

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*

宋秀贤 俞志明

(中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071)

提要 以 2000 年夏季胶州湾东北部养殖海域(女姑山)的现场调查为基础, 结合前 3 年的调查结果和相关的历史资料, 对该海域夏季营养盐含量分布特征及其对浮游植物生长的可能限制因子进行了分析和探讨。研究结果表明, 胶州湾东北部典型养殖海域夏季表层水体各种营养盐含量高于胶州湾全湾夏季及全年的平均值, 铵氮是总溶解态无机氮的主要组成形态, 硝态氮次之。该海域的环境因素适宜浮游植物的生长, 相关分析显示: 叶绿素 *a* 与 pH 及 DO 呈显著正相关, 与 PO_4 、 SiO_3 、 NH_4 、DIN 呈负相关。通过分析营养盐对浮游植物生长的限制因素发现, 该海域各种营养盐含量相对较高, 无机氮不会成为浮游植物生长的限制因素, 磷酸盐有限制的可能性, 而浮游植物生长受控于硅酸盐的几率最大。

关键词 胶州湾东北部养殖海域, 营养盐分布特征, 浮游植物, 限制因子

中图分类号 P593

营养盐含量水平及其结构组成是影响海洋生物量和种群变化的关键因素, 适当浓度的营养盐是浮游植物生长的物质基础(Neundorfer *et al*, 1993; Taylor *et al*, 1995; Escaravage *et al*, 1996; Timothy *et al*, 2000)。近年来, 随着工农业生产的迅猛发展和人类生活水平的极大提高, 大量富含营养元素的废水排入海洋, 导致近海水域富营养化现象日益严重, 破坏了水域原有的生态平衡(吴玉霖等, 2005; 李学刚等, 2005)。我国是一个海洋大国, 每年以各种方式排放入海的工农业废水和生活污水在逐年增加, 导致我国沿海富营养化的程度和影响范围不断增高和扩大, 引起生物群落的变化以及有害赤潮的爆发, 对我国沿海生态环境和生物资源产生了极大的影响。

1997—2000 年连续 4 年作者对胶州湾东北部女姑山水域进行了现场调查研究, 本文中以 2000 年夏季的调查数据为基础, 结合前几年的调查结果和相关的历史资料, 对该海域营养盐含量分布

及其对浮游植物生长的可能限制因子进行了分析和探讨, 以期对胶州湾富营养化变化特征研究以及有害赤潮研究提供科学依据。

1 水样采集及分析方法

1.1 调查海域概况

本研究的调查水域位于胶州湾东北部女姑山海域(E120°18' 以东、N36°11' 以北), 是胶州湾典型养殖区(以对虾、蛤蜊为主), 该海域夏季污染物主要来源于养殖生物的饵料残余、排泄物以及当地生产、生活污水随径流的排放等(张继红等, 2005)。根据地形特点及潮汐影响, 该海域是胶州湾海流弱交换区, 水动力条件有利于营养物质的滞留和浮游植物的快速繁殖, 属于胶州湾赤潮发生敏感海域。

2000 年 6 月底—8 月初在该海域设置 6 个站位(图 1), 进行了 8 次间隔周期不同的现场调查。根据 1997—1999 年在该海域的调查情况,

* 国家自然科学基金重点项目, 50339040 号; 中国科学院知识创新工程重要方向项目, KZCX2-YW-208 号。
宋秀贤, 博士, 研究员, E-mail: songxx@ms.qdio.ac.cn

通讯作者, E-mail: zyu@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2006-03-12, 收修改稿日期: 2007-05-29

