

莱州湾浮游植物粒径分级叶绿素 a 和初级生产力及新生产力*

蔡显明² 宁修仁^{1,2} 刘子琳² 刘诚刚²

(¹ 国家海洋局海底科学和海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室)

(² 国家海洋局第二海洋研究所)

莱州湾是中国北方重要的渔业和养殖基地,是中国对虾索饵和产卵的传统海域。初级生产力反映海域自养浮游生物通过光合作用生产有机碳的能力,是水域肥瘠程度和可养育生物资源的直接指标。初级生产力中的重要部分——新生产力,是外源营养盐输入从而导致浮游植物生物量增加的那部分生产力,也是在维持真光层群落生态平衡的基础上可向系统外输出的生产力;而且由于新生产力是向更高层次营养级的净输出,所以其提供了评价次级和更高级营养阶层生物可持续生产的依据。

20 世纪 80 年代初,有许多学者就开展了渤海叶绿素 a 和初级生产力的研究,莱州湾是其观测海域的重要组成部分。观测结果表明,莱州湾为渤海的高生物量和高生产力区(费尊乐等,1988;费尊乐等,1991;吕瑞华等,1992;朱明远等,1993;吕瑞华等,1999),但未见莱州湾海域的专题研究报道,新生产力的研究尚属空白。

本研究采用¹⁴C 和¹⁵N 同位素示踪法,在莱州湾进行了初级生产力和新生产力的现场实验研究,获得了比较系统的观测资料,可为评估莱州湾生物资源潜力和可持续利用能力,为莱州湾渔业和养殖业的发展提供科学依据。

一、材料与方 法

1. 采 样

1997 年 7 月 20~30 日,使用“中国海监 11 号”调查船,在莱州湾进行了叶绿素 a 和初级生产力的现场观测。共设 6 条断面 21 个大面站,进行大、小潮两个航次现场观测。大潮汛选择站 A4, B2, E3, E7, F1 和 G5,小潮汛选择站 A4, A7, E3 和 G5 共 10 个站进行初级生产力和新生产力的现场观测(图 1)。

使用球盖式 QII-2 型有机玻璃采水器采集水样。采样层次:叶绿素 a 和浮游植物分析用水样采自表层、2m、5m、10m 和底层;光合作用速率模拟现场培养用水样采自海面光强衰减至 100%、50%、32.5%、10%、3%和 1%的层次,真光层深度小于 3m 时,只采集表

* 国家自然科学基金重大项目,497901001 号。

收稿日期:2000 年 12 月 20 日。

层水样。新生产力测定只采集表层水样供培养。

所有水样收集前,经 $280\mu\text{m}$ 孔宽的筛绢预过滤,以除去大多数的浮游动物。取 500cm^3 水样,加中性福尔马林固定保存供浮游植物镜检。叶绿素 a 和光合作用速率粒径的分级测定用水样经孔宽 $20\mu\text{m}$ 的筛绢和 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,以分别获取网采(Net 级份, $>20\mu\text{m}$)和微型 + 微微型(N + P 级份, $<20\mu\text{m}$)光合浮游生物。新生产力的测定用水样经预灼烧(450°C , 16h)的 Whatman GF/F 滤膜过滤。

