

# 香港近岸海域营养盐结构特征及其对 浮游植物生长的影响\*

宋秀贤<sup>1,2</sup> 俞志明<sup>1</sup> 殷克东<sup>2</sup> 钱培元<sup>2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071;

2. 香港科技大学生物系 香港 九龙 清水湾)

**提要** 本文利用 2000 年 3 月至 2001 年 5 月在香港近岸牛尾海海域(Porter Shelter, Hong Kong)14 个航次的现场调查数据,对水体中营养盐组成结构和叶绿素 *a* 含量进行了分析研究。结果表明,该海域表层和底层水体中溶解无机氮(DIN,包括  $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N)平均浓度范围分别为 1.24—9.72 $\mu\text{mol/L}$  及 1.30—7.49 $\mu\text{mol/L}$ ,均表现为冬季最高、秋季最低。不同季节表层水体中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度范围为 0.14—0.46 $\mu\text{mol/L}$ ,夏季平均浓度最低;底层  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度变化不大,但夏季仍低于其他季节。不同季节表层和底层水体中  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 的变化趋势基本相似,平均浓度范围分别为 7.80—18.47 $\mu\text{mol/L}$  和 8.13—16.87 $\mu\text{mol/L}$ ,均在冬季最高,其它季节差别不大。叶绿素 *a* 分析结果显示,表层水体高生物量大多出现在夏末秋初季节(如 8 月份),春季(4 月份)次之;底层水体叶绿素 *a* 秋季最高,夏季次之。进一步分析了该海域营养盐对浮游植物生长的可能限制因子,结果表明表层水体春季呈现氮-磷协同限制的可能性、夏季磷限制较明显,秋季表现为显著的氮限制。底层水体春、夏季呈现氮-磷协同限制的趋势,秋季也表现为明显的氮限制。冬季磷酸盐浓度相对氮、硅的含量较低,但各种营养盐相对于浮游植物生长的最低阈值都比较丰富,所以,冬季表、底层水体中营养盐对浮游植物的生长均不形成限制因素。另外,除了夏季表层水体外,其它季节该水域浮游植物生长受溶解无机硅限制的可能性较少。

**关键词** 香港近岸海域;营养盐;限制因子;叶绿素 *a*

**中图分类号** P734.4

营养盐的组成结构和含量水平是影响海洋生物量和种群变化的重要因素(Neundorfer *et al.*, 1993; Taylor *et al.*, 1995),适当浓度的营养盐是浮游植物生长的物质基础。近年来随着沿海经济的快速发展和人类生活水平的提高,大量富含营养元素的废水排入海导致海洋环境富营养化,尤其对近岸海域的影响更为严重。由此而引起有害赤潮的频发现象已经受到世界各国政府和科学家的高度关注(Paerl 1997; Horner *et al.*, 1997)。香港位于中国南部地处亚热带,

具有独特的地理环境特征。关于香港近岸海域营养盐组成结构、叶绿素 *a* 的时空变化以及二者之间的相关性研究报道较少(Yin *et al.*, 1999)。本文通过对 2000 年 3 月至 2001 年 5 月香港近岸牛尾海海域的水质调查结果,分析了不同季节各种营养盐含量及结构组成、叶绿素 *a* 的时空分布。同时,根据 Justić (1995)建立的浮游植物生长的化学计量和可能营养盐限制因素标准以及 Redfield (1963)所确立的大洋海水和浮游生物的 N, P, Si 之间的原子比标准,讨论了该海

\* 国家 973 项目, 2010CB428706 号; 国家自然科学基金创新群体项目, 41121064 号; 国家自然科学基金项目, 41276115 号; 本研究还得到香港科技大学 PREPP 项目的支持。宋秀贤, 女, 博士, 研究员, 主要从事有害藻华防治、海洋环境富营养化及磷的新形态等方面的研究工作。E-mail: songxx@qdio.ac.cn

通讯作者: 俞志明, 博士, 研究员, E-mail: zyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2012-01-20, 收修改稿日期: 2012-06-30