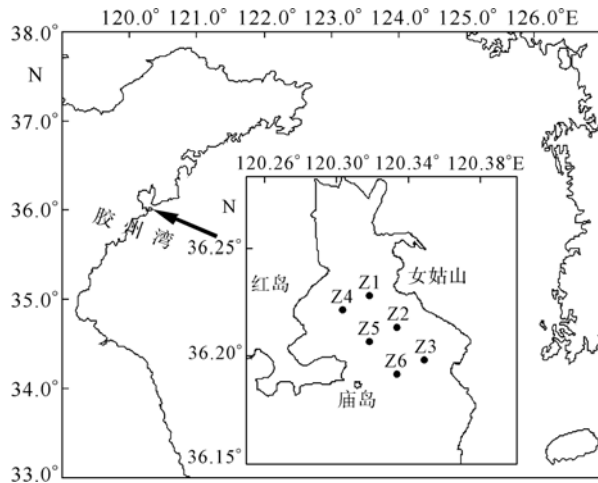


图 1 胶州湾调查海域采样站位

Fig.1 Sampling locations in the northeast of the Jiaozhou Bay

对此次调查的站位布局进行了适当的调整,但调查范围仍与以往保持一致。因调查海域平均水深小于 5m,只采集表层水样。现场测定水温、盐度、pH 等参数;按照“海洋监测规范”的采样要求,采集溶解氧(DO)和化学耗氧量(COD)样品带回实验室内立即测定。营养盐水样用塑料桶采集,经 0.45 μ m 滤膜过滤、加几滴氯仿于 -20 下保存,用于营养盐分析测定。现场采集 1000ml 水样冷藏保存,回到实验室后立刻利用 Whatman®GF/F(47mm)滤膜过滤,滤膜冷冻保存用于叶绿素 *a* 的测定。

1.2 分析方法

营养盐用营养盐自动分析仪(Skalar® San Plus)测定,NO₃采用铜镉还原柱法、NO₂利用重氮偶氮法、NH₄用次溴酸钠氧化法、PO₄用磷钼蓝法、SiO₃用硅钼蓝法测定。溶解氧(DO)和化学耗氧量(COD)按照“海洋监测规范”分别采用碘量法和碱性高锰酸钾氧化法测定。

叶绿素 *a* 的分析和测定依据联合国教科文组织推荐的方法,采用 751 型分光光度计测定(SCOR-UNESCO,1966),根据 Jeffrey 等(1975)提出的公式计算其含量。

2 结果与讨论

2.1 调查海域环境要素以及营养盐含量分布、组成结构特征

2.1.1 调查海域环境要素特征 2000 年夏季,在胶州湾东北部典型养殖海域进行现场调查的结果显示,该海域叶绿素 *a* 含量的平均值为 6.34 μ g/L(1.67—11.37 μ g/L),与中国沿海及世界其他海域相比,属于正常范围(邹景忠等,1985)。表 1 给出该海域 2000 年度夏季调查期间叶绿素 *a*、温度、盐度、pH、DO 及 COD 与胶州湾全湾夏季各环境要素的比较情况。由表 1 中可知,2000 年度调查期间该海域平均温度为 29.1 (25.6—32.0),盐度为 30.1(28.0—31.2),pH 为 8.00(7.17—8.46),DO 平均值为 6.78mg/L(4.61—11.37 mg/L),COD 平均值为 2.05 mg/L(0.82—3.61 mg/L)。该海域夏季表层水体中叶绿素 *a* 的平均含量为 6.34 μ g/L,高于 20 世纪 90 年代胶州湾全湾年平均值 3.61 μ g/L;与 20 世纪 80 年代夏季的平均值 6.61 μ g/L 基本持平,但仍高于其全湾的平均值 4.53 μ g/L。

该海域营养盐含量偏高,为浮游植物生长提供了良好的物质基础。另外,因该海域水体较浅,使得夏季水温高于胶州湾全湾的平均值;由于陆源输入及夏季降雨等因素的影响,该海域盐度略低于胶州湾全湾的平均值,pH 二者基本相同。适宜的营养和水文气象环境更有利于浮游植物的生长繁殖,使得该海域叶绿素 *a* 含量高于胶州湾全湾的平均值。

溶解氧(DO)含量是反映海域水质状况的一种重要指标。该海域为胶州湾典型的对虾和蛤蜊养殖区(张继红等,2005),水体透明度相对较差,但由于水体较浅,受潮汐和风力扰动比较明显,所以水体中 DO 水平和胶州湾全湾基本相同,都大于 6.0mg/L,不致影响水生生物的正常生长。化学耗氧量(COD)是反映水体有机物含量的一个

表 1 胶州湾东北部养殖海域及全湾夏季各种环境要素的比较

Tab.1 Comparison of environmental factors between the northeast mariculture waters and the overall average in the Jiaozhou Bay in summer

