

胶州湾的初级生产力和新生产力*

王 荣 焦念志 李超伦 沈志良 吉 鹏

(中国科学院海洋研究所)

海洋初级生产力是海洋食物链的基础,是进行海洋生物资源评估和合理开发利用的基本依据。70 年代在国际生物圈计划 (IBP) 的推动下,本领域的一些学者曾在世界各大洋的代表性海区进行过大量现场观测研究。最近,随着世界性的资源与环境问题的日趋严重,全球 C 循环已成为人们关注的研究课题。海洋初级生产力是了解全球 C 循环必不可少的指标之一,因而再度成为生物海洋学家的研究对象。新生产力是总初级生产力的一部分,亦是海洋 N 循环的特征参数,对于大洋水域而言,它反映了真光层生物群落的净生产力,代表了真光层向下输出的 C 通量,是当今有关国际研究计划,如全球海洋通量联合研究 (JGOFS) 的核心内容之一。初级生产力和新生产力的研究,对于海洋生物资源的持续利用和 C、N 生物地球化学循环具有十分重要的意义。

胶州湾作为我国温带地区的典型海湾,已成为我国生态研究系统网络 (CERN) 的野外观测站。代表性的地理位置和强度开发下的生态条件,使其生态学资料在环境监测和资源开发方面极具理论意义和应用价值。胶州湾的初级生产力曾用黑白瓶生氧量法测定过(郭玉洁等,1992),而新生产力的实测研究在国内尚属空白。本文运用 ^{14}C 、 ^{15}N 同位素示踪方法,在胶州湾进行了季节性的初级生产力和新生产力现场实验研究,获得了比较系统的观测资料。

一、材料与方 法

1. 研究海区和研究周期

北纬 $35^{\circ}55'$ — $36^{\circ}18'$, 东经 $120^{\circ}04'$ — $120^{\circ}23'$ 之间,面积 423km^2 ,平均水深约 7m。胶州湾是一个半封闭型海湾,周围分布着青岛、胶州、胶南各市,工农业生产和增殖生产造成了向湾内较高的营养输入。观测站位为 CERN 的 1—10 号标准站位 (图 1)。自 1991 年 11 月至 1993 年 5 月分别于代表冬、春、夏、秋的 2, 5, 8, 11 月份进行现场实验研究,共进行了 7 个航次的观测。

2. 采样

以水下照度计确定 0.1% 表层光强 (I_0) 深度为真光层底部。用于叶绿素、营养盐测定的水样采自表层 0.5m 和真光层底部,当真光层大于 10m 时再在中间加采一层。用于

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2383 号。

收稿日期: 1994 年 1 月 19 日。

光合作用速率垂直分布和N吸收速率垂直分布的水样采自 100% I_0 , 50% I_0 , 30% I_0 , 15% I_0 , 5% I_0 和 1% I_0 深度或 100% I_0 , 50% I_0 , 25% I_0 , 7% I_0 和 2% I_0 深度。

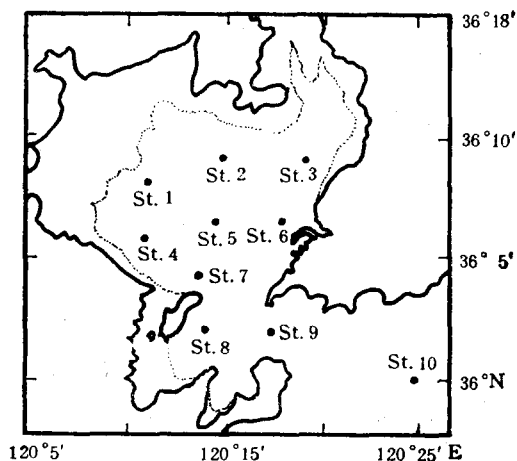


图1 站位

3. 叶绿素、营养盐测定

叶绿素按 Parsons *et al.* (1984) 的方法用 Tuner Design Model-10 荧光光度计测得。 NO_3^- -N 以铜铬还原法, NH_4^+ -N 以次溴酸钠氧化法, PO_4^{3-} -N 以钼-锑-钨法, 用 Technicon AA-II 自动分析仪测定。

4. 初级生产力测定

250mL 的无色玻璃瓶罩以相应于采水处透光度的遮光袋, 加入 $2\mu\text{Ci NaH}^{14}\text{CO}_3$, 于流水控温槽内模拟现场培养 4—6 h, 每样 2 个白瓶, 1 个黑瓶。水样培养完毕后用 0.45 混合纤维素膜过滤, 并用人工海水冲

洗。膜样用浓盐酸薰 8—10min, 然后置于闪烁瓶中, 加入 10mL Bio-Solv-3 Fluorallyloy™ 闪烁液, 用外标准法进行淬灭校正, 在 Backman LS-9800 计数器上进行放射强度测定。按 Parsons *et al.* (1984) 的方法由盐度值推算海水中 CO_2 含量, 并计算光合作用速率。

5. 新生产力测定

500mL 或 1000mL 的无色玻璃瓶罩以遮光袋作培养瓶, 分别以 95.44% 丰度的 K^{15}NO 和 95.26% 丰度的 $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 作为 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的示踪剂, 于甲板上模拟现场培养 4—6h, 每样 2 白瓶, 1 黑瓶。培养后的水样用灼烧 (500℃, 5—6h) 过的 GF/F 在低真空度 ($< 0.03\text{MPa}$) 下抽滤, 并用人工海水涮洗 80—100mL。膜样于 -20°C 下冰冻保存。 ^{15}N 丰度和氮浓度按离子质谱法 (焦念志等, 1993) 由 IMS-ST-88 质谱仪测得。N 吸收速率按 Grunseich *et al.* (1980) 的公式计算。 NO_3^- -N 吸收速率与 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 吸收速率之和的比值即为 f -比 (Eppley & Peterson, 1979), f -比与总初级生产力之积即为以 C 表示的新生产力。