域不同季节各种营养盐对浮游植物生长构成限制因子的可能性,为进一步研究该海域营养盐含量和结构变化对浮游植物种群和生态环境的影响提供了科学依据和资料积累。

## 1 样品采集及分析

### 1.1 研究海区概况

香港位于中国南海的北部沿岸,西部濒临珠江口,地处亚热带。香港海域的水质状况主要来自南海的大洋水、南海沿岸环流和珠江口径流的影响(Chau *et al.*, 1958, 1960; Watts, 1971a, 1971b; Morton *et al.*, 1975)。冬季受东北季风影响,南海沿岸环流在南海水域主要呈西南流向;夏季受西南季风的影响,南海沿岸环流呈东北流向,与珠江冲淡水流向和南海高盐水的入侵方向相反,导致东北部水域夏季表层水体营养盐较丰富。受上述各种营养盐输送以及水温气象等因素的影响,20世纪90年代以来香港海域有害赤潮频繁发生(Yin *et al.*, 2000),而且发生区域大多在东北部的被“庇护”水域(Porter Shelter),例如:吐露港(Tolo Barbour)、Mirs港(Mirs Bay)等水域。本文所涉及的调查海域如图1所示,该海域是一个半封闭区域,水深在5—22米,从地理位置来看,南海沿岸流和南海大洋水对该海域的影响大于珠江冲淡水的影响。

### 1.2 采样及分析方法

于2000年3月至2001年5月期间(其中春季5个航次,夏季3个航次,秋季3个航次,冬季3个航次),对图1中所设置14个站位中的6个站位(P1、P2、

P5、P7、P10和P13)的表层和底层(底质1—2米以上)海水进行了共计14个航次现场采样调查,其它8个站位只测定有关水文参数。表层和底层水样均用香港科技大学工厂制作的5L玻璃树脂(Plexiglas)材料的采水器采集,水样被转移到10L聚乙烯水桶中以备样品分析。营养盐样品现场用60mL的注射器、配备装有预先高温灼烧过的GF/F滤膜(Whatman GF/F)的过滤头(Swinnex filter holder)进行过滤,30mL滤液装在50mL的Nalgene塑料瓶中,低温冷冻两周内测定。所有塑料器皿均预先在实验室内用10%的盐酸浸泡、清洗。叶绿素 $a$ 的样品现场或者将原始水样冷藏保存带回实验室,采用聚碳酸酯滤膜(Poretics®)低压下(<10 mmHg)过滤,滤膜冷冻待测。

所有营养盐均用营养盐自动分析仪(Skalar® San Plus)测定,硝酸盐(包括亚硝酸盐)和氨盐的测定分别用改进的镉柱还原法(Wood *et al.*, 1967)和次溴酸钠氧化法(Slawyk *et al.*, 1972)。磷酸盐和硅酸盐的测定是基于Hager等(1968)的磷钼蓝法和硅钼蓝法。叶绿素 $a$ 是将滤膜置于10mL90%的丙酮中,避光、低温条件下超声处理10分钟,然后低温避光萃取24小时,在实验室内用荧光仪(Turner Designs® model 10)通过测定荧光值计算得到叶绿素 $a$ (Parsons *et al.*, 1984)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同季节表层和底层水体中营养盐含量分布