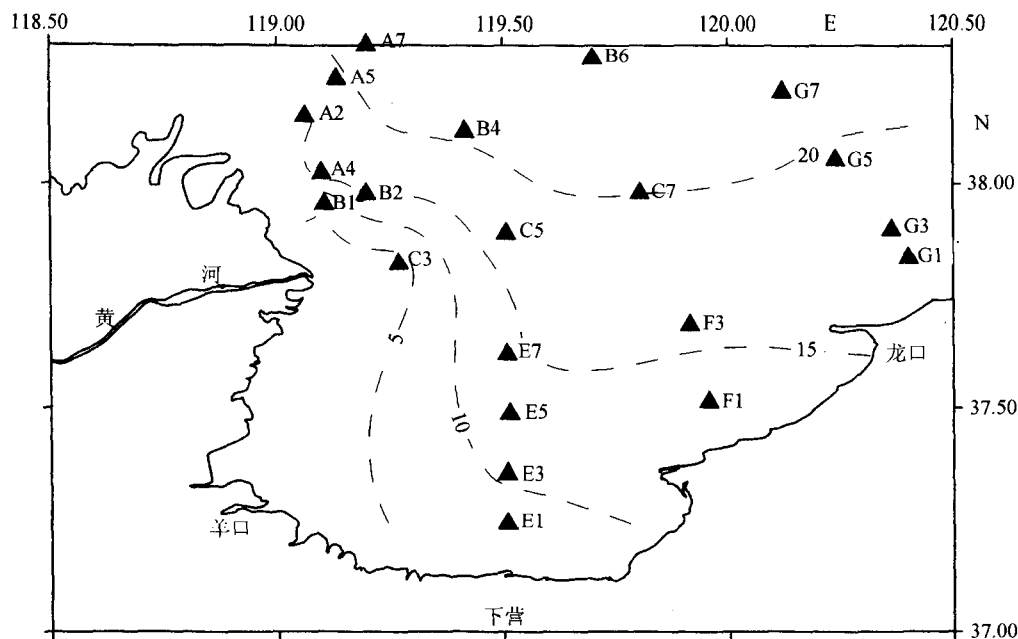


图1 1997年7月莱州湾观测站位图

2. 方法

叶绿素 a 和脱镁色素的测定采用萃取荧光法(国家技术监督委员会, 1991)。过滤 100cm^3 水样, 色素用 90% 丙酮萃取 24h, 用唐纳荧光计(Turner Designs Fluorometer, Model10)进行测定。

光合作用速率的测定使用 ^{14}C 同位素示踪法(国家技术监督委员会, 1991; Evans *et al.*, 1987; Ning *et al.*, 1988)。自每个光层次采得的水样, 注入 2 个 250cm^3 的平行白瓶和 1 个 250cm^3 的黑瓶中, 每瓶加入 $3.7 \times 10^5 \text{Bq NaH}^{14}\text{CO}_3$, 置于甲板模拟现场培养器中培养 3~6h。培养完毕, 过滤水样, 截留颗粒物的滤膜经浓盐酸雾熏蒸后带回实验室在 Beckman 5801 型液体闪烁计数器上分析测定。

新生产力的测定使用 ^{15}N 同位素示踪法(UNESCO, 1994)。采得的水样注入 3 个 1.2dm^3 的培养瓶中, 其中两个白瓶一个黑瓶, 加入 K^{15}NO_3 (原子丰度为 98.59%) 或 $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ (98.46%), 加入量相当于海水原有浓度的 10%, 置于甲板模拟现场培养器中培养 4~6h。培养完毕, 水样过滤, 滤膜经干燥后, 带回实验室在国产 LHT-03 型质谱仪上测定。

海面光辐射强度和单位时间内的光通量用光量子计(LI-1000 Data Logger, LI-COR Inc.)测定。

浮游植物的种属鉴定和细胞计数使用 Olympus 倒置显微镜在实验室进行。

二、结果和讨论

1. 理化环境特性

莱州湾是一个较大的浅海海湾,大部分海区的水深小于 10m(中国海湾志编纂委员会,1993),调查海区的真光层深度较大。

表层温度、盐度高于底层;小潮温度、盐度高于大潮,近岸水温高于远岸,盐度略低于远岸。调查期间黄河断流,大潮汛时在黄河口外似乎存在一支从黄河口以北流向莱州湾的沿岸流¹⁾。远岸区温度层化显著,近岸区温度上下均匀;盐度上下较均匀,远岸区表层盐度略高于下层。

营养盐垂向分布均匀,水平分布差异较大:(1)海区平均硝酸盐浓度相对较低,这可能是由于浮游植物消耗,加之黄河断流所致。硝酸盐的高值区出现在黄河口附近,由此向湾东部逐渐降低。黄河口陆源输入的积累是莱州湾硝酸盐的主要来源,尽管调查期间正值黄河断流,但黄河口附近沉积物的再悬浮作用强,致使真光层变浅、营养盐释放;(2)铵盐的表层分布趋势与硝酸盐相似,但底层分布在湾中部出现高值区,而且底层浓度明显高于表层,说明铵盐来源还可能与来自渤海中央底层冷水团的向岸涌升有关;(3)整个海区的平均磷酸盐浓度为 0.04mmol/m^3 ,与历史资料相比,磷限制的趋势进一步发展;整个海区平均 N/P 比为 57,最高达 300,远高于自然平衡值²⁾(Hein R. S., 1991)。