6. 初级生产力和新生产力的推算

通常现场实验研究仅在 5 号站和 10 号站进行, 其他站位的初级生产力和新生产力分别由同化数 (AN) 和 f -比模型推算而得。即: 每航次将在 5 号站和 10 号站求得真光层平均的同化数, 与待推算站位的真光层平均叶绿素之积, 乘以真光层深度即得到其光层积分的光合作用速率, 最后乘以日长即得到日初级生产力。对于新生产力, 首先将 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 的现场浓度按 NO_3^- -N— NH_4^+ -N 吸收相互作用模型 (Jiao, 1993) 求得 f -比, 然后再与初生产力相乘求得以 C 表示的新生产力。通常湾内与湾外的生态条件有较明显差异, 因而湾内站位 (包括 1, 2, 3, 4, 6, 7) 由 5 号站推算, 而 8, 9 两站由 10 号站推得。

二、结果与分析

1. 理化环境状况

胶州湾水温季节变化明显,冬季最低(4°C),夏季最高(27°C),春、秋两季约为 $13-15^{\circ}\text{C}$ 。辐照状况也有类似的变化趋势,只是变动幅度较小(表 1)。

胶州湾的N营养盐始终是以 NH_4^+-N 占绝对优势, NO_3^--N 仅占 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 总量的 10% 左右。与N源水平相比, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 则相对不足。N, P 营养盐的季节变化较明显,基本规律是冬季较高,夏季较低。三种营养盐的水平分布(全年平均)规律也大致相同,湾内以东、北部为最高,湾中心次之,西、南部较低。湾口部与湾中心相当,湾口之外侧明显低于湾口和湾内部(图 2)。

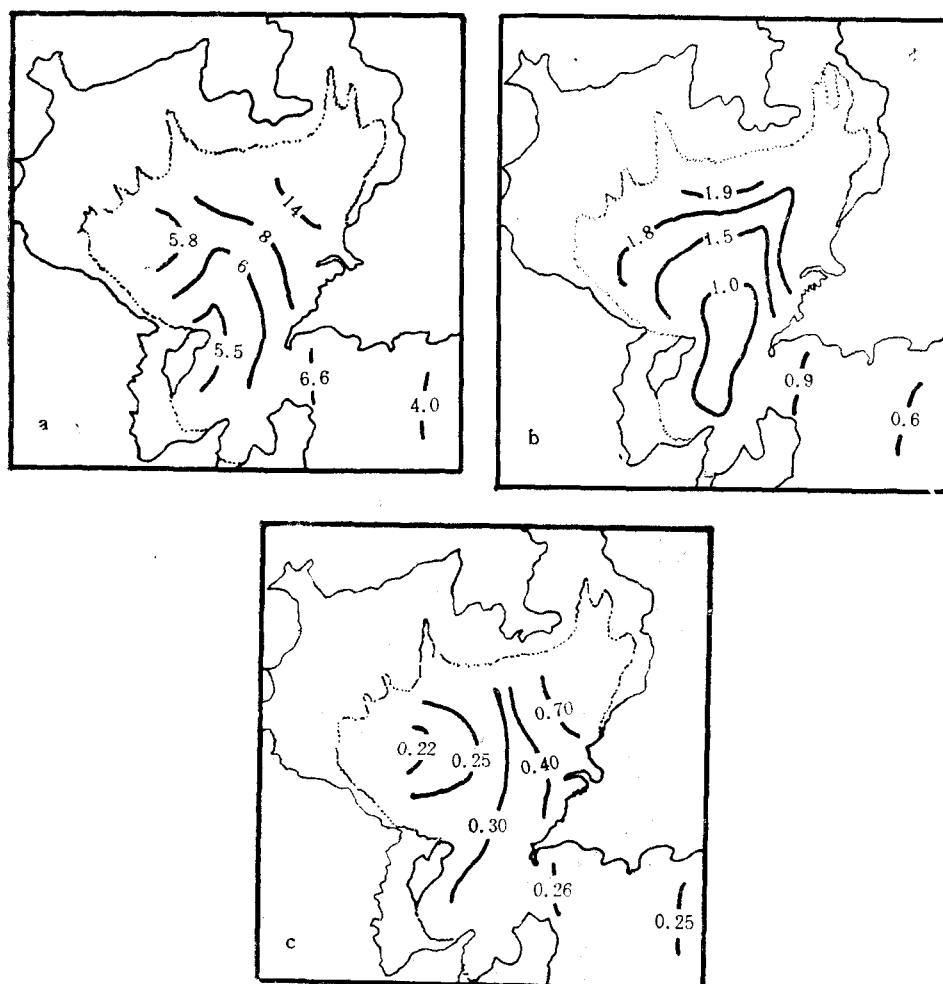


图 2 胶州湾营养盐的水平分布 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$)

a. NH_4^+-N ; b. NO_3^--N ; c. $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$

表 1 各调查季节胶州湾的平均理化状况

时 间	水温 ($^{\circ}\text{C}$)	光 照 ($\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$)
1991 年 11 月	15.0	1200—1246	0.26 ± 0.18	1.00 ± 0.77	5.94 ± 4.33
1992 年 2 月	4.3	860—1100	0.29 ± 0.16	1.41 ± 1.25	8.50 ± 4.39
1992 年 5 月	12.0	1090—1390	0.42 ± 0.23	1.09 ± 0.92	6.44 ± 3.87
1992 年 8 月	27.0	1360—1550	0.24 ± 0.03	1.27 ± 0.61	7.21 ± 4.15
1992 年 11 月	13.5	1240—1310	0.32 ± 0.09	1.24 ± 0.43	6.81 ± 1.56
1993 年 2 月	4.0	—	0.33 ± 0.09	1.49 ± 0.79	7.32 ± 2.99
1993 年 5 月	14.0	—	0.25 ± 0.10	1.89 ± 0.85	6.18 ± 2.66

