

2001—2002年柘林湾大量营养盐的时空分布^{*}

黄长江 杜虹 陈善文 何歆 董巧香[†] 黄文魁[‡]

(广东汕头大学水生生物技术与环境资源保护研究所 汕头 515063)

[†](Aquaculture Research Station of Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA)

[‡](广东省汕头市水产局 汕头 515031)

提要 2001年5月—2002年5月在粤东大规模增养殖区柘林湾及湾外附近海域布设19个测站,对大量营养盐及相关的理化、生物因子进行每月一次的周年调查。结果表明,调查海域大量营养盐的平面分布呈由湾内向湾外、近岸向离岸递减的基本格局,而湾内则表现为西部高于东部的趋势。与外界水体的交换能力、周边地区的陆源排污及湾内海水增养殖业的结构是决定柘林湾营养盐平面分布格局的3个主要因素。调查海域溶解性无机氮、磷、硅的年平均值分别为25.92、1.07和37.61 $\mu\text{mol/L}$,与上一周年调查相比,氮的含量略有上升,而磷、硅的含量分别下降了45.1%和37.0%。调查海区无机营养盐的周年变化基本上表现为单峰型。受2001—2002年度厄尔尼诺现象的影响,2002年春季海区的地表径流明显减少,盐度显著升高,由此造成了海区无机营养盐在这一期间的显著低值,这应是海区磷、硅含量比上一周年显著下降的主要原因。浮游植物生长的限制因子从上一周年的氮限制转变成本周年的磷限制(85.0%),可能是厄尔尼诺现象引起磷含量显著下降的原因,也可能是海区富氮趋势的表现。

关键词 柘林湾, 营养盐, 时空分布

中图分类号 P593

柘林湾位于广东省东北部闽、粤两省的交界处,是一个稳定性比较好的半封闭小型河口湾(蔡爱智, 1994)。由于其良好的避风条件,该湾水产养殖业发展迅速,是广东典型的大规模密集养殖区¹⁾。不断增长的养殖规模已导致海湾富营养化的加剧及生态群落结构的改变,有害赤潮频发给水产养殖业及海湾生态带来了很大的危害(黄长江等, 1999)。本研究小组从2000年5月—2001年5月在柘林湾布设了8个调查测站,初步进行了水化学和浮游生物等多学科的生态调查(周凯等, 2002a, b; 姜胜等, 2002; 黄长江等, 2003)。调查结果表明,柘林湾的富营养化程度已达到较高水平,磷与硅的含量显著高于国内绝大多数同类型的海湾,主要污染源为陆源排放,大规模增养殖业也具有相当的影响;浮游植物与浮

游动物的生物多样性下降,少数优势种的优势度极高,群落构成小型化的趋势明显。为了进一步了解该海湾生态系统的时空变化,本研究小组从2001年5月至2002年5月在原有8个测站基础上又增设了11个,对柘林湾及周边水域生态系统的结构与功能进行了第2个周年调查。本文将详细介绍调查水域大量营养盐的分布规律及其相互间的关系。

1 材料与方法

1.1 站位布设

调查测站及各类养殖区的分布见杜虹等(2003)文献。本调查共设19个大面采样站位,从S₁到S₁₉站基本形成了从湾内至湾外的站点布设格局。柘林湾面积约68km²,湾内侧主要为贝类养殖区,近湾口及湾口处主要为网箱渔排,但在湾内侧近三百米处

^{*} 广东省重大科技兴海项目, A200005F02号; 广东省自然科学基金资助项目, 021260号; 国家教育部骨干教师资助计划项目, 2000(23)号。黄长江, 博士, 教授, E-mail: cjhuang@stu.edu.cn

1) 黄文魁, 1998. 汕头海洋资源开发与利用: 从日本资源型管理渔业探讨我市近海渔业资源可持续发展的对策. 广东汕头: 方志图文技术服务部, 183—190

收稿日期: 2003-02-21, 收修改稿日期: 2003-09-23

有一较大规模的网箱渔排, 目前该湾网箱渔排总数超过 5 万格。湾内东部为大规模牡蛎挂养区, 面积近 20km^2 , 西部则为挂养牡蛎与底播蛤类的混养区, S_4 、 S_9 站即位于底播蛤类养殖区。 S_{13} 站位于牡蛎养殖区, S_{10} 、 S_{12} 站位于牡蛎与网箱混合区, S_3 、 S_5 、 S_{11} 、 S_{14} 、 S_{16} 站位于渔排养殖区边缘, S_{15} 站位于渔排养殖区中心。 S_2 、 S_3 、 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14} 、 S_{15} 、 S_{16} 、 S_{18} 和 S_{19} 站为重点站, 除 S_{12} 站外, 其余 8 个测站与上一周年的调查测站相同。

1.2 现场调查采样与样品分析

于 2001 年 5 月—2002 年 5 月, 每月按大面采样站和重点站各现场调查 1 次, 即 9 个重点站位的调查每月进行两次。每次调查在高潮前后 1.5—2h 内完成。站位定点使用 Garmin 公司的 GPS12 型全球卫星定位系统。

水样采集和理化指标的现场测定都分表(离水面 0.5m)、底(离水底 0.5m)层进行。水样采集后立即用 $0.45\mu\text{m}$ 的 Millipore 滤膜进行现场减压过滤, 保温箱内低温保存, 于 2—3h 内带回实验室进行各化学指标的测定。硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)用铜镉柱还原法还原后按亚硝酸盐的方法测定, 亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)用盐酸萘乙二胺络合显色法, 铵氮($\text{NH}_4\text{-N}$)用次氯酸钠氧化靛酚蓝法, 磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)用磷钼蓝法。以上 4 种营养盐均用荷兰 SKALAR 微量连续自动分析仪测定, 用联机软件进行漂移校正。硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)用硅钼蓝法, 分析测定采用日本岛津 UV-2501 型紫外/可见分光光度计。水深、水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)和 pH 等指标用美国 YSI-6600 型水质分析仪现场测定。

1.3 数据处理

由于柘林湾水深较浅, 垂直搅动相对剧烈, 所以文中引用的数值均为表、底层平均值。有关营养盐与理化指标的空间分布采用大面站的数据, 季节变动、周年平均值和氮、磷、硅三者之间比值的数据则只取每月两次调查中重点站的数据, 以便与上一调查周年的结果进行比较。平面分布的等值线采用 Surfer 7.0 (Golden Software) 软件生成。海水各要素间相关关系分析则采用每月大面站和重点站的所有实测数据。