不同季节调查海域表层和底层水体营养盐浓度范围和平均值如表1所示。由此表可以看出,表层和底层水体中溶解无机氮(DIN)平均浓度范围分别为

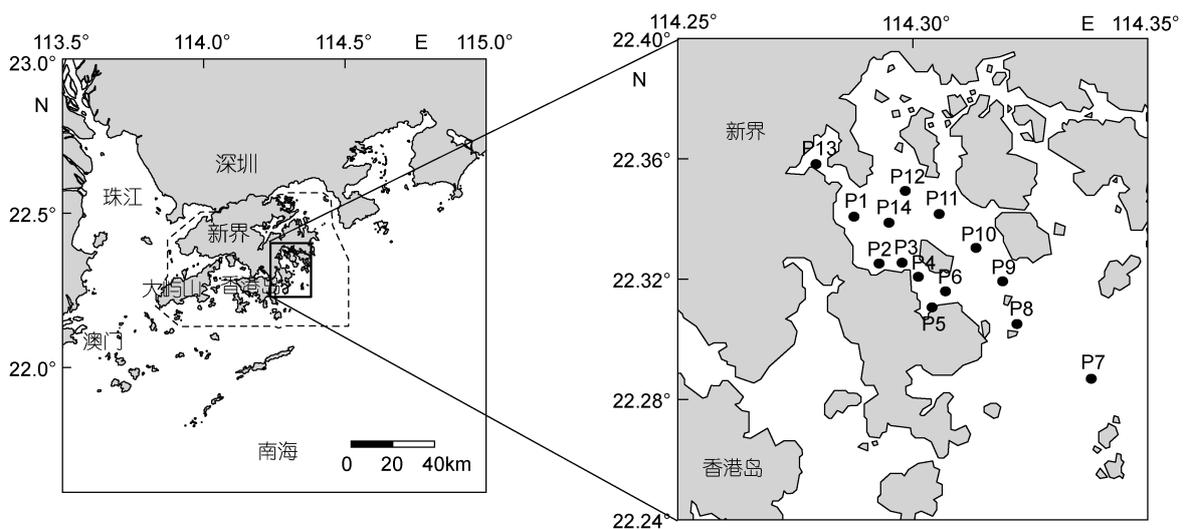


图1 香港近岸海域采样站位

Fig.1 Sampling location in Hong Kong coastal waters (Porter Shelter)

表 1 不同季节各站位表层和底层水体中营养盐的浓度范围和平均值( $\mu\text{mol/L}$ )及不同形态氮占 DIN 的比例  
Tab.1 The average nutrient concentration, range, and nitrogen proportion in surface and bottom waters of Hong Kong coastal area (Porter Shelter)

项目	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$(\text{NO}_3^+ + \text{NO}_2^-)\text{-N}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	DIN	$\text{NH}_4^+\text{-N:DIN}$	$(\text{NO}_3^+ + \text{NO}_2^-)\text{-N:DIN}$	
表层	春季 ( $n=34$ )	0.45—10.05 2.15±2.21	0.07—0.85 0.26±0.19	0.05—13.28 2.31±3.49	0.20—30.69 8.94±7.13	0.78—20.70 4.46±5.04	0.17—0.97 0.58±0.24	0.03—0.83 0.42±0.24
	夏季 ( $n=18$ )	0.26—7.26 1.41±1.87	0.01—0.58 0.14±0.14	0.16—10.76 2.74±3.43	0.05—47.81 11.29±13.41	0.52—15.14 4.15±4.67	0.05—0.90 0.44±0.27	0.10—0.95 0.56±0.27
	秋季 ( $n=12$ )	0.34—2.20 0.72±0.54	0.14—0.45 0.29±0.09	0.05—2.32 0.52±0.63	0.57—30.06 7.80±7.78	0.46—2.72 1.24±0.83	0.15—0.92 0.65±0.22	0.08—0.85 0.35±0.22
	冬季 ( $n=12$ )	0.45—5.97 2.67±1.69	0.27—0.58 0.46±0.10	1.74—19.78 7.06±4.66	15.27—22.97 18.47±2.29	4.00—20.22 9.72±4.22	0.02—0.60 0.31±0.18	0.40—0.98 0.69±0.18
	年平均	1.74	0.29	3.16	11.62	4.89	0.495	0.505
	春季 ( $n=34$ )	0.29—6.77 1.85±1.31	0.07—0.68 0.25±0.13	0.24—12.03 2.14±2.18	1.13—21.85 9.28±5.45	1.96—12.99 3.99±2.52	0.07—0.86 0.51±0.21	0.14—0.93 0.49±0.21
	夏季 ( $n=18$ )	0.25—4.32 1.23±1.23	0.09—0.55 0.24±0.10	0.34—6.17 2.54±1.71	0.66—21.12 10.59±5.86	0.67—9.41 3.76±2.66	0.05—0.50 0.33±0.13	0.50—0.95 0.67±0.13
秋季 ( $n=12$ )	0.24—1.91 0.76±0.51	0.17—0.54 0.33±0.11	0.02—2.22 0.54±0.65	4.36—15.65 8.13±2.96	0.36—3.27 1.30±0.86	0.32—0.97 0.65±0.24	0.03—0.68 0.35±0.24	
冬季 ( $n=12$ )	0.25—4.49 1.70±1.36	0.13—0.65 0.39±0.16	1.46—9.18 5.79±2.57	13.70—20.94 16.87±2.12	3.15—12.19 7.49±2.62	0.03—0.54 0.25±0.19	0.46—0.97 0.75±0.19	
年平均	1.38	0.30	2.75	11.22	4.13	0.435	0.565	