2. 叶绿素 a

全湾叶绿素 a 的平均含量在不同季节和不同年份变化较大(图 3),在整个调查期间,从 1992 年 2 月的极小值 $1.37\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 到 1993 年春季的极大值 $4.10\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,增长幅度达 3 倍。在 1991 年 11 月到 1992 年 11 月的年度周期中,叶绿素 a 仅于春季出现一

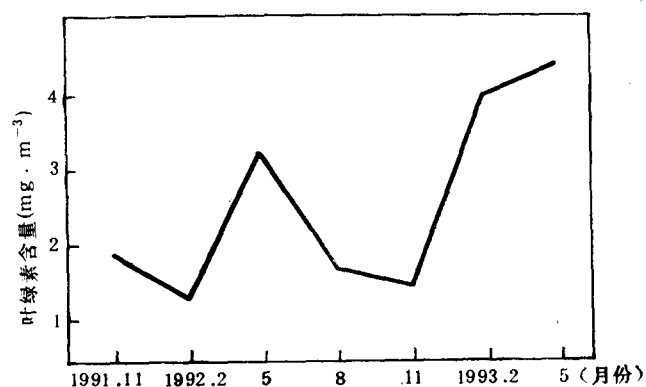
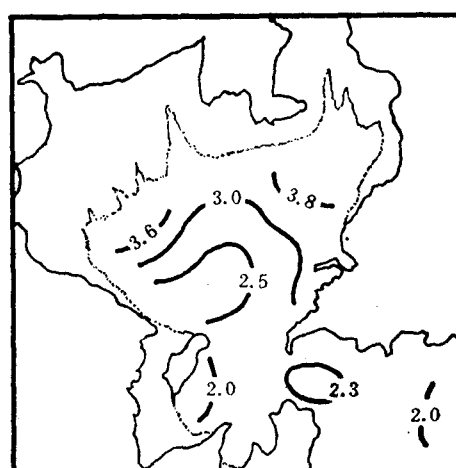


图 3 胶州湾叶绿素含量的季节变化

图 4 胶州湾叶绿素 a 的平面分布 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

个高峰 ($3.10\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 其他季节波动不大, 而自 1993 年 2 月开始急剧增加, 并持续到 5 月达到整个调查期的最大值。可见不同年份之间叶绿素 *a* 的重现性并不好, 其原因主要在于环境条件, 特别是营养盐的变化。由表 1 可见, 1993 年冬、春季节营养盐, 特别是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 明显增高, 显然, 由此引起了浮游植物的迅速繁殖, 形成了早春水花。分粒级的叶绿素测定表明, 早春水花主要由 Netplankton 形成。

胶州湾叶绿素各季节综合平均的水平分布情况如图 4 所示, 西北部大沽河口方向和东北部口湾方向的含量最高 ($3.6\text{--}3.8\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 东南部青岛大港码头附近也较高, 湾中心和西南部较低 ($2.2\text{--}2.5\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 黄岛以南前湾海区含量最低 ($<2\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); 胶州湾口比湾中心略低 ($2.3\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 而大公岛附近的外海水域更低一些 ($2.2\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。这种平面分布格局显然主要取决于营养盐的供给, 这一点可从图 4 与图 2 营养盐分布的比较中得到确认。

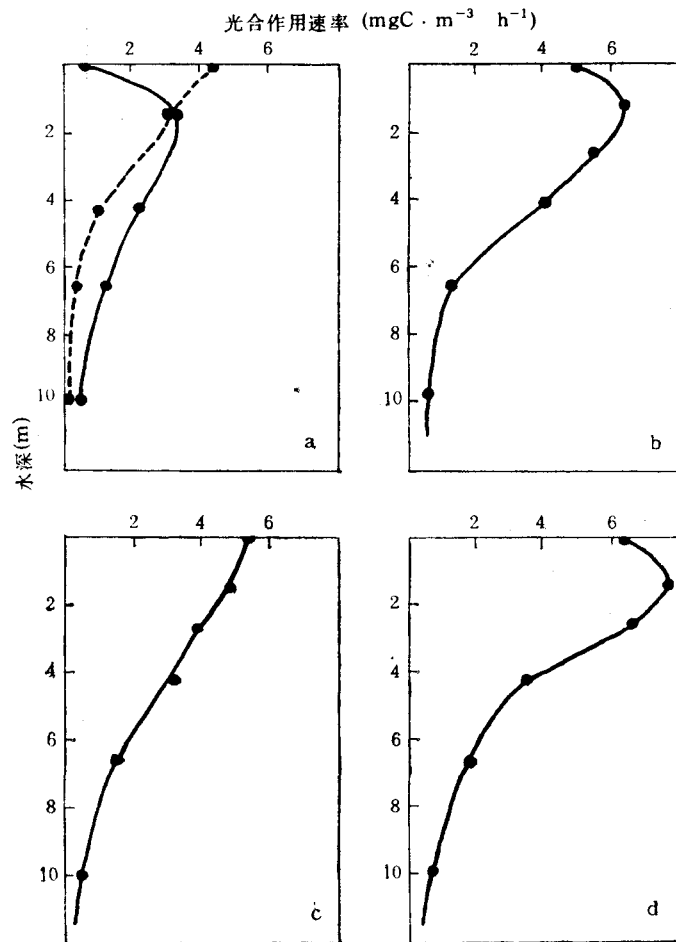


图 5 胶州湾 5 号站光合作用速率的垂直分布曲线

a. 秋; b. 冬; c. 春; d. 夏

----1991 年 11 月

3. 光合作用速率及同化数

(1) 光合作用速率的垂直分布: 分别于 1991 年 11 月和 1992 年 2, 5, 8, 11 月在 5 号站进行不同透光率水层的现场实验结果表明, 绝大多数情况下, 表层 ($100\% I_0$) 的光合作用速率都受到抑制, 而在次表层 ($50\% I_0$ 附近) 出现光合作用速率的极大值, 然后随着水深的增加, 光合作用速率迅速下降, 真光层底部 ($1\% I_0$) 的光合作用速率仅为 $50\% I_0$ 处的 5% 弱。这种垂直分布曲线的变化幅度在夏、冬季更为明显, 而春、秋季相对较弱(图 5)。