根据 Justic (1995a, b) 和 Dortch 等 (1992) 的原则评估每一种营养盐的化学计量限制: 当海水中 $\text{Si:P} > 22$ 和 $\text{N:P} > 22$ 时, 磷酸盐为限制因子; $\text{DIN:P} < 10$ 和 $\text{Si:N} > 1$ 时, 溶解无机氮为限制因子; 若 $\text{Si:P} <$

10 和 $\text{Si:N} < 1$, 则溶解无机硅为限制因子。

2 结果

2.1 水温和盐度的时空变动

调查海区水温年均值的平面分布明显呈由湾内向湾外递减的趋势(图 1a)。黄冈河内 S_1 站的水温最高, 年均值为 25.7°C 。湾外 S_{19} 站最低, 年均值为 24.3°C 。相反, 盐度的平面分布则呈由湾内向湾外递增的趋势(图 1b), S_1 站的盐度最低, 年平均值只有 20.18, 湾外 S_{19} 站最高, 年平均值达 31.22。

调查期间水温的季节变化非常显著(图 2), 测站随测值周年变化范围在 $13.9\text{—}30.4^\circ\text{C}$, 整个海区的周年平均值为 24.6°C 。1 月水温最低, 月均值为 15.4°C ; 8 月最高, 月均值为 29.5°C 。调查期间盐度的周年变化范围为 7.81—33.65, 海区年均值为 28.92。受雨季影响, 2001 年 6—7 月的盐度最低, 月均值为 24.71—24.61。此后盐度一路攀升, 于 2002 年 5 月录得调查期间的最高值(月均值为 31.61), 该值比 2001 年 5 月的月均值高 6.3。

2.2 溶解无机氮的时空变动

调查海区溶解性总无机氮(DIN)有两个高值区, 即三百门的 S_3 站和黄岗河口的 S_2 站, 年均值均大于 $34.00\mu\text{mol/L}$ 。以这两个高值区为基点, 形成由湾内向湾外逐渐递减的平面分布格局(图 3a)。湾外 S_{19} 站的 DIN 含量最低, 年均值只有 $12.30\mu\text{mol/L}$, 与高值区相差近 3 倍。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的高值区位于河口, 呈明显的从河口向湾外递减的趋势(图 3b)。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的高值区在三百门的 S_3 站(图 3c), 并以此个基点向湾外递减。然而, 中央湾口大规模的网箱渔排使 S_{15} 站形成了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的一个次高值区, 而黄岗河口的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量则相对较低。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分布与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的基本相似(图 3d), 但在 S_{15} 站没形成高值区。

调查期间 DIN 测值的周年变化范围为 2.68—76.50 $\mu\text{mol/L}$, 海区年均值为 25.92 $\mu\text{mol/L}$ (图 4)。除了 8 月份外, 2001 年的 DIN 整体处于较高水平($> 30.00\mu\text{mol/L}$)。进入 2002 年后, DIN 则持续下降, 于 2002 年 4 月降至调查期间的最低水平, 月均值为 10.48 $\mu\text{mol/L}$ 。5 月虽明显回升(20.57 $\mu\text{mol/L}$), 但与 2001 年 5 月相比, 仍处于较低水平, 两者相差达 10.49 $\mu\text{mol/L}$ 。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 DIN 的主要成分, 周年变动模式与 DIN 的基本一致, 测值的周年变化范围为 0.54—69.86 $\mu\text{mol/L}$, 海区年均值为 13.92 $\mu\text{mol/L}$, 占 DIN 总量的 53.7%(图 4)。调查期间 $\text{NH}_4\text{-N}$ 测值的周年变化范围在 0.19—36.43 $\mu\text{mol/L}$, 海区年均值为

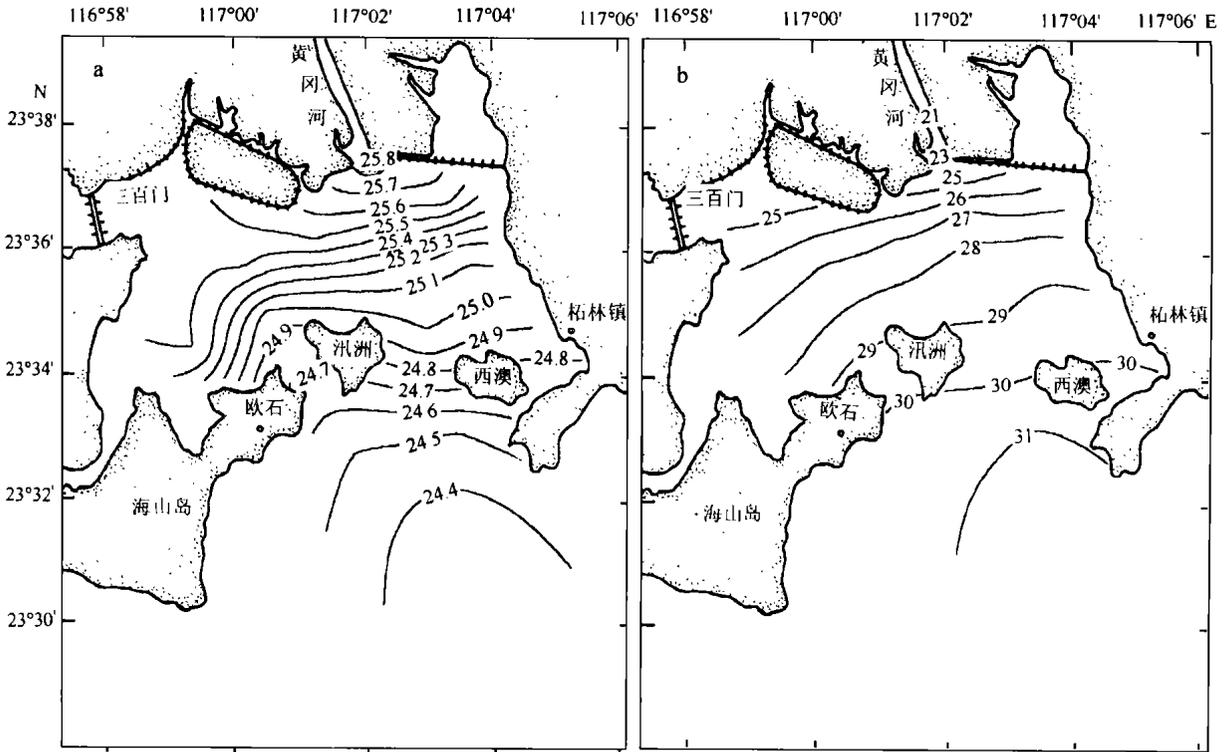


图 1 周年调查期间水温(a)和盐度(b)的平面分布

Fig 1 Horizontal distribution of water temperature(a) and salinity(b) during the investigation