调查海域及调查时间	叶绿素 <i>a</i> (μ g/L)	温度()	盐度	pH	DO(mg/L)	COD(mg/L)	参考文献
女姑山 2000 年	6.34	29.1	30.1	8.0	6.78	2.05	本次调查
胶州湾 (90 年代)	3.61 ¹⁾	25.6	31.4	8.1	6.05	1.35	焦念志等, 2001

1) 胶州湾 90 年代叶绿素 *a* 为全年平均值

重要参数。该调查海域由于受到生活污水、特别是养殖废水以及养殖自身污染的影响,水体中除了藻类外还包含着大量的其他有机物。在该海域测定的 COD 含量为 2.05 mg/L 高于胶州湾全湾的平均含量(1.35mg/L),也进一步证明了其有机物成分较高。所以在发展养殖业的同时,应关注由此带来的环境污染特别是有机污染问题。

2.1.2 调查海域营养盐含量分布特征 水体中适当的营养盐含量是浮游植物生长的物质基础(吴玉霖等, 2005)。2000 年夏季的调查显示,该海域营养盐比较丰富,溶解态磷酸盐(PO_4)和硅酸盐(SiO_3)平均浓度分别为 1.01 $\mu\text{mol/L}$ 、10.37 $\mu\text{mol/L}$,总溶解无机氮(DIN,包括硝酸盐、亚硝酸盐、铵氮)平均浓度为 43.71 $\mu\text{mol/L}$ 。2000 年及 1997—1999 年该海域夏季营养盐平均含量与胶州湾夏季及全年的含量比较如表 2 所示。可以看出 2000 年度该海域各种营养盐含量均明显高于胶州湾全湾夏季和全年的平均含量,1997—1999 年该海域的调查结果也证明了这一特点(霍文毅等, 2001a)。

表 2 中数据显示,在历时 4 年的现场调查中,该海域夏季各种营养盐浓度年际变化较大,但均明显高于全湾夏季和全年的平均含量。其中 DIN 的最大变动幅度达 3 倍以上,溶解态无机磷、硅的含量变幅也在 2 倍以上。各种形态的溶解无机氮中,亚硝态氮所占的比例相对较低,一般只占当年度的 10% 左右,铵态氮和硝态氮是 DIN 的主要存在形式,但不同年份二者在 DIN 中所占的比例不同,1997—2000 年铵态氮占 DIN 的比例分别为 81.2%、38.0%、54.9% 和 70.5%;硝态氮占 DIN 的比例分别为 11.1%、51.4%、33.8% 和

15.9%。比较而言,1997—1998 年胶州湾全湾夏季 DIN 中各形态所占比例也表现出类似的趋势,即铵态氮和硝态氮是 DIN 的主要形式、亚硝态氮比例最低。沈志良等(1997)总结胶州湾历史资料也说明,自 20 世纪 60 年代到 90 年代,胶州湾铵态氮始终是浮游植物主要的氮源。

本研究调查海域是胶州湾典型的对虾和蛤蜊养殖区,据水产部门统计,东西沿岸各乡镇养虾池面积达万亩以上,对虾放养前期一般施用大量的尿素或鸡粪等有机肥以培养浮游植物(俗称为肥水),养殖过程中也需投入大量富含蛋白质的人工饵料,按照每亩对虾投喂 200—400kg 人工饵料计算(王方国等, 1991),胶州湾东北部沿岸每年大约要投入数千吨饵料,即使精养模式的虾池,对虾实际上也只能利用其中的 10% 左右(齐振雄等, 1998),60% 以上的氮、磷或随养殖废水直接排入附近水域,或沉积于池底,通过每年养殖池的翻新等过程最终排入近岸海域(杨逸萍等, 1999),可见对虾养殖对该海域 DIN 和磷酸盐的贡献较大。除此之外,该海域还是菲律宾蛤仔的主要养殖区,东西两岸滩涂养殖面积可达 4 万亩以上,在其生长代谢过程中消耗大量的氧气,加速沉积物中有机质的还原,增强了微生物的活性,可以促使沉积物中有机氮、磷的转化和释放。研究已经证实,贝类养殖区沉积物中氮的释放量高于其他同类型沉积物(杨红生等, 1998; 张继红等, 2005)。因此,该海域养殖废水和饵料残留是导致水体中的总溶解无机氮(DIN)、磷酸盐(DIP)均高于胶州湾全湾含量的重要原因之一。硅酸盐主要受降雨引起的陆地径流输入的影响,研究已证明,胶州湾夏季硅酸盐含量高于其他季节(沈志良,