注:  $n$  表示各季节样品数

1.24—9.72 $\mu\text{mol/L}$ 、1.30—7.49 $\mu\text{mol/L}$ , 均表现为冬季最高、秋季最低, 春夏季节差别不大。分析其原因, 一方面夏季和秋季生物量较高(如图 2), 消耗了水体中部分的营养物质; 另外, 香港属亚热带海洋季风气候, 全年平均降水量的 80%集中在 5—9 月份的夏季, 秋季和其他季节降雨量相对较少, 由此而带来的陆源营养物质输入也会相对降低; 而且冬季主要受东北季风的影响, 近岸海域受大洋高营养盐输入和沿岸流的影响较强(Huang *et al*, 2003; 林旭吟等, 2008)。上述因素综合导致秋季的营养盐含量较低; 而冬季相反, 较低的生物量使来自陆源和大洋的营养盐得以积累; 夏季虽然生物量最高, 会消耗大量的营养盐, 但夏季的陆源补充相对较快、大洋及沿岸流的贡献相对较高, 所以 DIN 含量并不是最低。

分析营养盐的组成结构发现, 表层水体中氨盐( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )占 DIN 比例在春夏秋冬四个季节依次为 58%、44%、65%和 31%; 底层水体中依次为 51%、33%、65%和 25%。表层和底层水体均表现为秋季氨盐所占 DIN 比例最高, 表明该季节水体中无机氮处于热力学不平衡状态, 与秋季生物量出现高值吻合。表层水体中硝酸盐(包括亚硝酸盐)占 DIN 比例在

四个季节分别为 42%、56%、35%和 69%; 底层水体中依次为 49%、67%、35%和 75%。由此可见, 表层水体中春夏季氨盐和硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占的比例基本相当, 秋季氨盐所占比例高, 冬季反之; 底层水体中春季氨盐和硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占的比例基本相当, 秋季氨盐所占比例高, 而夏冬季硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中占的比例大于氨盐, 成为 DIN 的主要贡献者。

冬季表层和底层水体中硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占比例均较高, 该季节生物量较低, 无机氮营养盐循环受生物影响较小, 多以稳定的氧化态(硝酸盐)形态存在。另外, 夏季表层和底层水体中硝酸盐(包括亚硝酸盐)比例也较高, 分别为 56%和 67%, 分析其原因, 可能是该海域夏季受西南季风的影响, 南海沿岸环流呈东北流向, 富含营养物质(特别是硝酸盐)的陆源输入与南海高盐水的入侵方向一致, 使得该海域硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占比例较高。

不同季节表层水体中磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )浓度范围为 0.14—0.46 $\mu\text{mol/L}$ , 夏季的平均浓度最低, 为 0.14 $\mu\text{mol/L}$ , 个别站位甚至未检出。夏季表层水体中

生物量较高, 可达到  $5.60\mu\text{g/L}$ (图 2), 消耗了水体中大量的溶解态磷酸盐, 导致水体中磷酸盐浓度很低。底层磷酸盐浓度不同季节变化不大, 但夏季稍低于其他季节。不同季节表层和底层水体中硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ )的变化趋势基本相似, 平均浓度在  $7.80\text{—}18.47\mu\text{mol/L}$  和  $8.13\text{—}16.87\mu\text{mol/L}$  范围, 冬季平均值最高, 而其它季节差别不大。