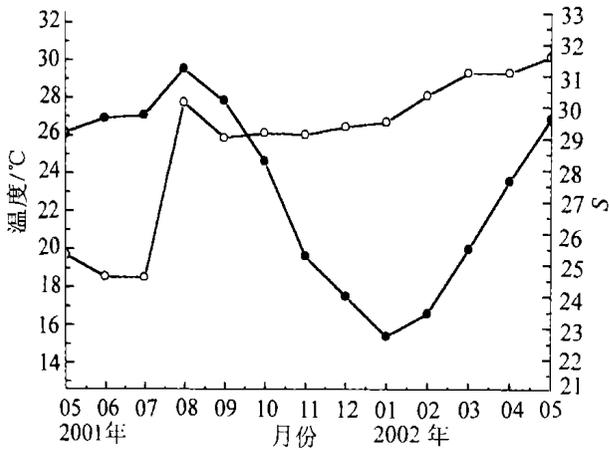


图 2 调查海区水温和盐度月平均值的周年变化

Fig. 2 Annual variation of monthly averages of water temperature and salinity in the investigated area

10.93 $\mu\text{mol/L}$ (图 4), 占 DIN 的 42.2%。NO₂-N 的含量最低, 海区年均值为 1.43 $\mu\text{mol/L}$, 月均值的变动幅度不大(图 4)。

2.3 溶解无机磷的时空变动

调查海区 PO₄-P 年均值的平面分布如图 5。高值区出现在湾顶西北部的三百门(S₃站), 年均值为 1.94 $\mu\text{mol/L}$, 并由此为基点向湾外递减, 等值线非常密集。湾外 S₁₉站含量最低, 年均值只有 0.59 $\mu\text{mol/L}$ 。

与高值区相差达 3.3 倍。与湾西部相比, 湾东部和黄冈河口的 PO₄-P 含量明显较低, 而且分布非常均匀。

调查期间 PO₄-P 测值的变化范围为 0.14—3.15 $\mu\text{mol/L}$, 海区年均值为 1.07 $\mu\text{mol/L}$ (图 6)。PO₄-P 含量的季节变化非常显著, 整体上从春季至秋季呈上升趋势, 从秋季到春季则呈下降趋势。调查期间 PO₄-P 的最高值出现在 2001 年秋季 10 月, 月均值为 1.76 $\mu\text{mol/L}$, 全年最低值位于 2002 年春季 4 月, 月均值只有 0.55 $\mu\text{mol/L}$ 。

2.4 活性硅酸盐的时空变动

调查海区 SiO₃-Si 含量从黄冈河向湾外递减的趋势非常显著(图 7), 等值线几乎与由黄冈河至中央湾口构成的轴线垂直。最高值出现在黄冈河内的 S₁ 站, 年均值为 105.52 $\mu\text{mol/L}$; 最低值出现在 S₁₉ 站, 年均值为 21.08 $\mu\text{mol/L}$, 两者相差达 5 倍。

调查期间 SiO₃-Si 测值的变化范围为 2.50—179.95 $\mu\text{mol/L}$, 海区年均值为 37.61 $\mu\text{mol/L}$ 。2001 年夏季 7 月获得调查期间的最高值为 68.75 $\mu\text{mol/L}$, 8 月显著下降, 9 月回升, 10 月达到次高值后就一路下降, 于 2002 年 5 月获得调查期间的最低值为 19.87 $\mu\text{mol/L}$ (图 8)。