表 2 胶州湾东北部养殖海域夏季与全湾夏季及全年的营养盐浓度比较($\mu\text{mol/L}$)

Tab.2 Comparison in nutrient concentration between the northeast mariculture waters in summer and the overall average of the Jiaozhou Bay in summer and whole year

调查海域及调查时间	PO_4	SiO_3	NO_3	NO_2	NH_4	DIN	参考文献
女姑山 1997 年夏季	1.27	7.33	11.84	8.17	86.59	106.60	霍文毅等,2001a
1998 年夏季	0.75	17.87	17.07	3.50	12.61	33.18	霍文毅等,2001a
1999 年夏季	0.89	9.24	20.18	6.68	32.71	59.57	霍文毅等,2001a
2000 年夏季	1.01	10.37	6.95	5.94	30.82	43.71	本文调查数据
胶州湾 ¹⁾ 夏季	0.28	3.50	1.50	0.56	8.50	10.60	Shen, 2001
全年	0.30	2.10	1.40	0.83	7.90	10.10	

1) Shen (2001)文献中胶州湾夏季是 9 月份数据,全年是 2、5、9、12 月份数据的平均值

1997)。沿岸工农业废水及生活污水的排放也是造成该海域水体营养盐含量较高的原因之一。另据研究表明,该海域潮流速度较小,水体混合较弱,海水已基本达到自净极限(俞光耀等,1983),因此各种途径输入的营养物质可在这一水域滞留较长时间,进一步增加该水域的营养盐含量水平。

2.1.3 调查海域营养盐组成结构特征 2000 年夏季调查期间,该海域 DIN/P 比范围在 8.61—155.81 之间, Si/DIN 比范围在 0.00—0.75, Si/P 比范围在 0.00—14.44, 与 1997—1999 年度该海域及胶州湾全年和夏季营养盐组成结构比较如表 3 所示。该调查海域(包括胶州湾整个海域)水体中磷酸盐和硅酸盐相对总溶解无机氮的含量偏低,夏季生物量出现峰值时大量消耗各种营养盐,致使水体中各种营养盐组成结构比例变化范围较大。从 DIN/P 和 Si/DIN 比可以看出,该海域氮比较充足,而磷、硅则相对匮乏。虽然本研究调查海域历年的 DIN/P 和 Si/DIN 比变化较大,但 DIN/P 比远远大于通常情况下海洋浮游植物生长所需要的 $N:P=16:1$ 的原子比,而 Si/DIN 小于浮游植物生长所需要的 $Si:N=1:1$ 的原子比。根据 Justic 等(1995)和 Dortch 等(1992)提出的氮、磷营养盐化学计量限制标准,该海域表现出较为

显著的硅、磷限制的可能性。

另外,本研究的调查海域 DIN/P 大于胶州湾夏季及全年的平均比值,说明相对于胶州湾其他海区,女姑山养殖海域磷限制的可能性更大。张利永等(2004)研究了胶州湾女姑山水域夏季赤潮高发期浮游植物群落结构特征发现,中肋骨条藻等小细胞的硅藻对高氮磷比的耐受程度更高,该水域高氮磷比将更有助于硅藻赤潮的形成。除 1997 年外,该海域 Si/DIN 与胶州湾其他海域基本一致,均小于 1,表现出硅限制的可能性。沈志良等(1994)曾报道磷是胶州湾浮游植物生长的限制因子,张均顺等(1997)的研究证明,胶州湾表层海水中溶解无机硅成为浮游植物限制因子出现的几率在迅速增加。作者对胶州湾东北部养殖海域历时 4 年的调查结果也进一步证实了以上的研究结果。

2.2 调查海域营养盐等环境要素对浮游植物生长的影响

2.2.1 浮游植物生物量与环境因子的相关性分析 表 4 给出了 2000 年夏季调查海域叶绿素 *a* 与环境要素及各种营养盐的相关分析。由表 4 可以看出,叶绿素 *a* 与 COD、NO₃ 及 NO₂ 相关性不显著,与 pH、DO 呈显著正相关,这与浮游植物的消长有关,当藻类快速增殖时,光合作用吸收大量的 CO₂ 并释放出 O₂,致使海水的 DO 和 pH