2. 叶绿素 a

表层叶绿素 a 浓度的分布趋势大、小潮基本一致,均由莱州湾中部向东部和北部逐渐降低(图 2),最高值均出现在莱州湾中部的站 E5(大、小潮浓度分别为 5.28mg/m^3 和 2.15mg/m^3),大潮汛最低值出现在湾东北部的站 G7(0.25mg/m^3),小潮汛最低值出现在湾西北部近黄河口的站 A5(0.26mg/m^3)。大潮的平均值 [$(1.53 \pm 1.26)\text{mg/m}^3$] 高于小潮 [$(0.88 \pm 0.64)\text{mg/m}^3$],这可能是由于调查期间大潮汛时从黄河口以北流向莱州湾的沿岸流带来丰富的营养盐,使浮游植物获得所需的营养物质(特别是磷酸盐)而出现较高的现存生物量。

大、小潮叶绿素 a 浓度的垂直分布较为均匀,上、下各层变化幅度小。大潮汛表层值最高,随深度而逐渐降低;小潮汛表层值最低,高值出现在 5m 和 10m,底层浓度高于表层(表 1)。由于莱州湾的水深较浅,真光层深度较大,不存在底层浮游植物的光限制,从而出现较高的底层现存生物量。

表 1 1997 年 7 月莱州湾叶绿素 a ($\bar{X} \pm SD, \text{mg/m}^3$) 的垂直分布*

深度 (m)	大 潮 汛				小 潮 汛			
	Net	N+P	总叶绿素 a	n	Net	N+P	总叶绿素 a	n
0	0.08 ± 0.09	1.45 ± 1.21	1.53 ± 1.26	21	0.11 ± 0.21	0.77 ± 0.56	0.88 ± 0.64	17
5	0.09 ± 0.11	1.30 ± 0.96	1.39 ± 1.03	20	0.09 ± 0.08	1.02 ± 0.50	1.11 ± 0.52	17
10	0.14 ± 0.12	1.22 ± 0.90	1.36 ± 0.93	13	0.18 ± 0.17	1.04 ± 0.92	1.22 ± 0.95	14
15	/	/	/	1	0.17 ± 0.15	0.80 ± 0.32	0.97 ± 0.39	10
底	0.15 ± 0.12	0.87 ± 0.65	1.02 ± 0.71	20	0.14 ± 0.13	0.85 ± 0.38	0.99 ± 0.43	16
平均值	0.11 ± 0.11	1.21 ± 0.96	1.33 ± 1.01	74	0.13 ± 0.15	0.90 ± 0.57	1.04 ± 0.62	71