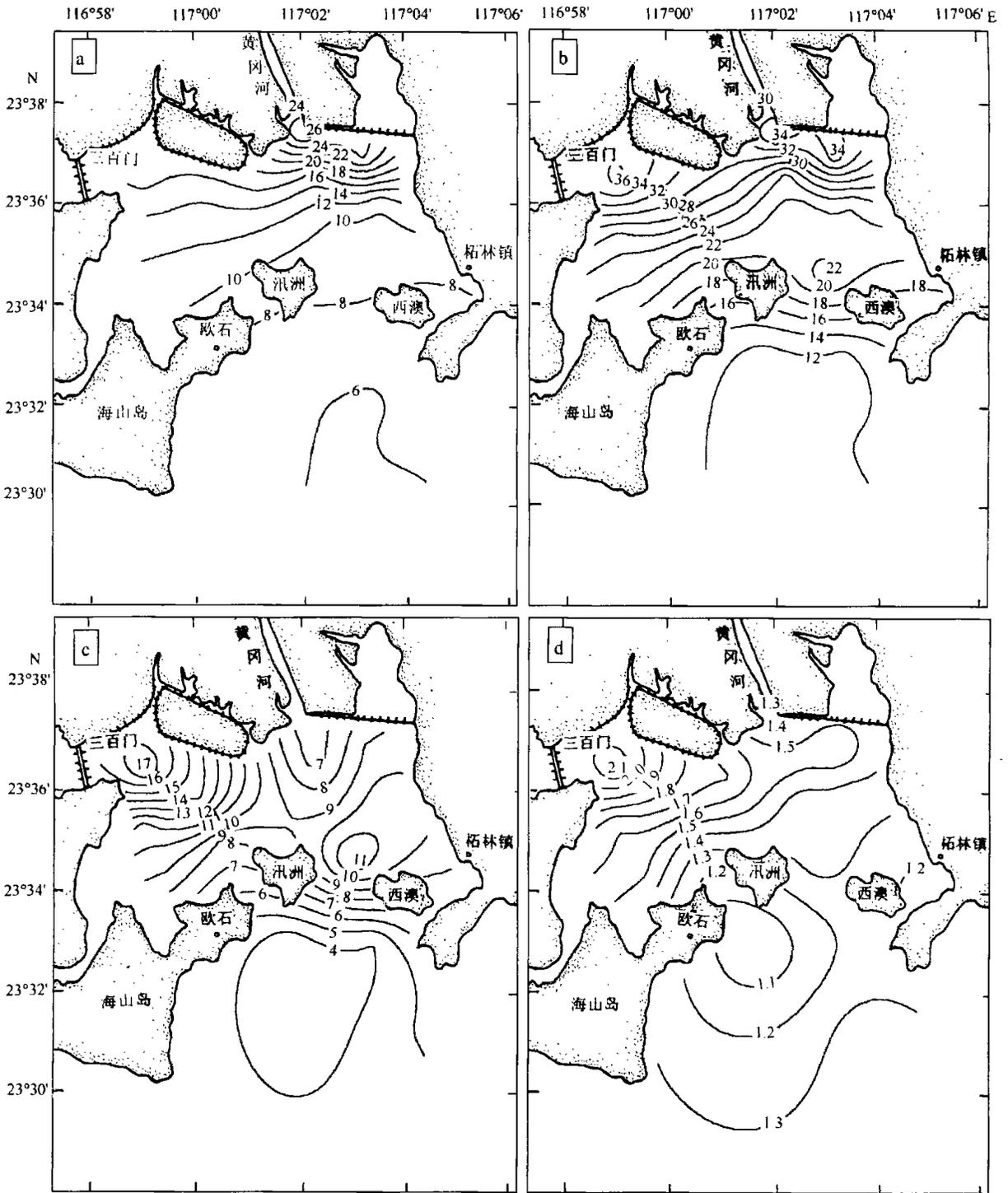


图3 周年调查期间 DIN (a)、NO₃-N (b)、NH₄-N (c)和 NO₂-N (d)的平面分布

Fig 3 Horizontal distribution of DIN (a), NO₃-N (b), NH₄-N (c) and NO₂-N (d) during the investigation

2.5 各营养盐与盐度之间的相关性分析

DIN、PO₄-P、SiO₃-Si 与盐度的相关分析表明(图9), 调查海区 DIN 和 SiO₃-Si 的对数值与盐度存在极显著的负相关关系, 相关系数 R 分别为 -0.5859 ($P < 0.0001$) 和 -0.8397 ($P < 0.0001$)。PO₄-P 与盐

度存在具统计学意义的负相关关系, 相关系数 R 为 -0.1707 ($P = 0.0017$)。

2.6 氮、磷、硅之间的比值

调查海区 N:P 和 Si:P 比值的年均值分别为 27.61 和 46.47, 高峰期位于 2001 年的春末夏初,

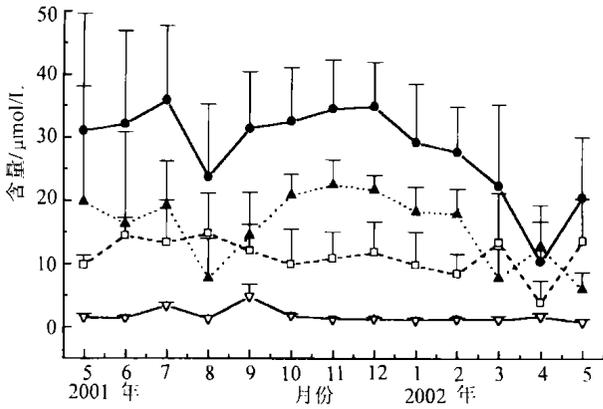


图4 调查海区 DIN、NO₃-N、NH₄-N 和 NO₂-N 月平均值的周年变化

Fig. 4 Annual variation of monthly averages of DIN、NO₃-N、NH₄-N 和 NO₂-N in the investigated area

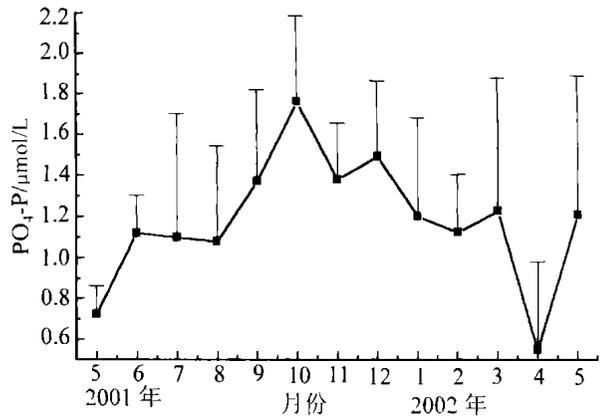


图6 调查期间海区活性磷酸盐月平均值的变化

Fig. 6 Annual variation of monthly averages of phosphate in the investigated area

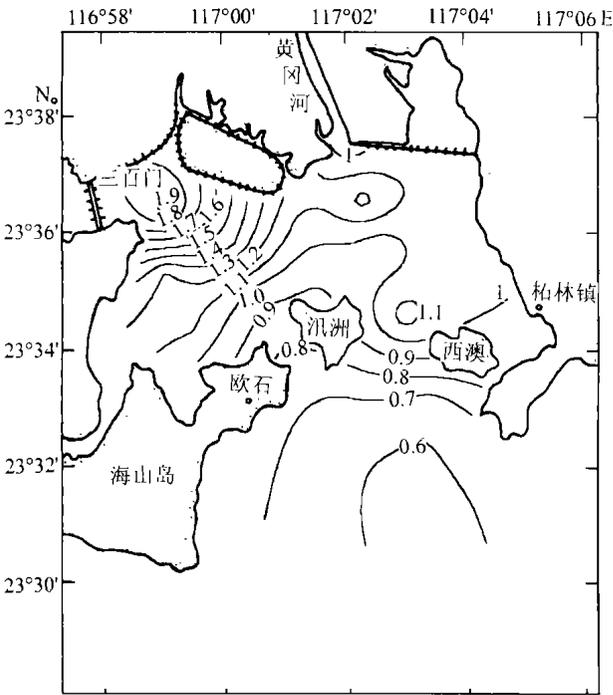


图5 周年调查期间活性磷酸盐的平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of phosphate during the investigation