表 3 胶州湾东北部养殖海域夏季与全湾夏季及全年营养盐组成结构比较

Tab.3 Comparison of DIN/P, Si/DIN and Si/P ratios between the northeast mariculture waters in summer and the overall average of the Jiaozhou Bay in summer and whole year

调查海域及调查时间		DIN/P	Si / DIN	Si/P	参考文献
女姑山	1997 夏季	83.94	0.07	5.77	霍文毅等, 2001a
	1998 夏季	44.24	0.54	23.83	霍文毅等, 2001a
	1999 夏季	66.93	0.16	10.38	霍文毅等, 2001a
	2000 夏季	43.28	0.24	10.27	本次调查
胶州湾	夏季	38.5	0.33	12.3	Shen, 2001
	全年	33.7	0.30	7.7	

表 4 叶绿素 *a* 与环境因子的相关性分析(Spearman 秩相关系数, $n=46$)

Tab.4 Spearman rank coefficient of Chl.*a* and environmental factors

Chl. <i>a</i>	pH	DO	COD	PO ₄	SiO ₃	NO ₃	NO ₂	NH ₄	DIN
<i>R</i>	0.72	0.48	0.03	-0.65	-0.63	0.23	0.02	-0.65	-0.62
<i>t_s</i>	5.02	3.25	0.65	-4.38	-4.26	1.64	0.53	-4.35	-4.22
α	<0.01*	<0.05**	>0.20	<0.01*	<0.01*	0.15	>0.25	<0.05**	<0.01*

注: *R* 为相关系数, *t_s* 为 *t*-检验统计量, α 为显著水平, *n* 为样本个数。* 为 0.01 显著水平下的相关($t_{0.01, 45} = 2.58$); ** 为 0.05 显著水平下

的相关($t_{0.05, 45} = 1.96$)

增高；当藻类开始消亡时，死亡的藻类被细菌等微生物分解，大量消耗水体中的 DO，导致赤潮后期 DO 降低。

与叶绿素 a 呈负相关的环境因子包括 PO_4 、 SiO_3 、 NH_4 、DIN。该海域夏季浮游植物生物量的增加导致对磷、硅营养盐快速消耗，生物量高峰期磷、硅营养盐的耗尽使得赤潮逐渐消亡(霍文毅等, 2001b)。由于该海域铵态氮是总溶解无机氮的主要成分，浮游植物快速增殖时消耗大量铵态氮，所以 NH_4 和 DIN 与叶绿素 a 表现出较显著的负相关，而 NO_3 及 NO_2 与叶绿素 a 的相关性不显著。Bronk 等 (1994)总结了浮游植物吸收氮的动力学过程，认为 NO_3 经硝酸盐还原酶转化为 NH_4 是一个耗能过程，所以当水体中同时存在几种不同形态氮盐时， NH_4 通常优先被利用，许多的藻类营养吸收动力学实验也证明了这一点。而洪君超等 (1994)对长江口海域中肋骨条藻赤潮发生过程的研究发现，在其增殖过程中吸收硝态氮为主要氮源，这可能与长江口海域硝态氮是主要氮源有关。自然海域中各种形态无机氮的含量及组成变化既受到浮游植物吸收的影响，也受到外源输入和微生物分解等因素的影响，所以各种形态氮的变化往往是各方面综合作用的结果。

2.2.2 营养盐对浮游植物生长的可能限制作用

氮、磷、硅的含量分布是海洋浮游生物生长繁殖的控制性因素之一。同时，营养盐的组成结构对浮游植物的生长和群落结构变化也起着至关重要的影响作用。表 5 给出的是该海域 2000 年夏季各种营养盐作为浮游植物限制因子出现几率的比较。从表 5 中计算结果可以看出，仅考虑化学计量标准时，该海域夏季浮游植物受控于各单一

营养盐限制因子的出现几率分别为：溶解无机氮为 0.0%，溶解态磷酸盐为 2.45%，溶解态硅酸盐为 84.8%，与胶州湾全湾 20 世纪 90 年代的情况类似(张均顺等, 1997)。

