成的, 该月两站的水温、盐度和生物量都与 9 月和 11 月无明显的差异。在相关分析中, 由于昼长和生物量各自与初级生产力的相关性均超过了无机磷, 从而掩盖了无机磷的作用。

表 2 胶州湾的月初级生产量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

Tab. 2 Monthly primary production in Jiaozhou Bay ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

月 份	毛生产量	净生产量	月 份	毛生产量	净生产量
1983 年			1984 年		
11	14.26	7.82	11	20.25	12.57
12	15.46	10.85	12	7.42	2.98
1984 年			1985 年		
1	4.10	3.07	1	7.25	4.00
2	10.90	4.42	2	5.62	4.05
3	29.30	13.49	3	10.42	6.03
4	15.96	9.34	4	35.70	25.77
5	23.25	10.82	5	42.25	19.38
6	40.14	34.11	6	22.11	15.28
7	32.09	20.71	7	50.46	35.15
8	26.47	18.36	8	40.87	29.80
9	15.90	9.51	9	99.24	84.60
10	24.97	18.57	10	11.53	11.30
			11	9.62	5.68
1983 年 11 月— 1984 年 10 月 年产量	252.8	161.1	1984 年 11 月— 1985 年 10 月 年产量	353.1	250.9

这两年的 9 月份初级生产量相差  $75.1\text{g}/\text{m}^2$  碳(表 2)。1984 年的低初级生产力可能是由于 8 月底有两艘油轮相继在胶州湾黄岛石油码头附近大量漏油, 污染了全湾的海水。1 号站位于黄岛码头附近海区, 受到的污染影响比 2 号站严重, 其初级生产力只有 2 号站的一半 [1, 2 号站 1984 年 9 月的初级生产力分别是  $231.3$  和  $436.5\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  碳]。1985 年 9 月的高初级生产力应归因于大陆径流带来的陆源营养物。1985 年 8 月底和 9 月初, 台风导致大量降水使排入胶州湾的大陆径流量猛然增加, 带来了许多陆源营养

物并使表层和底层的盐度分别降到 25 和 28 以下,使初级生产力和浮游植物生物量都增至一年中的最高峰。该月的初级生产量占全年产量的 33.71% (表 2)。然而,把这两个年度的初级生产量的平均当作为正常条件下的年初级生产量,每年胶州湾口的浮游植物可生产 206g/m<sup>2</sup> 碳(表 2),其中夏半年(5—10 月)平均占 73.45%。

**3.4 叶绿素浓度的影响** 初级生产力的高低取决于初级生产者的多少(生物量)和单位初级生产者的生产能力(同化数)。海水中叶绿素浓度是浮游植物生物量的指标之一(潘友联, 1987a),但不同水层中所接收的太阳辐射不同,浮游植物的生产能力也不同,因此表层和次表层的初级生产力往往高于其它较深层次。表层的浮游植物一般都处于光饱和条件下,而其下层的浮游植物却处于光未饱和的条件下。因此海水中叶绿素虽然是初级生产力的一个决定因子,但它不能直接代表海洋初级生产力(潘友联, 1987a)。

综上所述,各环境因子对初级生产力的影响不是独立而是综合影响的。其中海水中的叶绿素(Chl.a, mg/m<sup>3</sup>)和同化数 [ $P_n^a$ , mg/(mg Chl.a.h) 碳] 是决定因素。日辐射量( $S$ , kcal/m<sup>2</sup>)和水温( $T$ , °C)是最显著的限制因素:

$$P_n = 0.185S + 114.17P + 157.77\text{Chl.a} - 617.83 \quad (r = 0.85, p < 0.1\%),$$

$$\text{或 } P_n = 20.25T + 90.84P + 157.77\text{Chl.a} - 530.20 \quad (r = 0.84, p < 0.1\%).$$

表 3 世界各温带海区的初级生产力的比较

Tab. 3 Comparison of primary production values from temperate coastal waters in the world

地点	纬度(N)	季节	同化数 [mg/(mg Chl. a·h) 碳]	初级生产力 [g/(m <sup>2</sup> ·d) 碳]	年初级生产量 (g/m 碳)	参考文献
胶州湾	36°	周年	3.8 (0.34—8.97)	0.1—2.8	206	本文
大连湾	41°	周年		0.31—2.6		王惠琴, 1989
特拉华河口	39°	周年	3.8 (1.0—22.7)	<0.1—4.2	307	Pennock 等, 1986
切萨皮克湾	37°	周年	3.9 (1.3—10.3)	0.1—3.3	73—365	Flemer, 1970
贝得福湾	42°	周年		0.09—2.43	220	Platt 等, 1975
诺瓦斯科夏 沿海	42°	周年	4.9 (0.73—24.8)			Platt 等, 1976
世界平均			3.7 (2.1—5.7)			Ryther 等, 1957