* Net:小型浮游生物($>20\mu\text{m}$), N+P:微型与微微型浮游生物之和($<20\mu\text{m}$), n:调查站位数。

1) 潘玉球等,莱州湾夏季物理环境的变化及其对对虾繁衍带来的影响,待发表。

2) 于志刚等,渤海营养盐,待发表。

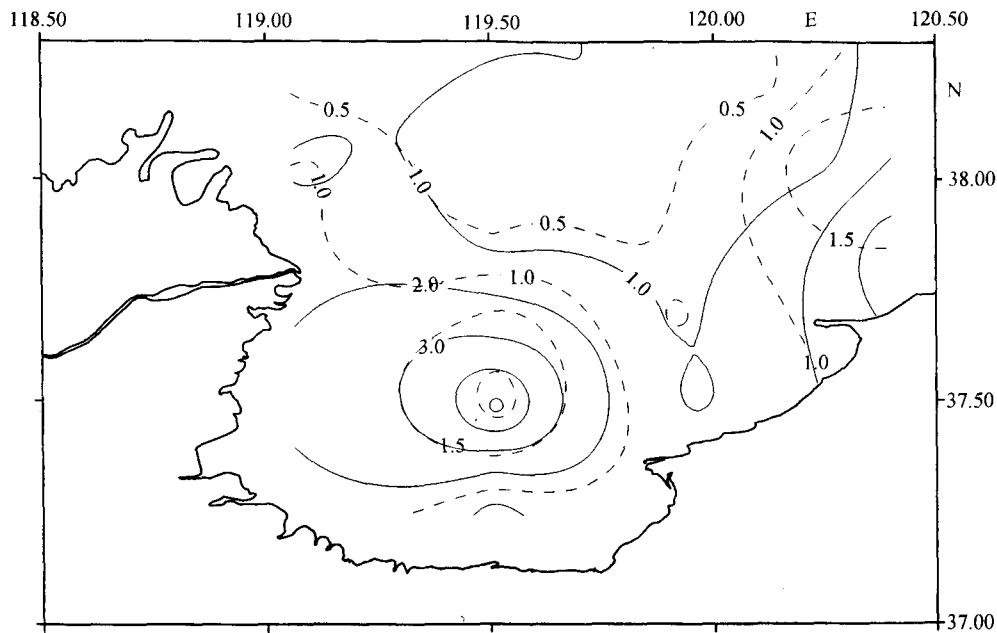


图2 1997年7月莱州湾叶绿素a(mg/m³)的表层分布

——大潮汛 - - - - 小潮汛

站A4的连续观测结果表明,由于调查期间潮汐变化幅度很小(大、小潮平均潮差分别为1.5m和1.2m),叶绿素a浓度的波动与潮汐变化之间不存在明显的关系。表层叶绿素a浓度的峰值均出现在白天(大潮汛的09:00和15:00,小潮汛的12:00),夜间浓度较低且波动较小,这应与光照强度的变化有关。大潮汛叶绿素a的周日变化幅度较小,潮汛来势大(图3)。

3. 浮游植物丰度

浮游植物细胞丰度范围为 $5.3 \times 10^6 \sim 29.0 \times 10^6$ 个/m³。最高丰度区出现在湾中部的站E5,最低丰度区出现在近黄河口的站C3。出现的优势种类以硅藻为主,主要有小环藻 *Cyclotella* sp.、圆筛藻 *Coscinodiscus* sp.、菱形海线藻 *Thalassionema nitzschioides*、曲舟藻 *Pleurosira* sp.、丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus*、直链藻 *Melosira* sp.、伏氏海毛藻 *Thalassiothrix frauenfeldii*、辐杆藻 *Bacteriastrum* sp.、长菱形藻 *Nitzschia longissima*、舟形藻 *Navicula* sp.等;其次为甲藻(Dinoflagellates)。微型级份的浮游植物的主要种类则有金藻类 *Chrysomonads* sp.,波罗的海隐藻 *Cryptomonads baltica*,硅鞭藻 *Silicoflagellata*,原甲藻 *Prorocentrum* sp.等。

4. 初级生产力

典型站位初级生产力和不同粒径浮游生物对总初级生产力的贡献以及光合作用同化数列于表2。

大潮汛平均初级生产力 $[(309.0 \pm 185.2)\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 明显高于小潮汛 $[(251.0 \pm 152.6)\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$,其最高值 $[534.3\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 出现在湾东北部的站G5,最低值出现在近黄河口的站A4 $[83.2\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 。莱州湾海域浮游植物的生理活性较高,大小