## 2.2 不同季节叶绿素 $a$ 的变化情况

图 2 为调查海域各采样站位表层和底层水体叶绿素  $a$  随季节变化情况。表层水体春夏秋冬四个季节叶绿素  $a$  平均含量分别为  $2.66\mu\text{g/L}$ 、 $5.60\mu\text{g/L}$ 、 $3.14\mu\text{g/L}$  和  $1.77\mu\text{g/L}$ 。表层叶绿素  $a$  的高峰值出现在夏季(8月份), 秋季(10月份)次之, 冬季叶绿素  $a$  含量较低。底层水体春夏秋冬四个季节叶绿素  $a$  平均含量依次为  $1.84\mu\text{g/L}$ 、 $2.33\mu\text{g/L}$ 、 $3.05\mu\text{g/L}$  和  $1.42\mu\text{g/L}$ , 生物量高峰出现在秋季, 夏季次之, 也是冬季最低。除秋季外, 其它季节底层水体中叶绿素  $a$  含量相对低于表层水体中的含量。

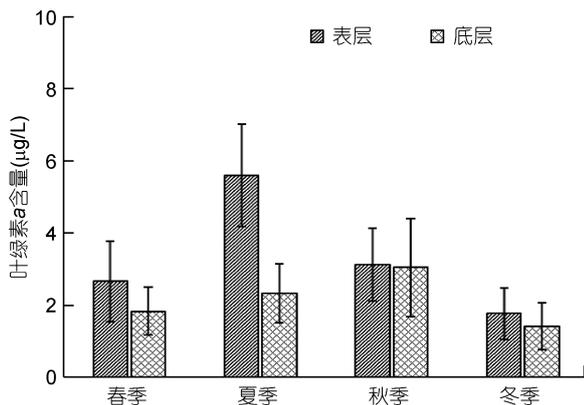


图 2 不同季节表层和底层水体中叶绿素  $a$  的变化情况  
Fig.2 Chl  $a$  distribution of surface and bottom water in different seasons

本文所研究海域属亚热带海洋季风气候, 在浮游植物生物量的季节变化上有其鲜明的地域特点。香港近海水域夏季受西南季风的影响, 海流表层的离岸分量较大, 有利于外海底层高盐水向河口入侵, 加之东北沿岸流和春夏交接季节雨水较充沛, 陆源径流输入部分营养盐, 为夏季浮游植物的生长繁殖储备了一定的营养基础, 使得夏季生物量高于其它季节。与同为半封闭海湾的胶州湾相比, 因地处北温带大陆性气候, 后者表层水体叶绿素  $a$  的年平均含量为  $2.09\text{—}5.70\mu\text{g/L}$ , 冬、夏季平均含量分别为  $(4.72\pm 3.15)\mu\text{g/L}$ 、 $(4.33\pm 2.57)\mu\text{g/L}$ , 差异不明显(吴玉霖等, 2004),

营养盐丰富的养殖区叶绿素  $a$  为  $6.34\mu\text{g/L}$ (宋秀贤等, 2007)。与之比较, 本文研究海域表层水体冬季叶绿素  $a$  含量最低, 夏季水体中生物量低于胶州湾养殖区的含量, 但高于胶州湾全湾的平均值。

## 2.3 营养盐的组成结构及对浮游植物生长的可能制约作用

海水中氮磷等营养元素的含量是维持生物量的物质基础, 而营养盐的结构对浮游植物生长和生态系统群落组成同样具有重要的影响作用(沈志良, 2002), 不同海域构成浮游植物生长的限制因素存在很大差异。较早提出化学计量的营养盐限制标准是针对海洋硅藻的营养需求而制定的(Redfield *et al.*, 1963), 认为硅藻正常生长对各种营养盐需求的原子比为  $\text{N:Si:P}=16:16:1$ , 后来通过各种藻类对营养盐的吸收动力学研究, 又有研究者提出了浮游植物生长所需要的溶解态营养盐原子比和最低阈值。Justić (1995) 和 Dortch 等(1989, 1992)在总结前人研究的基础上, 建立了系统评估某一种营养盐的化学计量限制标准。张均顺等(1997) 根据上述计量标准研究了胶州湾营养盐的结构变化及其不同营养元素成为浮游植物生长限制性因子的可能性。张静等(2010)对深圳湾 2008 年的营养盐时空分布进行了调查研究, 并分析了不同季节的营养盐限制状态, 结果显示受珠江口水系的影响春季整个深圳湾海域基本处于富营养状态, 冬季处于氮限制状态, 夏季从湾内到湾口由氮限制逐渐过渡到磷限制状态, 秋季整个海域处于轻微的磷限制状态。