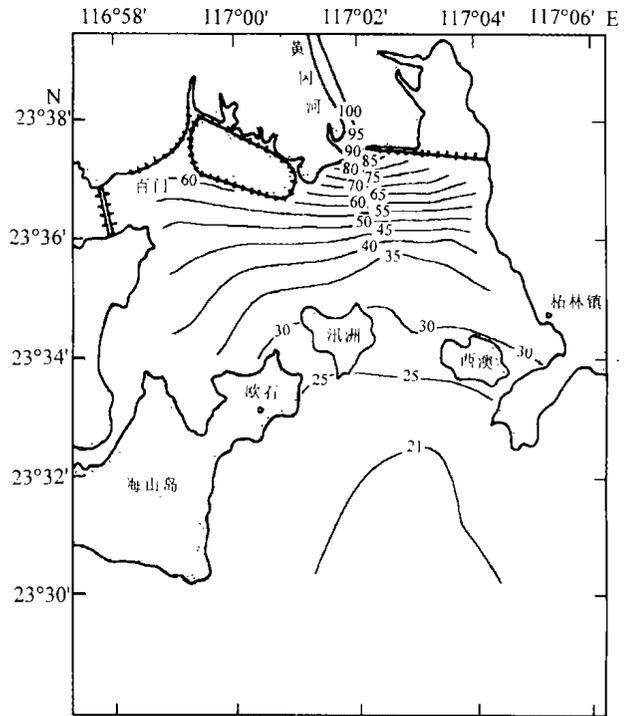


图7 周年调查期间活性硅酸盐的平面分布

Fig. 7 Horizontal distribution of silicate during the investigation

2001年5月此两项指标比2002年5月的高出3倍多(图10)。Si:N比值的年均值为1.69, 2002年春季(4—5月)的比值为调查期间的最高值; 另一高值位于2001年夏季7月。

2.7 柘林湾浮游植物营养盐限制因子

根据 Justic (1995a, b) 和 Dortch 等 (1992) 的原则, 将调查海域 Si、N、P 相互之间的原子比作散点图分析(图11)。结果表明, 柘林湾浮游植物生长受控

于单一营养盐限制因子的出现率为氮 2.4%, 磷 85.0%, 硅 3.4%。

3 讨论

3.1 柘林湾营养盐的空间分布及其影响因素

柘林湾及其湾外附近海域大量营养盐的平面分布基本表现为湾内高于湾外, 近岸高于离岸的格局。NO₃-N 和 SiO₃-Si 的等值线几乎与湾顶岸线平行, 氮、磷、硅含量皆与盐度呈显著负相关关系的调查结果这一分布格局最有力的说明(图3b、图9)。另

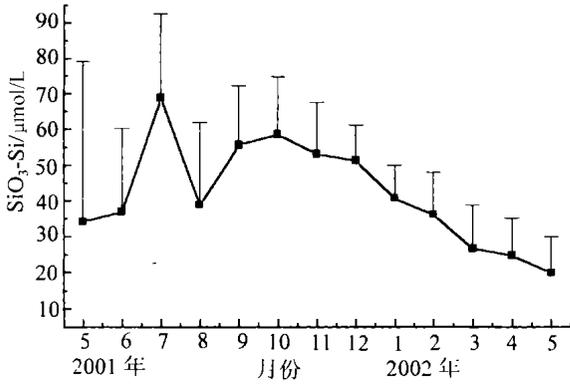


图8 调查期间海区活性硅酸盐月平均值的变化
Fig. 8 Annual variation of monthly averages of silicate in the investigated area

外,通过这种密集方格式的布点调查,清晰地反映出大量营养盐平面分布在柘林湾内存在着明显的局部差异。

柘林湾是一个半封闭的河口湾(杜虹等, 2003 中的图 1),它与外界的水体交换局限于湾东北角的黄岗河和南面的 3 个湾口。其中,从黄岗河至位于中央最宽阔的湾口构成了一条从陆地径流直通湾外的水道,这是柘林湾与外界进行海水交换的主要通道。相比之下西部海域比较封闭,位于南面西侧的狭窄湾口(S₁₄)是其惟一的出口。这种与外界水体交换能力的差异显然是造成 NH₄⁺N、NO₂⁻N 和 PO₄⁻P 的含量西部高于东部的的主要原因,也是与外界交换能力最差、人类活动最为频繁和周边人口密度最大的湾顶西北部三百门港大量营养盐含量最高的根本所在。湾西部偏重于网箱渔排养殖,而东部水域偏重于贝类养殖,是造成营养盐西部高于东部的另一重要因素。因为,网箱养殖的投饵含有高比例鱼粉和杂鱼糜等,残饵含有丰富的磷(张雅芝, 2001; 甘居利, 2001)。Braater(1983)研究发现,在海水网箱养殖鲑鱼中,投喂的干湿饲料有 20% 未被食用,而成为网箱养鱼输出的废物。Walain 等(1991)研究养殖过程中磷的物质平衡,饲料中 15%—30% 的磷被鱼利用,16%—26% 溶解在水中,51%—59% 以颗粒态存在。养殖鱼类的排泄物则高含 NH₄⁺N(杨清心, 1996),位于中央湾口大规模网箱渔排中心的 S₁₅站的高铵、高磷即源于此因。为了印证这一结论,本研究小组于 2002 年 7 月在这一网箱渔排区(S₁₅站)进行了密集布点的补充调查。结果表明,渔排的中央(NH₄⁺N = 19.02 μmol/L; P = 2.23 μmol/L)和边缘(NH₄⁺N = 18.13 μmol/L; P = 2.26 μmol/L)的营养盐含量没有明显差异,但与周边非养殖区(NH₄⁺N =