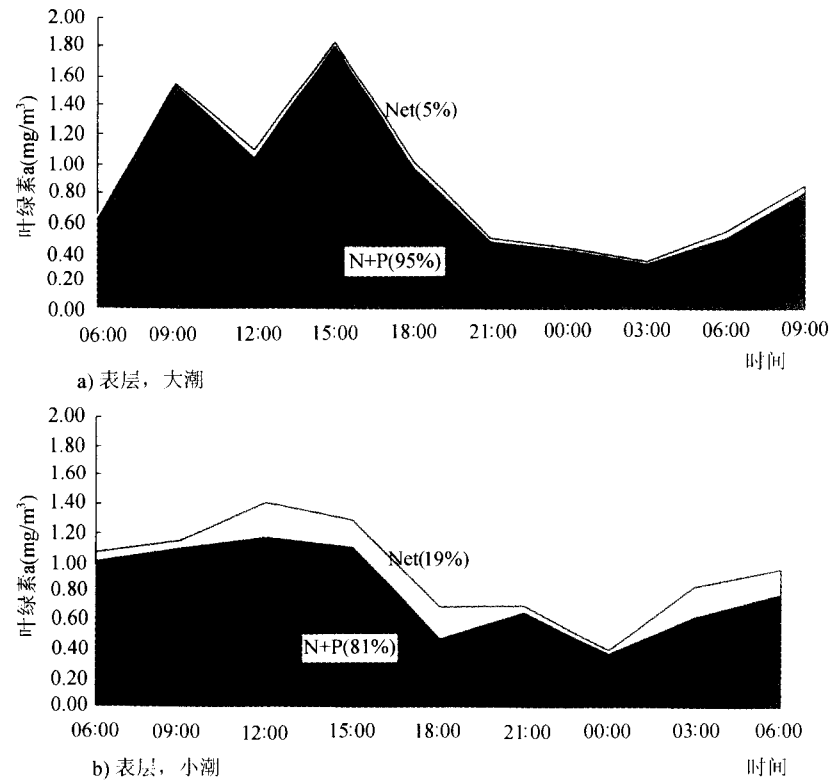


图3 1997年7月莱州湾连续站A4大、小潮汛叶绿素a的周日变化

潮汛浮游植物光合作用同化数的平均值分别为 $(5.2 \pm 2.2) \text{ mgC}/(\text{mgChl. } a \cdot \text{h})$ 和 $(3.3 \pm 2.1) \text{ mgC}/(\text{mgChl. } a \cdot \text{h})$ 。

表2 1997年7月莱州湾典型站位的初级生产力和同化数*

* Net: 小型浮游生物($>20\mu\text{m}$), N + P: 微型与微微型浮游生物之和($<20\mu\text{m}$), Sum: 所有级份浮游生物之和。

典型观测站浮游植物粒径分级潜在初级生产力见图 4(图 4a 为大潮汛站 A4, B2, F1 和 G5, 图 4b 为小潮汛站 A4, A7, E3 和 G5)。从该图可见, 低生产力出现在近黄河口的站 A4[大、小潮汛分别为 $1.46\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 和 $1.82\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$]。大潮汛的站 A4, B2, G5 和小潮汛的站 A4, 初级生产力的最大值出现在表层, 随深度的增加初级生产力急剧降低; 而在其他站位, 如大潮汛站 F1 和小潮汛站 A7, E3, G5, 其最大值均出现在次表层, 这是由于调查期间过强的光照[培养期间这些站位的最高瞬时光辐射强度超过 $2200\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 平均光辐射强度均超过 $1500\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]对表层浮游植物光合作用产生抑制的缘故。

5. 不同级份浮游植物的贡献

莱州湾以微型 + 微微型浮游生物对浮游植物群落总叶绿素 a 和总初级生产力的贡献占优势, 对叶绿素 a 的贡献为 91% (大潮汛) 和 87% (小潮汛), 对生产力的平均贡献分别为 87% 和 83%。小潮汛小型浮游植物对叶绿素 a 和生产力的贡献 (分别为 12% 和 17%) 均略高于大潮汛 (分别为 6% 和 13%)。从初级生产力的垂直分布来看, 在大多数站位微型和微微型级份和小型级份的变化趋势基本一致, 但在小潮汛的 A7 站的 0~5m 处, 小型级份的贡献有显著增加 (图 4a)。