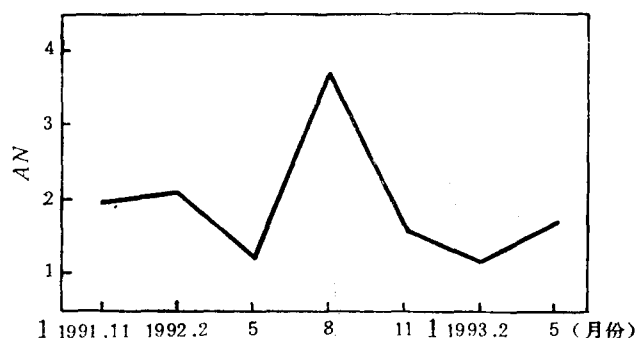


图 6 胶州湾 5 号站真光层平均同化数的季节变化

(2) 同化数: 由 5 号站真光层积分后平均光合作用速率与真光层平均叶绿素含量之比求得真光层平均的同化数。研究期间同化数有一个明显的高峰, 即 1992 年夏季 ($AN=3.71$) (图 6)。1993 年春季虽然光合速率最高, 但叶绿素含量也最高, 因而 AN 数值并不大。可见, 光合作用效率在较高温度下明显增高。

(3) 光合作用速率的海区特征和季节变化: 按照胶州湾的自然条件将调查海域分为 3 个海区, 即湾内区 (1—7 号站)、湾口区 (8, 9 号站) 和湾外区 (10 号站)。3 个区平均光合速率呈现出较明显的差异(图 7), 除少数季节外, 光合速率在湾内最高, 湾外次之, 湾口最小。光合速率的这种平面差异反映了海区生态条件的不同。湾内营养条件较好, 叶绿素 a 含量较高, 因而具有较高的光合作用速率; 而湾口区流速大, 叶绿素 a 含量低, 光合作用速率也就低。图 7 中 3 个海区光合作用速率的季节变化呈现了相同的规律, 分别在 1992 年夏季和 1993 年春季形成两个高峰值 ($6.66 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.67 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$), 而在 1992 年冬季和秋季分别出现两个低谷 ($1.84 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $2.40 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)。从叶绿素的季节变化 (图 3) 和同化数季节变化 (图 6) 可见, 高峰值的出现是高同化效率(夏季)和高生物量(春季)的结果, 而两个低谷的出现则主要是生物量较低所致。

4. 初级生产力

初级生产力的平面分布在不同季节有所差异(图 8a, b, c, d, e, f)。春季以湾中心、湾口部为最高 (1992 年为 $434-451 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 1993 年为 $955-1271 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), 湾外区较低 (1992 年为 $382 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 1993 年为 $627 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), 而湾内东部沿岸区为最低 (最低值在 1992 年为 $296 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 1993 年为 $287 \text{ mg C} \cdot$

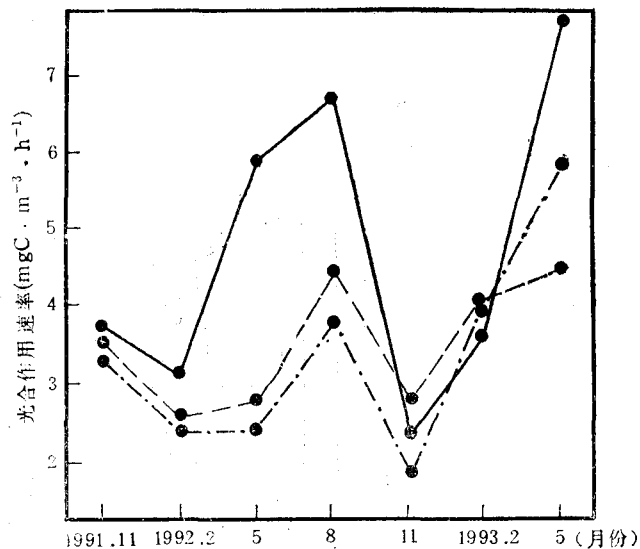


图7 胶州湾各海区光合速率的季节变化
(—湾内; - · - · -湾口; ---湾外)

$\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) (图 8b,f)。在夏季,湾内部各站分化明显,真光层较大的西南海区初级生产力最高,为 $1053\text{--}1090\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$;而真光层较浅的其他沿岸海区虽然具有较高的光合作用速率,然而现场初级生产力仍都较低;开阔水面(如 5, 10 号站)处于中等水平 ($625\text{--}773\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) (图 8c)。在秋季,湾口以外(9, 10 号站)的水域为最高 ($455\text{--}748\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$);湾中心及西部、南部水域次之 ($239\text{--}542\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$);而北部、东部则最低 ($154\text{--}172\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) (图 8a,d)。在冬季,湾口以外及东部海区为最高(1992 年为 $371\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 1993 年为 $572\text{--}646\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 个别站位可达 $1084\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$);湾内中西部海区及前湾海区较低 ($274\text{--}545\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$);北部海区为最低 ($207\text{--}246\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) (图 8e)。综合考察各季节的情况,胶州湾初级生产力的水平分布规律为:湾口外高于湾内,湾内中西部区高于其它浅海区。这种分布与光合作用速率的分布有很大差异,原因在于初级生产力不仅取决于光合作用速率,还取决于进行光合作用的有效空间(即真光层)。沿岸海区水深浅、透明度小,尽管是有较高的光合速率,然而每单位面积下的初级生产力相对于真光层较大的海区来说反而较小了。胶州湾所有站位一年四个季节平均的初级生产力为 $503 \pm 184\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