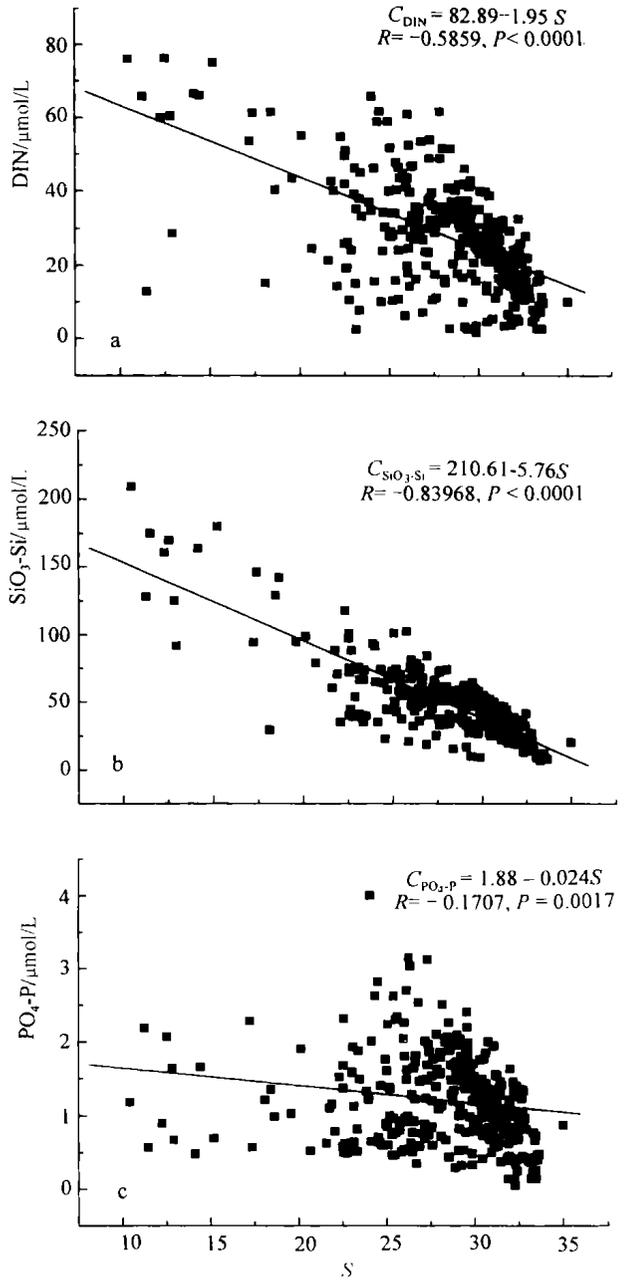


图9 调查海区 DIN、PO₄-P、SiO₃-Si 与盐度的对数回归分析

Fig. 9 A logarithmic analysis between DIN (a), SiO₃-Si (b), PO₄-P (c) and Salinity in the investigated area

17.16 μmol/L; P = 1.73 μmol/L) 和牡蛎养殖区(NH₄⁺N = 16.39 μmol/L; P = 1.90 μmol/L) 相比却明显较高。

近年来,经济发展、工业规模扩大和人口增长等带来的是周边地区大量陆源污水的汇入湾内,这在经济较发达的沿海地区十分普遍,如厦门的西海域(暨卫东, 1996)和 Mazatlan Bay (Alonso-Rodriguez, 2000)。海湾的污染,如以陆源为主,营养盐含量往往表现为枯水期低、丰水期高的特点。柘林湾 2002

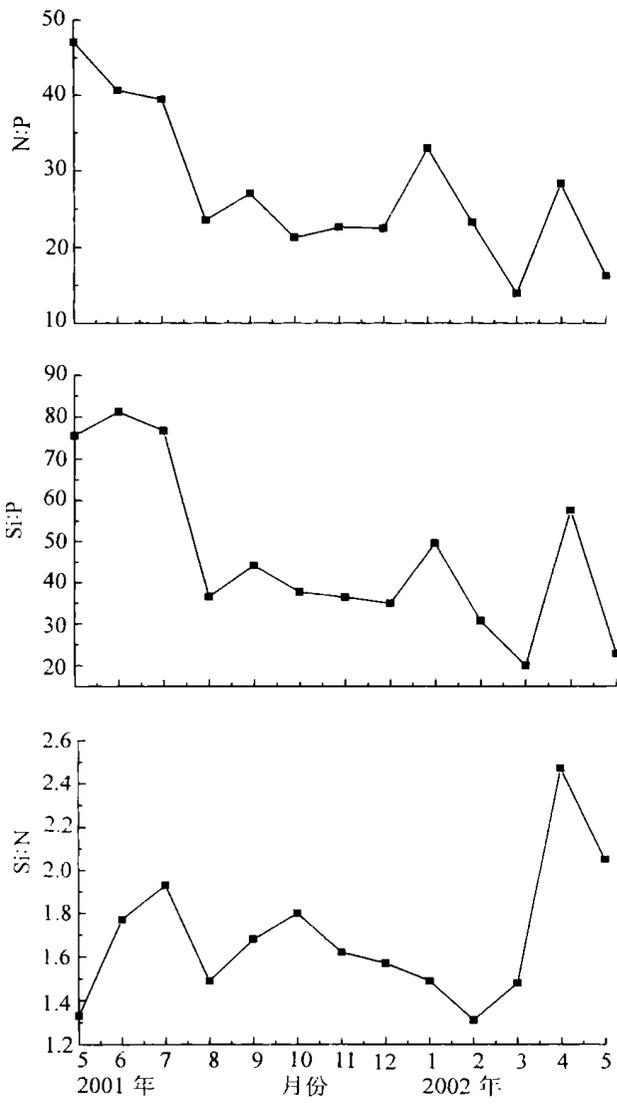


图 10 周年调查期间氮、磷、硅之间的比值

Fig. 10 Atomic ratio of dissolved inorganic nitrogen (N), phosphorus (P) and silicon (Si) in the investigated period

年春季盐度升高, 虽然系径流减少所致, 但营养盐含量同步降低正符合上述特点。因此, 陆源输入仍是影响柘林湾营养盐含量及其分布的最重要因素, 也是柘林湾营养盐湾内高于湾外、近岸高于离岸的原因所在。

3.2 柘林湾营养盐的周年变动及其影响因素

本调查周年显示, 调查海区溶解态无机氮、磷、硅的年均值分别为 25.92、1.07、37.61 $\mu\text{mol/L}$, 与上一调查周年溶解态无机氮 (22.64 $\mu\text{mol/L}$)、磷 (1.95 $\mu\text{mol/L}$)、硅 (59.70 $\mu\text{mol/L}$) 的调查结果相比(周凯, 2002b), 氮的含量略有上升, 而磷、硅则分别下降了 45.1% 和 37.0%。在 13 个调查月份中, 有 8 个月份的无机氮含量超过了 3 类海水为 28.57 $\mu\text{mol/L}$