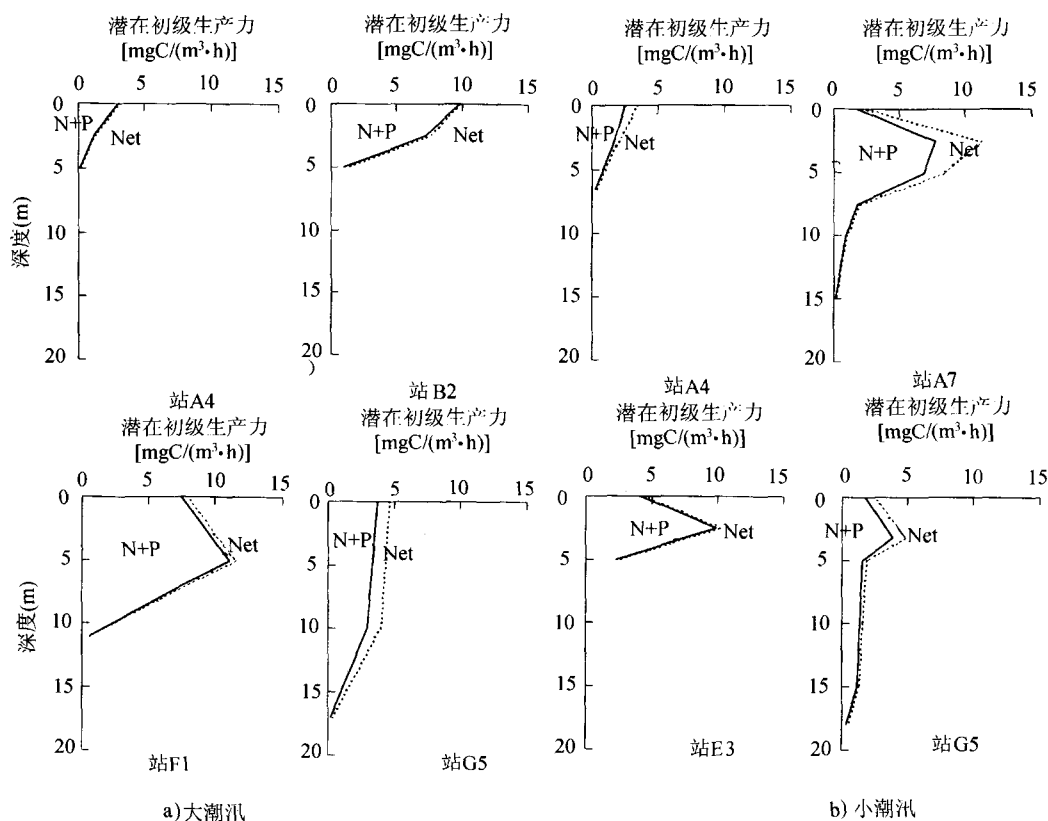


图 4 1997 年 7 月莱州湾典型站位潜在初级生产力的垂直分布 [$\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$]

在大洋寡营养型海域, 微型和微微型光能自养生物因其代谢生理活性高, 能量转换

速率快而在现存生物量和初级生产力中占绝对优势(宁修仁等,1998;El-Sayed *et al.*, 1979;Weber *et al.*, 1987)。莱州湾是内陆海湾,无机氮营养盐丰富,但其结果表明微型+微微型浮游生物的贡献也占主要地位,与厦门港(高亚辉等,1994)和象山港(刘子琳等,1997)的观测结果基本一致。这与调查海区的磷限制有关,磷限制往往使浮游植物群落向微型方向演替(Probyn *et al.*, 1985)。

6. 新生产力和 f -比

大、小潮的平均新生产力分别为 $(2.56 \pm 2.66) \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $(1.04 \pm 0.67) \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 与现场初级生产力的分布趋势十分相似(图 5)。最高值[大、小潮分别为 $9.98 \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 和 $3.00 \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$]出现在湾中部的站 E5, 在该站附近存在一个高值区。而低值区均出现在湾北部,大、小潮的最低值分别出现在湾北部的站 C7 [$0.52 \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$] 和站 G5 [$0.20 \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$]。与东海的情况相近(焦念志等,1998),新生产力作为总初级生产力的一部分,与现场初级生产力存在密切的相关关系($r = 0.82, n = 21, p < 0.001$);与东海情况不同的是,由于莱州湾存在显著的磷限制,氮营养盐的浓度变化对新生产力的影响较小,其来源和组成是主要的影响因素。

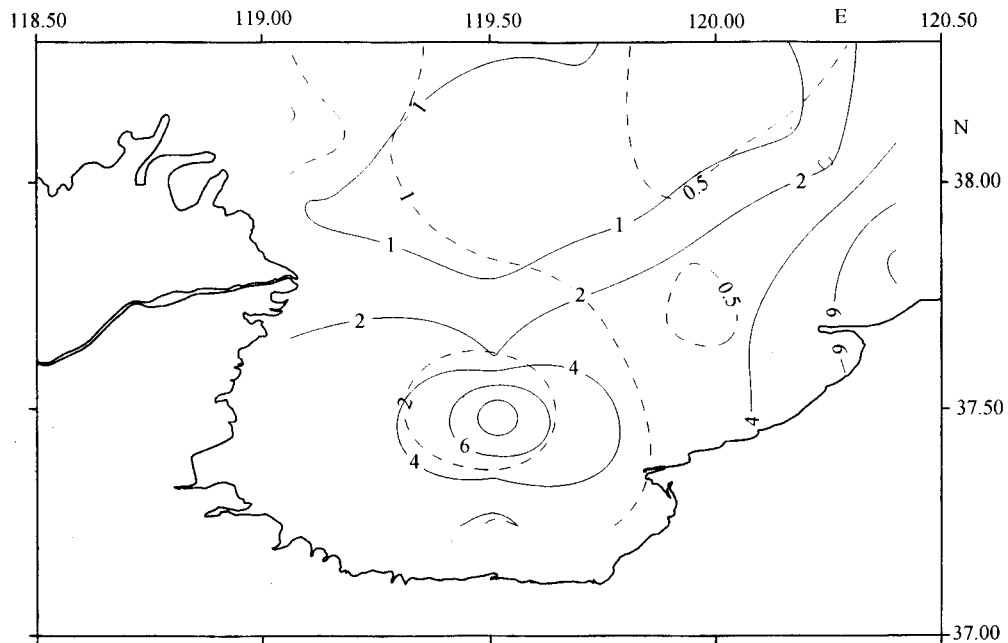


图 5 1997 年 7 月莱州湾新生产力 [$\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$] 的表层分布