5. 氮营养盐的吸收速率

(1) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收速率的垂直分布: 1991 年秋季和 1992 年春、夏季进行的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收速率垂直分布实验结果(图 9)表明,除 1991 年 11 月 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收速率(图 9c)外,其他 N 的吸收在海水表层均受到了一定程度的抑制,而在次表层(50% I_0 水深左右)则出现吸收极大值。光抑制的程度在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收要弱。吸收速率随水深增加而递减,这种变化趋势在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收要强得多,在真光层底部, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收已趋近于零,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率仍很高,达最大吸收的 40%—50%(图 9a, b, c, d)。

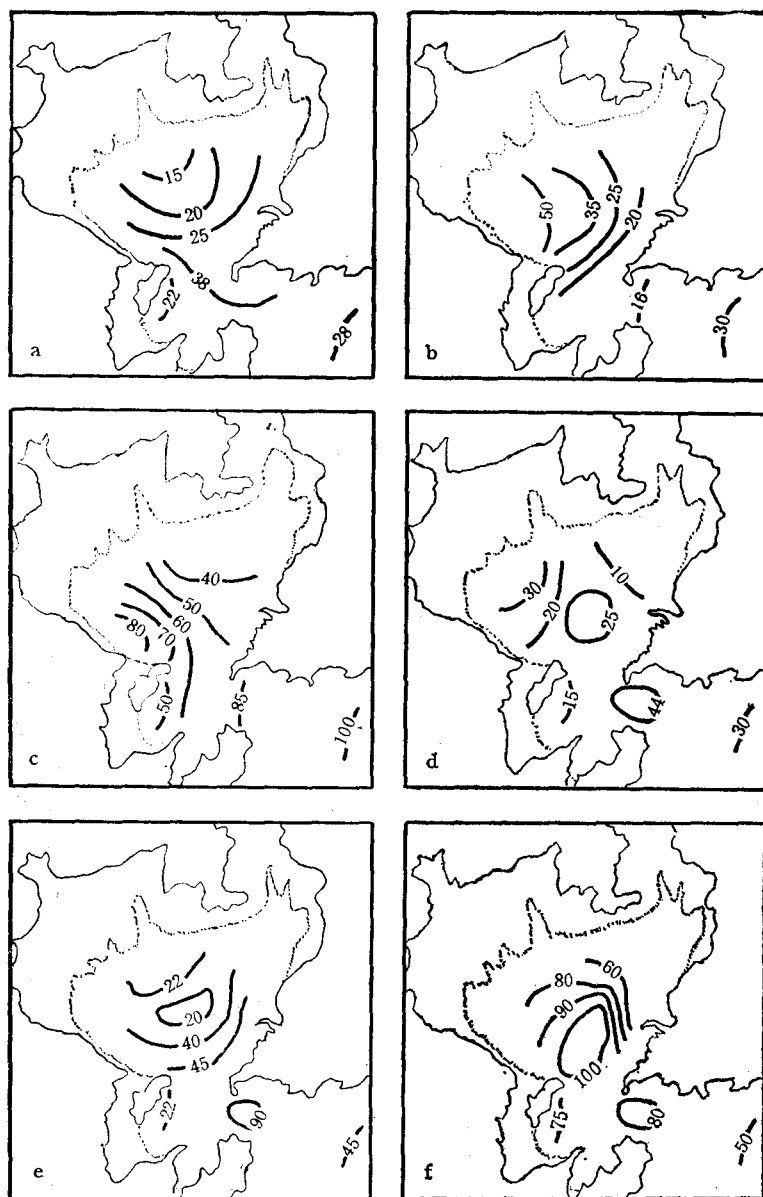


图8 胶州湾不同季节初级生产力的水平分布 ($\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

a. 1991年秋季; b. 1992年春季; c. 1992年夏季; d. 1992年秋季; e. 1993年冬季; f. 1993年春季

(2) NH_4^+-N 和 NO_3^--N 吸收的季节变化: 胶州湾 5, 10 号站表层海水 (0.5m) 中 NH_4^+-N , NO_3^--N 吸收的季节变化规律大致相同 (图 10)。在研究期间突出的吸收峰值出现在夏季, 此时 NH_4^+-N 的吸收速率在湾内达 $0.132 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 湾外为 $0.085 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; NO_3^--N 的吸收在湾内为 $0.0123 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 在湾外为 $0.0144 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。除夏季吸收高峰外, 在 1993 年春季还出现了一个比较明显的峰值, 特别是湾内, NH_4^+-N 的吸收速率达 $0.111 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在季节吸收曲线中还可看出