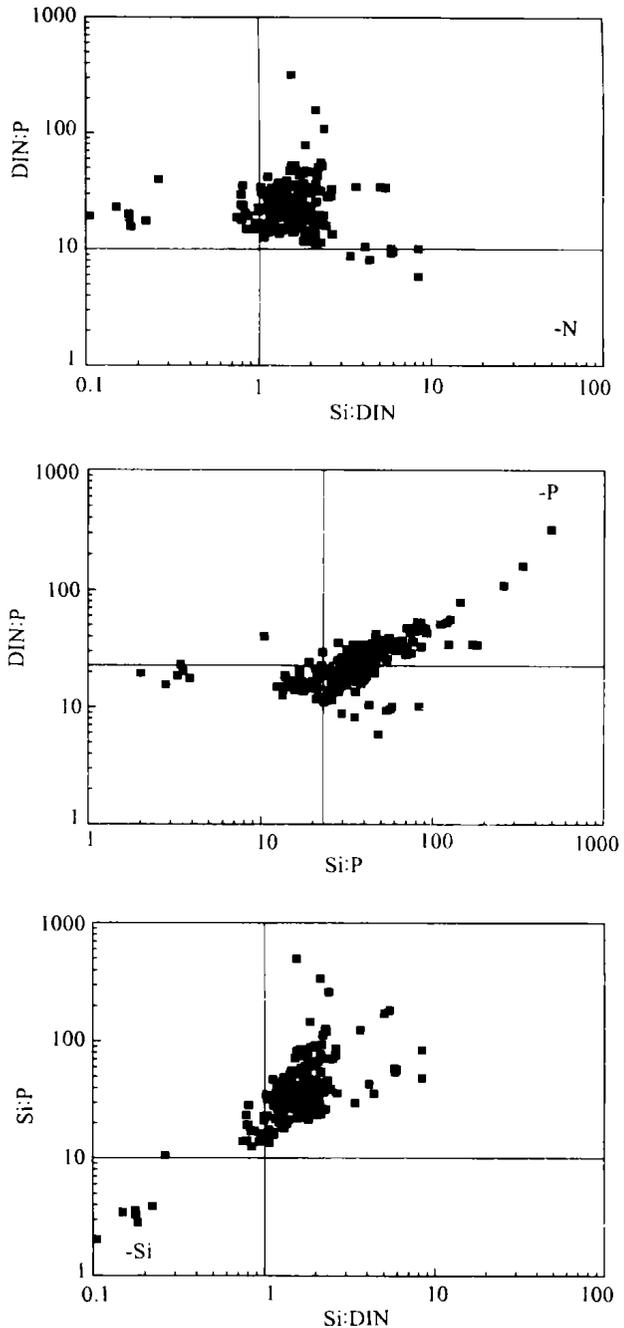


图 11 调查海区营养盐原子比散点图

Fig. 11 Scatter diagram of atomic nutrient ratio in the investigated area

(0.40mg/L) 的国家《海水水质标准》(GB3097-1997); 有 11 个月份的无机磷含量超过了 3 类海水为 0.97 $\mu\text{mol/L}$ (0.03mg/L) 的国家《海水水质标准》(GB3097-1997)。而无机氮和无机磷均超过 3 类海水标准的有 7 个月份 (2001 年 6—7 月, 9—12 月和 2002 年 1 月)。春季 (3—5 月) 无机氮、磷的含量比较低是由于浮游生物大量增殖吸收利用的结果, 夏季又有充足的径流来源进行补充, 因此水体中营养

盐比较充足,而秋、冬季生物活动减弱,且春、夏季浮游生物死亡后营养盐的再生使秋、冬季无机氮、磷的含量比较高,水质较差。

本调查地区属于亚热带气候,其原本的季节特征是终年湿润多雨,四季如春。但当厄尔尼诺侵袭来时,一改往日气候湿润的特点,往往变成少雨、干燥的天气。比如印度,在过去110年间出现了26次厄尔尼诺现象,其中有20次造成干旱(陈志良等,1999)。本调查的盐度数据显示,受2001—2002年度厄尔尼诺现象的影响,从2001年秋季至2002年5月本调查结束时,潮汕地区降雨明显比往年少,地表径流减少,柘林湾水域盐度持续升高。地表径流减少可能是海区P、Si含量在这一时期显著下降的主要原因。其中,主要为陆地起源的Si的含量与盐度的季节变化呈现出对应关系极为显著的相反走势(图1b,图7)。P的下降造成了海区N:P的显著上升,从上一周年的11.6(周凯等,2002b)上升至本周年的27.61。分析其原因,其一,P、N虽同为陆地起源,但N有一部分来自于空气的沉降,并非完全依赖于径流的输入;其二,世界上大多数海湾普遍存在着富氮趋势(Moffat,1988; Meybeck,1988),即N:P比值不断升高的富营养化模式(Rabalais *et al.*,1994; Smith,1984),因而柘林湾N:P比值的升高可能是迎合了这一世界性的富营养化趋势;其三,本周年的 NO_3^- -N和 NO_2^- -N与上一周年相比(周凯等,2002b),其含量实际是有所降低,上升的成份主要是 NH_4^+ -N,年均值从 $4.34\mu\text{mol/L}$ 上升为 $10.93\mu\text{mol/L}$ 。为什么 NH_4^+ -N会异常升高呢?由于受厄尔尼诺现象的影响,从2001年秋季开始,调查海区的气候明显异常,表现为高温少雨,海区网箱养殖鱼类及挂养的贝类发生显著高于往年的死亡现象(现场采样的观察及渔民的投诉)。一方面, NH_4^+ -N是有机氮分解的第一个无机产物(顾宏堪,1982),大量死亡的鱼虾贝类的尸体腐烂会产生大量的铵。另一方面,高温天气将显著加快动、植物尸体腐烂和排泄废物转化成 NH_4^+ -N的速度,而雨量减少导致的径流减弱又不利于 NH_4^+ -N的扩散。

3.3 柘林湾浮游植物营养盐限制因子

化学计量的营养盐限制标准是根据硅藻对营养盐的需求而制定的,海洋硅藻所需求的Si:N:P的原子比为16:16:1(Redfield *et al.*,1963; Tett *et al.*,1985)。调查海区本周年浮游植物生长受控于单一营养盐限制因子的出现率为氮2.4%,磷85.0%,硅