——大潮汛 - - - - 小潮汛

从莱州湾海域的 $[\text{NH}_4^+]/[\text{NO}_3^-]$ (大、小潮时均为 0.55) 与 $[\text{NH}_4^+]/[\text{NO}_3^-]$ (大、小潮汛时分别为 1.09 和 1.46) 来看,在无机氮营养盐中,铵盐是浮游植物优先吸收的氮源,由铵盐支持的那部分生产力是总初级生产力的主要组成部分。这与以前的研究(焦念志等,1998; Glibert *et al.*, 1982)是一致的, f -比的大小(平均为 0.30)也证明了这一点。

与东海(焦念志等,1998)和胶州湾(王荣等,1995)的情况类似,莱州湾铵盐来源中有

一部分应是外源性的(来自径流输入和沉积物的再悬浮与释放),由其支持的那部分生产力实际应该是新生产力,这样会对基于硝酸盐测定的新生产力带来一定误差,这也是新生产力的测定大多在开阔洋进行的原因。但与硝酸盐浓度相比,铵盐浓度通常要小得多,因此,基于硝酸盐测定的新生产力是可以接受的,但我们将力求在今后沿岸带的观测中对外源氮进行更精确的估计,以获得更加准确的新生产力测定结果。

与已有的沿岸带(焦念志等,1998;Martin *et al.*, 1987;Codisoti *et al.*, 1982)、上升流区(Dugdale *et al.*, 1989;Martin *et al.*, 1987)和海湾(王荣等,1995;McCarthy *et al.*, 1977;McGillicuddy *et al.*, 1998)的生产力观测结果相比较,莱州湾海区的初级生产力水平低于各上升流区和沿岸带,与胶州湾(王荣等,1995)大致相当;新生产力水平低于各上升流区,与东北太平洋(Martin *et al.*, 1987)和东海沿岸带(焦念志等,1998)相当,而高于胶州湾;*f*-比水平(范围为0.09~0.46,平均值为 0.30 ± 0.12),高于东北太平洋(平均值为0.17),低于各上升流区(如秘鲁上升流区为0.66),与东海沿岸带(0.10~0.60)相当。

三、结 论

莱州湾海区磷限制的趋势与历史资料相比进一步发展,磷酸盐的补充是影响浮游植物光合作用的重要因素。调查期间大潮汛时,在黄河口外似乎存在一支从黄河口以北流向莱州湾的沿岸流,可能由于其带来的丰富营养盐,使大潮汛的叶绿素 *a* 浓度、初级生产力和新生产力均高于小潮汛。

调查站位较深的真光层和调查期间强烈的光照强度,使大多数站位初级生产力的高值出现在次表层。

浮游植物现存量和初级生产力的细胞大小分级测定表明 1997 年 7 月莱州湾以微型 + 微微型(<20 μm)浮游生物在浮游植物自然群落生物量和生产力中占有重要比重。