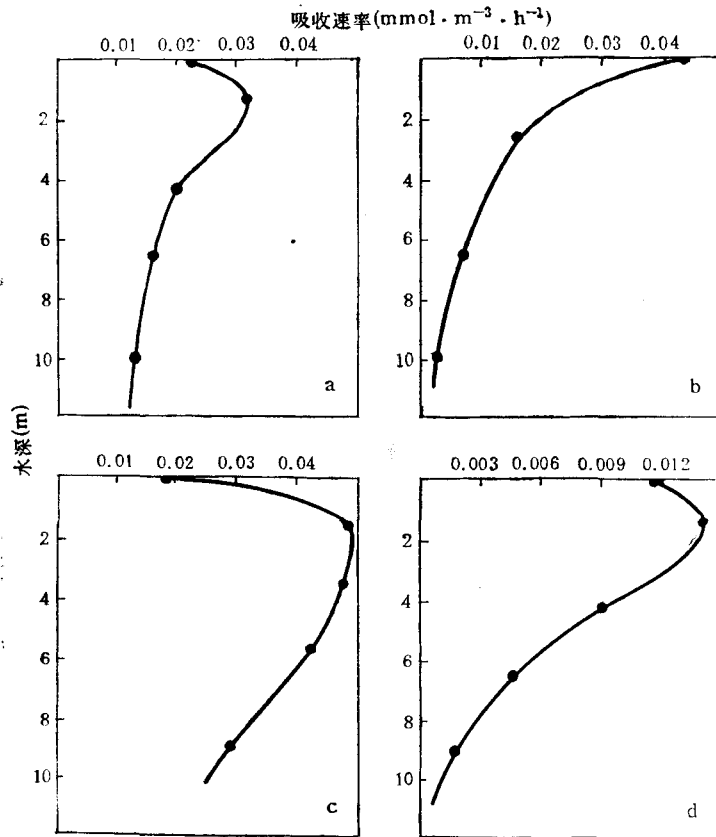


图9 胶州湾5号站 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收速率的垂直分布曲线

a. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 1991年秋; b. $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 1991年秋; c. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 1992年春; d. $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 1992年夏

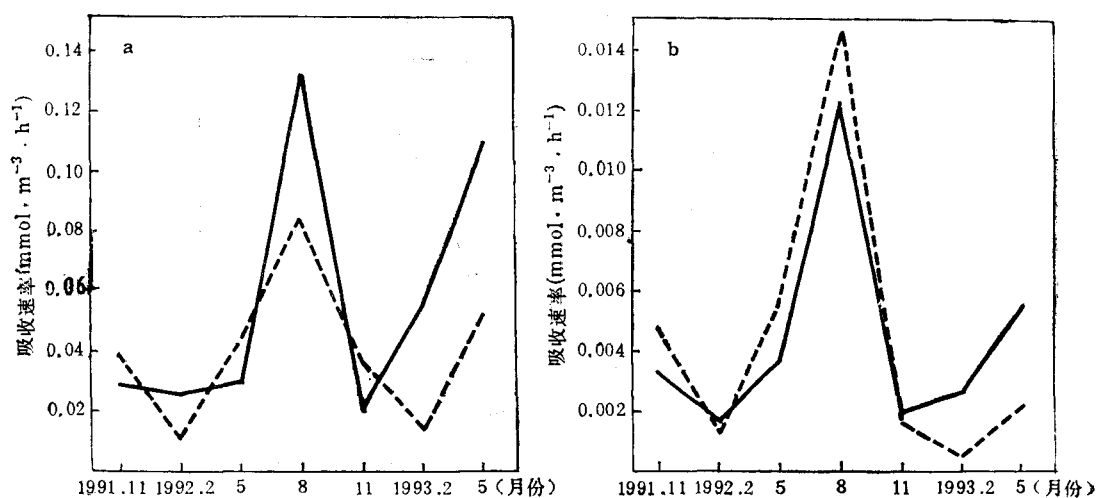
2个明显的低谷,分别在1992年2月和1993年2月,或1992年11月(5号站), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率在5号站和10号站分别为 $0.020 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.012 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收速率分别为 $0.0018 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.0006 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。显然, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收都与温度呈正相关,在温度最高的夏季和温度最低的冬季分别是吸收速率的峰区和谷区。1993年春季吸收速率的明显增高(特别是5号站),显然与春季浮游植物的水花相关联。

6. f -比

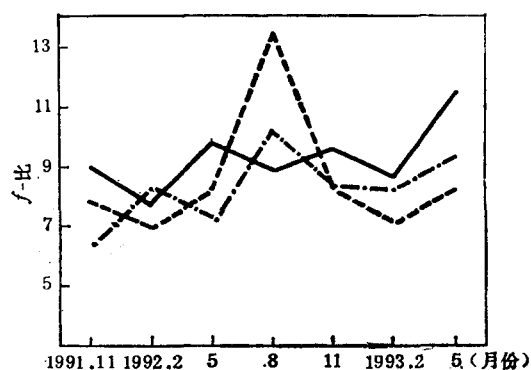
胶州湾 f -比的季节变动较大,在湾口和湾外以夏季为最高(0.101—0.135),其他季节较低,最低值为0.062。在湾内春、秋季较高(0.097—0.116),冬季最低(0.097),季节变幅比湾口和湾外要小(图11)。 f -比的这种变化趋势显然与两种N源的供给情况和温度变化有关,而相对很低的量值是由相对很高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 造成的。

7. 新生产力

新生产力的季节变化趋势明显,以夏季为最高,春季较高,秋、冬季较低。最高的海区超过 $100 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (1992年夏季,1993年春季),而最低的海区仅为 $10\text{—}20 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (1991年秋季,1992年秋季)(图12)。年度间的差别也较大,如1993年春季新

图 10 胶州湾表层 NH_4^+-N , NO_3^--N 吸收的季节变化a. NH_4^+-N ; b. NO_3^--N

— 5 号站; --- 10 号站

图 11 胶州湾的 f -比季节变化

— 湾内; - · - · - 湾口; --- 湾外

生产力明显高于 1992 年春季, 而且平面分布规律也不太一致, 1991 年秋季与 1992 年秋季之间也存在着类似差别(图 12a, d, b, f)。在平面分布上, 总的规律是春季湾内高于湾外, 其他季节湾外高于湾内。就湾内水平分布而言, 春、夏季以西南部为最高, 东北部为最低(图 4b, c, f); 冬季则是以湾中心最低, 近湾口部最高(图 12e), 秋季基本上是湾中心区高于沿岸区(图 12a, c)。