胶州湾口的实测初级生产力与许多其它温带沿海水域、内湾和河口的初级生产力水平类似(表 3)。本实验所设的两个站分别位于胶州湾潮汐往复流的主流两翼(王化桐等, 1980),涨落潮流均经过这两个站;1 号站受涨潮流带来的湾口海水影响较大,2 号站受落潮流带来的湾内海水影响较大。虽然这两个站均位于深水区,但是这两个站的真光层一般在 6—10m (潘友联, 1987b),其理、化条件和生物学通量对全湾有一定的代表性。胶州湾的初级生产力水平较高,间于普通沿岸区 [100g/(m<sup>2</sup>·a) 碳] 和上升流区 [300g/(m<sup>2</sup>·a) 碳] 的水平 (Ryther, 1969; 潘友联, 1987a);而且浮游植物的生物量也较高(郭玉洁等, 1992)。因此,胶州湾具有发展海水养殖业的潜力。

## 参 考 文 献

- 王化桐等, 1980, 胶州湾环流和污染扩散数学模拟 I. 胶州湾环流的计算, 山东海洋学院学报, 10(1): 23—63。
- 王惠琴, 1989, 大连湾赤潮生物的特征, 中国环境科学, 9(1): 1—10。
- 中国科学院紫金山天文台, 1978, 一百年日历表, 科学出版社(北京), p. 204。
- 郭玉洁、杨则禹, 1992, 浮游植物, 刘瑞玉主编, 胶州湾生态学和生物资源, 科学出版社(北京), 136—169。
- 潘友联, 1987a, 叶绿素与海洋初级生产力, 海洋科学, 1: 63—65。
- 潘友联, 1987b, 胶州湾两个站的海水透明度和水下照度周年观测资料的初步研究, 海洋科学, 3: 49—53。
- 潘友联、曾呈奎、郭玉洁, 1992, 浮游植物的碳同化数, 刘瑞玉主编, 胶州湾生态学和生物资源, 科学出版社(北京), 126—135。
- 潘友联等, 1995, 胶州湾口内叶绿素浓度的周年变化和垂直分布, 海洋与湖沼, 26(1): 21—27。
- 西泽一俊· 千原光雄, 1979, 藻类研究法(日), 共立出版, 427—441。
- Flemer, D. A., 1970, Primary productivity in the Chesapeake Bay, *Chesapeake Science*, 11: 117—129。
- Pan, Y., Subba Rao, D. V. and Warnock, R. E., 1991, Photosynthesis and growth of *Nitzschia pungens* f. *multiseriis*, a neurotoxin producing diatom, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 154 (1): 77—96。
- Pennock, J. R. and Sharp, J. H., 1986, Phytoplankton production in the Delaware Estuary: temporal and spatial variability, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 34: 143—155。
- Platt, T., 1983, Photosynthesis of picoplankton in the oligotrophic ocean, *Nature*, 301 (24): 702—704。
- Platt, T. and Jassby, A. D., 1976, The relationship between photosynthesis and light for natural assemblages of coastal marine phytoplankton, *J. Phycol.*, 12 (4): 421—430。
- Platt, T., Gallego, C. L. and Harrison, W. G., 1980, Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton, *J. Mar. Res.*, 38 (4): 687—701。
- Platt, T. and Subba Rao, D. V., 1975, Primary production of marine microphytes, In *Photosynthesis and productivity in different environments*, International Biological Programme Vol. 3, Cambridge Univ. Press, pp. 249—280。
- Ryther, Y. H., 1969, Photosynthesis and fish production in the sea, *Sciences*, 166: 72—77。
- Ryther, J. H. and Yentsch, C. S., 1957, The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data, *Limnol. Oceanogr.*, 2(3):281—286。
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R., 1968, A Practical Handbook of Seawater Analysis, *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, 167pp。

## ANNUAL PRIMARY PRODUCTION IN THE INLET OF JIAOZHOU BAY, CHINA

Pan Youlian<sup>†</sup>, Guo Yujie, Zeng Chengkui (C. K. Tseng)

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071*)

### ABSTRACT

Primary production was determined by oxygen exchange method over a 25 month period (November 1983 to November, 1985) at two stations (1:120° 14.60'E, 36° 04.00'N; 2:120° 16.54'E, 36° 04.46'N) in the inlet of Jiaozhou Bay, Qingdao, China. On a seasonal basis the water column primary production varied significantly from 0.10 to 2.82 g/(m<sup>2</sup>·d) carbon corresponding with the winter and late summer. The annual production was 206 g/m<sup>2</sup> carbon and compares favourably with those from temperate coastal waters, embayments and estuaries. More than 73% of the annual primary production was contributed during the Summer-Fall months (May—October). The photosynthetic energy efficiency [% of photosynthetic active solar radiation (PAR) assimilated during photosynthesis, kcal/(m<sup>2</sup>·h)] was 0.64% on the average. The primary production was significantly correlated with the PAR ( $r = 0.56$ ,  $p < 1\%$ ,  $n = 25$ ), water temperature ( $r = 0.56$ ,  $p < 1\%$ ,  $n = 25$ ), chlorophyll a concentration ( $r = 0.52$ ,  $p < 1\%$ ,  $n = 25$ ) and phosphate concentration ( $r = 0.55$ ,  $p < 1\%$ ,  $n = 25$ ).

**Key words** Primary production Phytoplankton Photosynthesis Carbon assimilation number Jiaozhou Bay

<sup>†</sup>Correspondence address: Youlian Pan, Habitat Ecology Division, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, B2Y 4A2.