本文根据 Justić(1995)建立的浮游植物生长的化学计量和可能营养盐限制因素标准, 分析研究了该海域表层和底层水体的营养盐结构, 以及对浮游植物生长的可能限制因子(见表 2)。

由表 2 的统计结果可知, 该水域表层水体中春季浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子出现几率最高的为溶解无机磷酸盐(41.2%), 总溶解无机氮次之, 为 35.3%, 溶解无机硅酸盐限制的几率最低为 11.8%; 当考虑各种营养盐最低阈值时, 受磷酸盐、DIN 和硅酸盐限制的几率分别为 26.5%、11.8% 和 5.9%。夏季浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子出现的几率与春季相似, 也是溶解无机磷酸盐出现的几率最高, 为 50.0%, 总溶解无机氮(22.2%)与溶解无机硅酸盐(27.8%)接近; 当考虑各种营养盐最低阈值时, 受磷酸盐、DIN 和硅酸盐限制的几率均有所降低, 分别为 38.9%、16.7%和 27.8%。秋

表 2 表层和底层水体不同季节各种营养盐作为单一限制因子出现的几率(%)

Tab.2 The relative frequency (%) of nitrogen, phosphorus and silicon limitation in surface and bottom water of Hong Kong coastal area (Porter Shelter)

营养盐限制因子	限制因子出现几率(%)							
	春季(n=34)		夏季(n=18)		秋季(n=12)		冬季(n=12)	
	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层
N 为限制因子								
DIN: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/DIN}>1$	35.3	35.3	22.2	44.4	83.3	91.6	8.3	8.3
DIN<1 $\mu\text{mol/L}$ , DIN: $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/DIN}>1$	11.8	5.9	16.7	11.1	58.3	50.0	0.0	0.0
P 为限制因子								
DIN/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}>22$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/PO}_4^{3-}\text{-P}>22$	41.2	32.3	50.0	44.4	0.0	0.0	50.0	41.2
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}<0.1\mu\text{mol/L}$ , DIN/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}>22$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/PO}_4^{3-}\text{-P}>22$	26.5	5.9	38.9	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Si 为限制因子								
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/DIN}<1$	11.8	5.9	27.8	11.1	8.3	0.0	0.0	0.0
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}<2\mu\text{mol/L}$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/PO}_4^{3-}\text{-P}<10$ , $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si/DIN}<1$	5.9	0.0	27.8	5.6	8.3	0.0	0.0	0.0

注: n 的含义同表 1

季浮游植物生长受控于单一营养盐限制的几率以总溶解无机氮最高, 为 83.3%, 考虑各种营养盐最低阈值时, DIN 限制的几率仍高达 58.3%; 无论是单一营养盐限制还是考虑营养盐最低阈值, 溶解无机硅酸盐限制的几率均为 8.3%; 秋季该海域溶解无机磷酸盐不是限制因子。冬季浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子出现的几率以溶解无机磷酸盐最高, 为 50.0%; 当考虑各种营养盐最低阈值时, 各种营养盐含量都较高对浮游植物的生长均不会形成限制因素(表 2)。底层水体各季节与表层水体呈现出类似的趋势, 但因底层生物量相对较低, 所以各种营养盐对生物生长形成限制的可能性较低(表 2)。