如果考虑到各种无机营养盐对浮游植物生长影响的阈值时，溶解无机氮和磷酸盐限制的几率均降为 0%，而溶解态硅酸盐作为限制因子的可能性也只有 15.2%，低于胶州湾全湾的水平。总体来看，该海域无机氮含量十分丰富，不会成为表层水体浮游植物生长的限制因素。磷酸盐含量相对无机氮较低，在通常情况下磷酸盐高于其阈值，不成为浮游植物生长的限制因素，但在赤潮发生时，常常出现因磷耗尽而限制浮游植物继续增殖的现象。该海域表层水体中硅酸盐含量相对于无机氮和磷酸盐较低，浮游植物大量增殖时，特别是硅藻赤潮发生时，硅酸盐成为主要的限制因子。研究已经证实由于营养盐结构的变化，胶州湾大型硅藻减少并趋于小型化，浮游植物优势种组成发生变化(沈志良, 2002)。说明营养盐组成结构的变化影响浮游植物群落的演变，必将导致生态系统的变化。

3 结论

(1) 胶州湾东北部典型养殖海域夏季表层水体各种营养盐含量高于胶州湾全湾夏季和全年的平均值；与胶州湾全湾情况类似，铵氮是总溶解态无机氮的主要组成形态，硝态氮次之。

(2) 该调查海域的 DIN/P 高于全湾的比值，Si/DIN 比一般低于全湾的比值，Si/P 比与全湾的比值相当，说明与胶州湾全湾相比较该水域无机氮更丰富，浮游植物生长受控于磷、硅限制的可

表 5 胶州湾东北部养殖海域夏季营养盐限制因子出现几率分析比较(%, $n=46$)

Tab.5 The relative frequency (%, $n=46$) of nutrient limitation in the investigated waters in the Jiaozhou Bay during summer 2000

营养盐限制因子	限制因子出现几率(%)
N 为限制因子	
DIN/ PO_4 -P<10, SiO_3 -Si/DIN>1	0.00
DIN<1 μ mol/L, DIN/ PO_4 -P<10, SiO_3 -Si/DIN>1	0.00
Si 为限制因子	
SiO_3 -Si/ PO_4 -P<10, SiO_3 -Si/DIN<1	84.8
SiO_3 -Si<2 μ mol/L, SiO_3 -Si/ PO_4 -P<10, SiO_3 -Si/DIN<1	15.2
P 为限制因子	
DIN/ PO_4 -P>22, SiO_3 -Si/ PO_4 -P>22	2.45
PO_4 -P<0.1 μ mol/L, DIN/ PO_4 -P>22, SiO_3 -Si/ PO_4 -P>22	0.00

能性也大于全湾。

(3) 该海域 2000 年夏季浮游植物生物量与环境因子的相关分析显示: 叶绿素 *a* 与 pH、DO 呈显著正相关; 与 PO_4 、 SiO_3 、 NH_4 、DIN 呈负相关。

(4) 营养盐对浮游植物生长的限制因素分析表明: 该海域营养盐高于胶州湾全湾平均值, 无机氮不会成为浮游植物生长的限制因素, 磷酸盐有限的可能性, 而浮游植物生长受控于硅酸盐的几率最大, 与以往对该海域和全湾的研究结果一致。