3.4%(图11),即本周年调查柘林湾浮游植物的主要生长限制因子是磷,而上一周年调查的主要限制因子却是氮(周凯等,2002b)。正如上面所述,调查海区浮游植物限制因子从上一周年的氮限制转变成本周年的磷限制,可能是柘林湾富营养化过程中富氮趋势的表现。然而,这种趋势即使存在,速度也不可能如此之快。因此,更重要的可能是厄尔尼诺现象导致的气候异常、径流减少和养殖鱼虾贝类大量死亡等原因造成调查海区 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量下降,而 NH_4^+ -N含量上升。由于柘林湾是一个人口密集、养殖品种多、养殖规模大的半封闭型海湾,其生态系统的构造非常复杂,流动性也较大,两个周年的生态调查是无法准确显示其生态系统结构的变化及其与环境因子之间的关系。因此,对柘林湾进行长期的调查,并进一步深入探讨营养盐的生化循环很有必要,希望能借此建立海湾营养盐与生态系统的相关联系,为预测人类干扰对海湾富营养化演化趋势的影响提供第一手科学数据。

参 考 文 献

- 甘居利,林钦,李纯厚,2001. 柘林湾网箱养殖海域溶解氧分布及其影响因素. 海洋水产研究,22(1): 69—74
- 陈志良,明德主编,1999. 厄尔尼诺——来自天道的警告. 北京:科学普及出版社,22
- 杜虹,黄长江,陈善文,2003. 2001—2002年粤东柘林湾浮游植物的生态学研究. 海洋与湖沼,34(6): 604—617
- 杨清心,李文朝,1996. 东太湖围网养鱼后生态环境的演变. 中国环境科学,16(2): 101—106
- 张雅芝,苏永全,2001. 论我国海水鱼类网箱养殖的可持续发展. 海洋科学,25(7): 52—56
- 姜胜,黄长江,周凯等,2002. 柘林湾浮游动物群落结构及时空分布2000—2001年. 生态学报,22(6): 828—840
- 顾宏堪,马锡年,沈万仁等,1982. 长江口附近氮的地球化学. 山东海洋学院学报,12(2): 31—38
- 黄长江,董巧香,郑磊等,1999. 1997年底中国东南沿海棕囊藻赤潮的生物学与生态学特征. 海洋与湖沼,30(6): 581—590
- 黄长江,何歆,陈善文等,2003. 2001—2002年粤东柘林湾浮游动物的生态学调查. 海洋与湖沼,34(2): 117—130
- 蔡爱智,1994. 粤东柘林湾的泥沙来源和沉积环境. 厦门大学学报(自然科学版),33(4): 515—520
- 暨卫东,黄自强,黄尚高等,1996. 厦门西海域水体富营养化与赤潮关系的研究. 海洋学报,18(1): 51—60
- 国家环境保护局和国家技术监督局,1997. 《海水水质标准》(GB3097-1997). 1—55
- 周凯,黄长江,姜胜等,2002a. 2000—2001年柘林湾浮游植物群落结构及数量变动的周年调查. 生态学报,22(5): 65—75
- 周凯,黄长江,姜胜等,2002b. 2000—2001年粤东柘林湾营养盐分布. 生态学报,22(12): 2116—2124

- Alonso-Rodríguez R, Pérez-osuna F, Cortés-Escribano R, 2000. Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in subtropical waters influenced by municipal sewage effluents in Mazatlán Bay (SE Gulf of California). *Marine Pollution Bulletin*, 40 (4): 331—339
- Braaten B, 1983. Pollution on Norwegian fish farms. *Aquaculture Ireland*, 14: 6—7
- 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
- Justic D, Rabalais N N, Turner R E *et al.*, 1995a. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40: 339—356
- Justic D, Rabalais N N, Turner R E, 1995b. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 30(1): 41—46
- Meybeck M. G, Cauwet S, Dessery M S *et al.*, 1988. Nutrients (organic C, P, N, Si) in the eutrophic Loire (France) and its estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27: 595—624
- Moffat A, 1988. Global nitrogen overload problem grows critical. *Science*, 279: 988—999
- Rabalais N N, Wiseman Jr W J, Turner R E, 1994. Nutrient Changes in the Mississippi river and system responses on the adjacent continental shelf. *Estuaries*, 19(28): 386—407
- Redfield A C, Ketchum B H, Richard F A, 1963. The Influence of Organism on the Composition of Seawater in the Sea, Vol. 2. John Wiley, New York, 26—77
- Smith S V, 1984. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. *Limnol Oceanogr*, 29(6): 1149—1160
- Tett P, Heaney S I, Droop M R, 1985. The Redfield ratio and phytoplankton growth rate. *Journal of Marine Biological Association U K*, 65: 487—504
- Walain M, Hakason L, 1991. Nutrient loading models for estimating the environmental effects of marine fish farm. In: Copenhagen T M ed. *Marine Aquaculture and Environment*. *Chord*, 22: 39—55

THE TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF THE NITROGEN, PHOSPHATE AND SILICATE IN ZHELIN BAY: 2001—2002

HUANG Chang-Jiang, DU Hong, CHEN Shan-Wen, HE Xin, DONG Qiao-Xiang^{*}, HUANG Wen-Kui^{**}
 (Marine Biology Lab, Shantou University, Shantou, 515063)
^{*}(Aquaculture Research Station of Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA)
^{**}(Aquatic Bureau of Shantou city, Shantou, 515031)

Abstract The temporal and spatial distributions of temperature, salinity and nutrients were investigated in Zhelin Bay in the Southeastern China Sea from May 2001 to May 2002. Water samples were collected, monthly, from nineteen stations. The results showed decreasing levels of dissolved inorganic nitrogen, phosphate and silicate from the interior to the outer sections of the bay, and from the nearshore to the offshore areas. The nutrients in the western area of the bay were higher than those in the eastern area. Such a distribution pattern was mainly caused by the water exchange capacity, sewage discharge from the land and mariculture in the bay. The annual variation of inorganic nutrient concentration in the investigated area displayed a mono-peak pattern. Compared to the results of previous investigation of the same area (May 2000—May 2001), the concentration of nitrogen (25.92 μ mol/L) increased, while phosphate (1.07 μ mol/L) dropped 45.2% and silicate (37.61 μ mol/L) dropped 37.0%. The decrease of phosphate and silicate was due to the reduction of river flux, which in turn resulted from the low precipitation in the spring of 2002 associated with the 2001—2002 El Niño effect. This could be verified by the high salinity observed in Zhelin Bay during the investigation. The present investigation also showed that the phosphorus (85.0%) rather than the nitrogen (as in the previous investigation) was the limiting factor for phytoplankton growth in Zhelin Bay. This may be a result of the El Niño effect or may be indicative of nitrogen enrichment in the area.

Key words Zhelin Bay, Nutrients, Temporal and spatial distributions