进一步分析发现, 该海域春、夏季节水体氮、磷作为单一限制因子的几率基本大于 30%(夏季表层水体 DIN 限制几率低于底层), 即使考虑最低阈值, 氮、磷限制的可能性也都大于 10%, 特别是夏季磷酸盐超过 30%, 所以, 可以推断春季该水域有氮—磷共同限制的可能性; 除了以上特点外, 夏季硅酸盐作为限制因子出现的几率也为 27.8%, 所以夏季各种营养盐都有限制的可能, 这与夏季水体生物量较高浮游植物快速增殖消耗了大量营养盐有关。无论是作为单一限制因子还是考虑最低阈值, 该海域秋季都表现为显著的氮限制, 磷酸盐不成为限制因子, 硅酸盐作为单一限制因子的几率也低于 10%。冬季磷酸盐浓度相对氮、硅的含量较低, 成为单一限制因子的几率较大, 但各种营养盐相对浮游植物生长的最低阈值都比较丰富, 所以冬季水体营养盐对浮游植物的生长基本不存在制约因素。

综合考察四个季节营养盐的结构变化, 除夏季外, 其它季节该水域浮游植物生长受溶解无机硅限制的可能性较少, 而受限于溶解态无机氮的几率最大。

### 3 结语

3.1 香港近岸海域营养盐季节分布表明, DIN 和硅酸盐无论在表层还是底层水体中的含量都表现为冬季最高、秋季最低; 表层水体中的磷酸盐含量也是冬季最高, 但最低值出现在夏季, 底层水体中磷酸盐含量除了冬季较高外, 其它三个季节差别不大。

3.2 该海域组成 DIN 的各种形态无机氮中, 表层水体春、夏季氨盐和硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占的比例基本相当, 秋季氨盐所占比例高, 冬季反之; 底层水体中春季氨盐和硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中所占的比例基本相当, 秋季氨盐所占比例高, 而夏冬季硝酸盐(包括亚硝酸盐)在 DIN 中占的比例大于氨盐, 成为 DIN 的主要贡献者。

3.3 香港近岸表层水体中叶绿素 a 含量夏季最高、冬季最低, 底层水体中叶绿素 a 含量秋季最高、冬季最低。对浮游植物生长的营养盐限制因素分析表明, 该海域表层水体春季浮游植物生长存在氮磷共同限制的可能性; 而夏季各种营养盐限制作用相当; 秋季则表现为明显的氮限制; 考虑营养盐最低阈值冬季营养盐对浮游植物生长基本不存在限制。综合考虑, 该海域各季节受氮限制的几率较高, 硅酸盐作为限制因素的可能性相对较小。

致谢 感谢在香港科技大学工作期间孙军、阚金军

及香港科技大学生物系的 Sam Cheung 和 Mandy Tsoi 等多名研究生在现场样品采集过程中的大力支持, 感谢柯志源在营养盐分析过程中的大力协助。

### 参 考 文 献

- 吴玉霖, 孙松, 张永山等, 2004. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 35(6): 518—523
- 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
- 宋秀贤, 俞志明, 2007. 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. 海洋与湖沼, 38(5): 446—452
- 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 - 535
- 张静, 张瑜斌, 周凯等, 2010. 深圳湾海域营养盐的时空分布及潜在性富营养化程度评价. 生态环境学报, 19(2): 253—261
- 林旭吟, 邢小丽, 何建宗, 高亚辉, 2008. 香港海域 2004 年浮游植物群落结构特征. 海洋通报, 27(5): 23—29
- Chau Y K, Abesser R, 1958. A preliminary study of the hydrology of Hong Kong territorial waters. Hong Kong University Fish Journal, 2: 37—42
- Chau Y K, Wong C S, 1960. Oceanographic investigations in the northern region of the South China Sea off Hong Kong. Hong Kong University Fish Journal, 3: 1—25
- Dortch Q, Packard T T, 1989. Differences in biomass structure between oligotrophic and eutrophic marine ecosystems. Deep-Sea Research, 36(2A): 223—240
- Dortch Q, Whitley T E, 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? Continental Shelf Research, 12: 1293—1309
- Hager S W, Atlas E L, Gordon L I *et al*, 1972. A Comparison at sea of manual and autoanalyzer analyses of phosphate, nitrate and silicate. Limnology and Oceanography, 17(6): 931—937
- Horner R A, Garrison D L, Plumley F G, 1997. Harmful algal blooms and red tide problems on the U.S. west coast. Limnology and Oceanography, 42(5): 1076—1088
- Huang X P, Huang L M, Yue W Z, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. Marine Pollution Bulletin, 47: 30—36
- Justić 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
- Morton B, Wu S S, 1975. The hydrology of the coastal waters of Hong Kong. Environ Research, 10: 319—347
- 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
- Paerl H W, 1997. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and ground-water as "new" nitrogen and other nutrient sources. Limnology and Oceanography, 42(5): 1154—1165
- Parsons T R, Maita Y, Lalli C M, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, Oxford, UK: 1—173
- Redfield A C, Ketchum B H, Richards F, 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. In: Hill M N ed. The Sea. Vol. 2. John Wiley, New York: 26—77
- Slawyk G, MacIsaac J J, 1972. Comparison of two automated ammonium methods in a region of coastal upwelling. Deep-Sea Research, 19: 521—524
- 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
- Watts J C D, 1971a. The hydrology of the continental shelf area south of Hong Kong, I. Oceanographic observation for the year 1969. Hong Kong Fish Bulletin, 2: 51—57
- Watts J C D, 1971b. A general review of the oceanography of the northern sector of the South China Sea. Hong Kong Fish Bulletin, 2: 41—50
- Wood E D, Armstrong F A J, Richards F A, 1967. Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 47: 23—31
- Yin K D, Harrison P J, Chen J *et al*, 1999. Red tides during 1998 in Hong Kong: is El Niño responsible? Marine Ecology Progress Series, 187: 289—294
- Yin K D, Harrison P J, 2000. Influences of flood and ebb tides on nutrient fluxes and chlorophyll on an intertidal flat. Marine Ecology Progress Series, 196: 75—85

## TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF NUTRIENTS AND CHL *a* IN THE COASTAL AREA OF HONG KONG

SONG Xiu-Xian<sup>1,2</sup>, YU Zhi-Ming<sup>1</sup>, YIN Ke-Dong<sup>2</sup>, QIAN Pei-Yuan<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, China Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *Biology Department, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong SAR*)

**Abstract** Regular cruise from March 2000 to May 2001 was conducted monthly (or twice in one month) to investigate the nutrients and chl *a* in the coastal area of Hong Kong (Porter Shelter, HK). Both of the surface and bottom water were selected to determine the nutrient concentrations and chl *a* distribution in different seasons. The results show that the annual average concentration of total dissolved inorganic nitrogen (DIN including  $\text{NO}_3^-$ -N+ $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N) were 1.24—9.72  $\mu\text{mol/L}$  and 1.30—7.49  $\mu\text{mol/L}$  in surface and bottom water, respectively. The highest value of DIN was in winter and the lowest was in autumn during the investigation period.  $\text{PO}_4^{3-}$ -P concentration in surface water changed from 0.14 to 0.46  $\mu\text{mol/L}$  in different seasons (minimum in summer). The bottom  $\text{PO}_4^{3-}$ -P concentration was more steadily than in the surface water. However, it still showed a decrease tendency in summer days. As for  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si, the average concentrations changed in same characteristics in both the surface and bottom waters in range of 7.80—18.47 and 8.13—16.87  $\mu\text{mol/L}$ , respectively. The highest  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si concentration was in winter, and in other season there was no obvious difference. The results of chl *a* in different seasons revealed that in surface water the highest biomass was in summer (August) and the second peak value was in spring. Chl *a* concentration in bottom water was the highest in autumn and summer was following.

Further analysis of the nutrients limitation for phytoplankton growth showed that in surface water there was a possibility of N and P cooperation limiting in spring. Similarly, it showed P-limitation in summer and N-limitation in autumn obviously. However, in bottom water it revealed that there was a trend of N and P cooperative limitation during spring and summer. And it also showed N-limitation in autumn obviously. Although  $\text{PO}_4^{3-}$ -P concentration was lower than those of nitrogen and silicate concentrations in winter, all nutrient concentrations were higher than the minimal value of phytoplankton requirement. This means there was no limiting nutrient in winter to restrict the growth of organism in both the surface and bottom waters. In addition, there was less opportunity for Si-limitation in surface and bottom water during the year except the surface water in summer.

**Key words** coastal area of Hong Kong; nutrients; chl *a*; limiting factors