三、讨 论

1. 胶州湾的基本生态条件

胶州湾生态环境的突出特点是: (1) 水浅, 悬浮体较多, 真光层在大部分海区都很

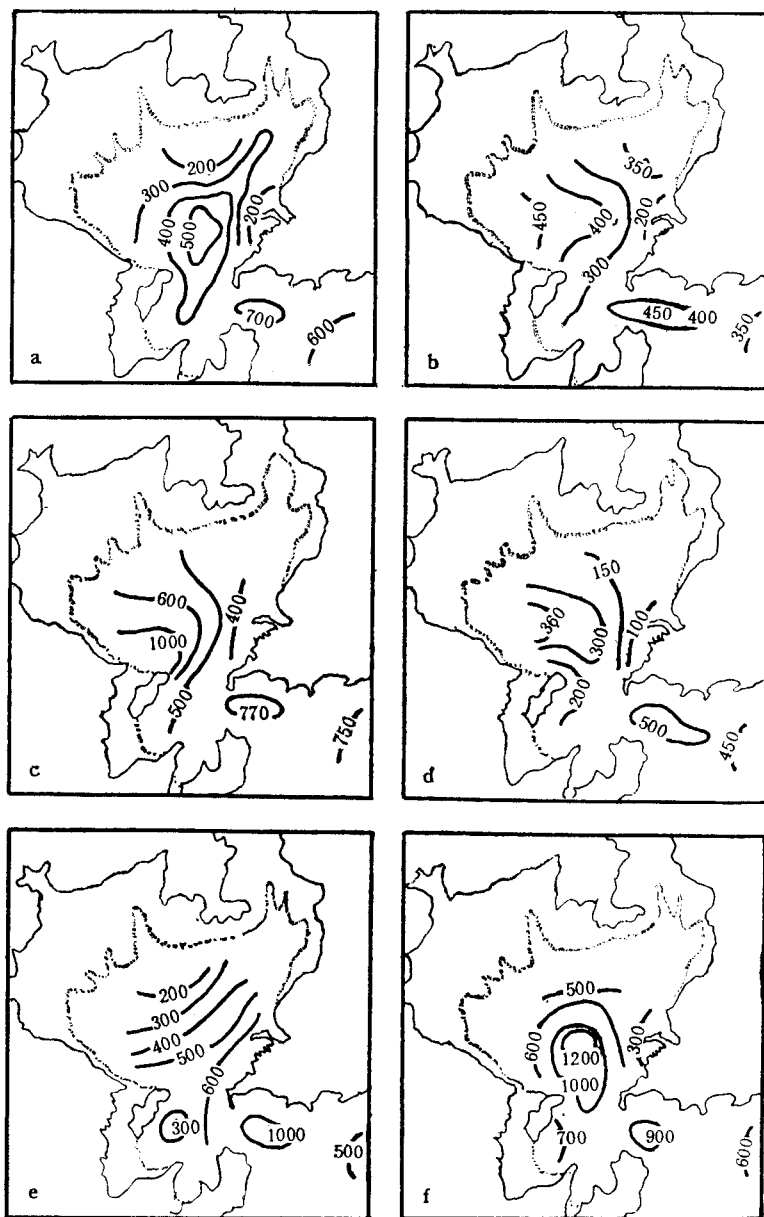


图 12 胶州湾新生产力的水平分布 ($\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

a. 1991 年秋季; b. 1992 年春季; c. 1992 年夏季; d. 1992 年秋季;
e. 1993 年冬季; f. 1993 年春季

浅, 限制了单位面积下的初级生产力; (2) N 营养盐不成为限制性因素, N 源的主要成分是 NH_4^+-N , NO_3^--N 仅占 10% 左右, 这是与其他沿岸海区、海湾最大的区别。胶州湾 NH_4^+-N 的再生速率要低于吸收速率(焦念志、王荣, 1993), 说明 NH_4^+-N 库有来自外源的补充, 这个外源供给无疑就是周围工农业生产及生活排污, 特别是沿岸的养殖生产, 如海带施肥养殖等(图 2)。

2. 胶州湾的初级生产力及其影响因素

全年平均初级生产力 ($503\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) 比以往用黑白瓶生氧量法推算的结果 (郭玉洁等, 1992) 要高。如果考虑光合作用释放的溶解有机碳在内, 这个数值还要增加约 17% (焦念志、王荣, 1993)。与其他沿岸海区相比, 胶州湾的初级生产力要高于渤海湾 (吕培顶等, 1984), 低于闽南-台湾浅滩上升流区 (李文权、王宪, 1991)、浙江沿岸上升流区 (宁修仁等, 1985) 以及日本南部黑潮左侧峰近岸区 (费尊乐等, 1990) (表 2)。影响初级生产力最主要的因素为营养盐、水温和光照等。对于胶州湾来说, N 营养盐比较富足, P 营养盐也在浮游植物最适范围的下限之上。但营养盐的波动仍然影响到初级生产力的水平乃至结构, 如 1993 年早春的初级生产力高峰主要是由大于 $20\mu\text{m}$ 的组分所造成的 (Jiao, 1993), 初级生产力与水温的正相关关系在本次研究中也很明显。光照的影响对于胶州湾来说主要体现在真光层的深度上, 由于大部分海区水很浅、浊度大、透明度小、有效光合作用层浅, 即使光合作用速率很高, 单位水面积下的总初级生产力也非常有限, 因而出现了光合作用速率分布与初级生产力分布不一致甚至相反的现象, 这是与外海生产力分布迥然不同的特征。

表 2 胶州湾初级生产力与其他近岸海区的比较

海 区	初级生产力 ($\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	研究周期	资料来源
胶州湾	422 (26—882)	全年逐月	郭玉洁等, 1992
胶州湾	503 (116—1271)	全年四季	本文
渤海	(90—360)		吕培顶等, 1984
浙江沿岸上升流区	1250 (650—2280)	8 月, 10 月	宁修仁等, 1985
闽南-台湾浅滩上升流区			
东南上升流区	400	4—11 月	李文权等, 1991
西南上升流区	860		
南澎列岛近岸区	740		
日本南部黑潮左侧峰近岸区	960	5—6 月	费尊乐等, 1990