参 考 文 献

- 王荣等,1995,胶州湾的初级生产力和新生产力,见:董金海等主编.胶州湾生态学研究(一),科学出版社,125~136。
- 中国海湾志编纂委员会,1993,中国海湾志,第三分册(山东半岛北部和东部海湾),海洋出版社,1~18。
- 宁修仁等,1998,南大洋特定海域浮游植物现存量和初级生产力结构研究,见:中国海洋学文集(9),海洋出版社,1~98。
- 刘子琳等,1997,象山港对虾增殖放流区浮游植物现存量和初级生产力,海洋学报,19(6):109~115。
- 吕瑞华等,1992,山东近岸水域的初级生产力,黄渤海海洋,10(1):42~47。
- 吕瑞华等,1999,渤海水域初级生产力 10 年间的变化,黄渤海海洋,17(3):80~85。
- 朱明远等,1993,黄海海区的叶绿素 *a* 和初级生产力,黄渤海海洋,11(3):38~59。
- 国家技术监督委员会,1991,海洋生物调查,海洋调查规范 GB12763.6:1~21。
- 费尊乐等,1988,渤海生产力研究 II:初级生产力及潜在渔获量的估算,海洋学报,10(4):481~489。
- 费尊乐等,1991,渤海生产力研究——叶绿素 *a*、初级生产力与渔业资源开发潜力,海洋水产研究,12:5~69。
- 高亚辉等,1994,厦门港微型浮游生物叶绿素的分布和作用,海洋与湖沼,5(1):87~92。
- 焦念志等,1998,东海春季初级生产力与新生产力的研究,海洋与湖沼,29(2):135~140。
- Codisoti, L. A. *et al.* 1982, A comparison of the nutrient regimes off northwest Africa, Peru and Baja California, Rapports et Proces-Verbaux des Reunions, Conseil International pour l'Exploration de la Mer, 180: 184~201。
- Dugdale, R. C. and Wilkerson, F. P., 1989, New production in the upwelling center at Point Conception, California:

- temporal and spatial patterns, *Deep-Sea Res.*, **36**(7): 985~1007.
- Evans, C. A. *et al.*, 1987, Handbook for the Measurement of Chlorophyll a and Primary Production, *BIOMASS Scientific Series*, **8**: 1~114.
- El-Sayed, S. *et al.*, 1979, On the productivity of the southwestern Indian Ocean, *C. N. F. R. A.*, **44**: 83~100.
- Glibert, P. M. *et al.*, 1982, Utilization of ammonium and nitrate during austral summer in the Scotia Sea, *Deep Sea Res.*, **29**: 837~850.
- Hein, R. S., 1991, Eutrophication and algal growth in the North Sea, Paper for Proceeding from the Symposium "Mediterranean Sea 2000", *Margherita Ligure*, Genoa, Italy.
- Martin, J. H. *et al.*, 1987, Carbon cycling in the Northeast Pacific, *Deep Sea Res.*, **34**: 267~285.
- McCarthy, J. J. *et al.*, 1977, Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1: Nutrient availability and phytoplankton preferences, *Limnol. Oceanogr.*, **22**(6): 996~1011.
- McGillicuddy, D. J. Jr *et al.*, 1998, Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea., *Nature*, **394**: 263~265.
- Ning, X. *et al.*, 1988, Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtse River) and the adjacent East China Sea, *Mar Ecol. Prog. Ser.*, **49**: 141~150.
- Probyn, T. A. and Painting, S. J. 1985, Nitrogen uptake by size-fractionated phytoplankton populations in Antarctic surface waters, *Limnol. Oceanogr.*, **30**(6): 1327~1332.
- UNESCO, 1994, Determination of New Production by ^{15}N , Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements, 119~124.
- Weber, L. H. and El-Sayed, S. Z. 1987, Contribution of the net, nano- and picoplankton to the phytoplankton standing crop and primary productivity in the Southern Ocean, *J. Plankton Res.*, **9**: 973~994.

SIZE-FRACTIONATED CHLOROPHYLL A, PRIMARY PRODUCTION AND NEW PRODUCTION IN LAIZHOU BAY, BOHAI SEA, CHINA

Cai Yuming², Ning Xiuren^{1,2}, Liu Zilin², Liu Chenggang²

(¹Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes & Satellite Oceanography, SOA)

(² Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration)

ABSTRACT

The distribution of chlorophyll a (Chl. a) concentration, primary production and new production were observed in Laizhou Bay of Bohai Sea in spring and neap tides during July 1997. The results showed that there were marked features of spatial zonation in the surveyed area, due to the differences between the geographic environment and the hydrological conditions. Chl. a, primary production and new production were all higher in spring tide than in neap tide in Laizhou Bay. The highest values of these parameters were encountered in the central coastal regions of the Bay. In most stations, Chl. a concentrations at the bottom were higher than that at the surface. The results of size-fractionated Chl. a and primary production showed that contributions of nano- plus pico-

plankton ($<20\mu\text{m}$) to total Chl. *a* and primary production were in dominant position in the phytoplankton community biomass and production of Laizhou Bay. The major sources of nitrate of Laizhou Bay were terrestrial input and resuspension of the sediments in the estuary area. The environmental factors, governing primary production and new production in this sea area are discussed and comparisons of primary production and new production between spring tide and neap tide in Laizhou Bay and other sea areas are also given.