致谢 中国科学院海洋研究所张波、赵卫红等项目全体成员在现场进行样品采集及相关参数分析测定过程中付出辛勤劳动和给予大力协助, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王方国, 刘金灿, 1991. 水体环境因子与对虾养殖的关系. 海洋科学, 4: 6—8
- 齐振雄, 李德尚, 张曼平等, 1998. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究. 水产学报, 22(2): 124—128
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 35(6): 487—498
- 张利永, 刘东艳, 孙 军等, 2004. 胶州湾女姑山水域夏季赤潮高发期浮游植物群落结构特征. 中国海洋大学学报, 34(6): 997—1002
- 张均顺, 沈志良, 1997. 胶州湾营养盐结构变化的研究. 海洋与湖沼, 28(5): 529—534
- 李学刚, 宋金明, 李 宁等, 2005. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征. 海洋与湖沼, 36(6): 562—571
- 杨红生, 周 毅, 1998. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展. 海洋科学, 2: 42—44
- 杨逸萍, 王增焕, 孙 建等, 1999. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支. 海洋科学, 1: 15—17
- 沈志良, 1997. 胶州湾营养盐的现状和变化. 海洋科学, 1: 60—63
- 沈志良, 2002. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响. 海洋与湖沼, 33(3): 322—331
- 沈志良, 陆家平, 刘兴俊等, 1994. 胶州湾水域的营养盐. 海洋科学集刊, 35: 117—129
- 邹景忠, 董丽萍, 秦保平等, 1985. 渤海湾遥感试验区海水叶绿素含量的分布及其影响因素. 见: 中国科学院环境科学委员会和天津市环保局合编. 天津: 渤海地区环境遥感论文集. 北京: 科学出版社, 173—179
- 俞光耀, 陈时俊, 1983. 胶州湾环流与污染扩散的数值模拟 III. 胶州湾拉格朗日余流与污染物的迁移. 山东海洋学院学报, 13(1): 1—14
- 洪君超, 黄秀清, 蒋晓山等, 1994. 长江口中肋骨条藻赤潮发生过程环境要素分析——营养盐状况. 海洋与湖沼, 25(2): 179—184
- 焦念志等著, 2001. 海湾生态过程与持续发展. 北京: 科学出版社, 217—243
- 霍文毅, 俞志明, 邹景忠等, 2001a. 胶州湾中浮动弯角藻赤潮生消动态过程及其成因分析. 水产学报, 25(3): 222—226
- 霍文毅, 俞志明, 邹景忠等, 2001b. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 32(3): 311—318
- Bronk D A, Glibert P M, Ward B B, 1994. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production. Science, 265: 1843—1846
- Dortch Q, Whitledge T E, 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? Continental Shelf Research, 12: 1293—1309
- Escaravage V, Prins T C, Smaal A C *et al*, 1996. The response of phytoplankton communities to phosphorus input reduction in mesocosm experiments. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 198: 55—79
- Jeffrey S W, Humphrey G F, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*1, *c*2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochimie and Physiologia der Pflanzen, 167: 191—194
- Justic D, Rabalais N N, Turner R E *et al*, 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 40: 339—356
- Nelson D M, Brzezinski M A, 1990. Kinetics of silicate acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf and Stream warm-core rings. Marine Ecology Progress Series, 62: 283—292
- Neundorfer J V, Kemp W M, 1993. Nitrogen versus phosphorus enrichment of brackish waters: response of the submerged plant *Potamogeton perfoliatus* and its associated algal communities. Marine Ecology Progress Series, 94: 71—82
- SCOR-UNESCO, 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on Oceanography Methodology (I). Paris: UNESCO, 69
- Shen Z L, 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52: 211—224
- Timothy A, Renate V, Rebecca Z, 2000. Influence of nutrient availability on phytoplankton growth and community structure in the Port Adelaide River, Australia: bioassay assessment of potential nutrient limitation. Hydrobiologia, 429: 89—103
- Taylor D I, Nixon S W, Granger S L *et al*, 1995. Responses of coastal lagoon plant communities to different forms of nutrient enrichment—a mesocosm experiment. Aquatic Botany, 52: 19—34

NUTRIENT EFFECT ON PHYTOPLANKTON IN TYPICAL MARICULTURE WATERS IN SUMMER IN THE NORTHEAST OF THE JIAOZHOU BAY

SONG Xiu-Xian, YU Zhi-Ming

*(Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)*

Abstract A field investigation in typical mariculture waters in the northeast of the Jiaozhou Bay was conducted in summer 2000; nutrient characteristics and the role of limitation to phytoplankton growth were studied in comparison with previous and historical information. The results show that the average nutrients concentrations in surface water were higher than those of overall average of the Jiaozhou Bay in summer and whole year. In our case, ammonium was the dominant composition of DIN in the northeastern part and overall Jiaozhou Bay; and nitrate was the second one. Conditions of temperature, salinity, nutrients concentrations in the area seemed suitable for phytoplankton growth. In 2000 summer, Chl.*a* content was positively correlated to those of pH and DO but PO_4 , SiO_3 , NH_4 and DIN because almost all nutrients concentrations decreased obviously as the result of phytoplankton consumption. In addition, possible nutrient limitation to the phytoplankton growth was analyzed. The results display that the phytoplankton growth in the investigation waters was not limited by DIN. Phosphate probably limited the growth. Silicate, however, certainly limited the phytoplankton growth.

Key words Mariculture waters, the Jiaozhou Bay, Nutrients distribution, Phytoplankton, Limiting factor