3. 胶州湾的新生产力及其制约因素

与其他沿岸海区相比, 胶州湾的新生产力非常低, 这是因为胶州湾的 f -比仅为 10% 左右, 而与胶州湾处于相似纬度的切萨皮克湾、卡马森河口区的 f -比分别为 0.30 和 0.51 (McCarthy *et al.*, 1977; Carpenter and Dunham, 1985)。胶州湾极低的 f -比源于极低的 $\text{NO}_3^- \text{-N} : \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值, 加之 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的存在对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的吸收具有严重的抑制作用 (Jiao, 1993)。胶州湾的这种营养盐特征以及由此导致的生产特征使得它显著区别于其他沿岸海区。由于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的来源很大程度上是外源性的, 所以它在胶州湾已不代表再生氮, 因而由其支持的那部分再生生产力中有相当部分实际上是新生产力, 这使得新生产力的 N 源划分必须附加海区限制条件。但由于测定新生产力的其他方法 (包括沉积

物捕集器法、真光层产氧法等)在近岸浅水海域都无法实施,相比之下, N 源划分基础上的 ^{15}N 同位素示踪实测法仍然是最为实用的方法。对于胶州湾来说,如果 NH_4^+-N 的外源输入(包括径流、排污、施肥等)得到观测或估计,则新生产力的实用价值即可得到实现。另一方面,新生产力的 ^{15}N 方法同时提供了两类 N 源的吸收通量,这一点不论在近岸还是外海对于了解生态系 N 循环都具有十分重要的意义。

除了 N 源本身的决定性作用之外,其他环境因素也制约着新生产力的水平。从图9中可明显看出, $NO_3^- - N$ 的吸收比 $NH_4^+ - N$ 吸收更需要光照,因而新生产力随水深的衰减要比初级生产力更快。 N 吸收随温度提高而增加的相对幅度 $NO_3^- - N$ 比 $NH_4^+ - N$ 要高(焦念志、王荣,1993)因而,当 N 源供给水平不变时,总初级生产力中新生产力的比例将随着温度的提高而升高,1991年秋至1992年秋季的情况基本如此。一般近岸水域的 f -比变化与温度并不成正比,而主要受 N 源供给条件的改变控制,通常在春季出现高峰,正如1993年春季的趋势一样。

参 考 文 献

- 宁修仁,刘子琳,胡钦贤,1985,浙江沿岸上升流区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征,海洋学报,7(6): 751—762。
吕培顶等,1984,渤海水域叶绿素 a 的分布及初级生产力的估算,海洋学报,6(1): 90—98。
李文权,王宪,1991,闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系研究,科学出版社,1—14。
郭玉洁,杨则禹,1992,胶州湾的生物环境: 初级生产力,胶州湾生态学和生物资源(刘瑞玉主编),科学出版社,110—125。
费尊乐,吕瑞华,管永红,1990,黑潮及其毗邻海域叶绿素 a 和初级生产力的分布特征,黑潮调查研究论文集,科学出版社,77—86。
焦念志,王荣,黄庆文,1993, ^{15}N -示踪,离子质谱法测定海洋新生产力,海洋与湖沼,24(1): 65—71。
焦念志,王荣,1993,胶州湾浮游生物群落 $NH_4^+ - N$ 的吸收与再生通量,海洋与湖沼,24(3): 217—225。
Carpenter, E. J. and S. Dunham, 1985, Nitrogenous nutrient uptake, primary production, and species composition of phytoplankton in the Carmans River estuary, Long Island, New York, *Limnol. Oceanogr.*, 30:513—526。
Eppley, R.W. and B.J. Peterson, 1979, Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean, *Nature*, 282 (13): 677—680。
Grunseich, G. S., R. C. Dugdale, N. F. Breitner, and J. J. MacIsaac, 1980, Sample conversion, mass spectrometry, and calculations of ^{15}N analyses of phytoplankton nutrient uptake. Coastal Upwelling Ecosystems Analysis (CUEA) Tech. Rep. 44。
Jiao, N. Z. and R. Wang, 1993, Size-structure of microplankton biomass and production in Jiaozhou Bay, *J. Plank. Res.*,
Jiao, N. Z. (焦念志),1993, Interactions between ammonium uptake and nitrate uptake by natural phytoplankton assemblages, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 11(2):97—107。
McCarthy, J. J., W. R. Taylor, and J. L. Taft, 1977, Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1: Nutrient availability and phytoplankton preferences, *Limnol Oceanogr.*, 22 (6):996—1011。
Parsons, T. R., Y. Maita, and G. M. Lalli, 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, 101—122。

PRIMARY PRODUCTION AND NEW PRODUCTION IN JIAOZHOU BAY*

Wang Rong, Jiao Nianzhi, Li Chaolun, Shen Zhiliang and Ji Peng

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

ABSTRACT

Field studies on primary production and new production in Jiaozhou Bay carried out seasonally from Nov. 1991 to May 1993 showed that primary production was higher in spring and summer ($434\text{--}1271\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), and lower in autumn and winter. New production followed the similar pattern, but had more fluctuations. Compared with other coastal regions, primary production in Jiaozhou Bay was at the middle level, and new production was at a very low level. The f -ratio ranged from 0.05 to 0.14. The low level of the f -ratio was mainly due to the relatively low supply of NO_3^- -N throughout the year. The f -ratio given by the traditional definition might be an under-estimate for the nearshore waters like those of Jiaozhou Bay since a certain amount of NH_4^+ -N comes from other sources outside the system. Horizontal distributions of primary production and new production in Jiaozhou Bay are shown in this paper. Some environmental factors associated with production level are also discussed.

* Contribution No. 2383 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.