

学校编码：10384

分类号_____密级_____

学号：200234020

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

南海北部营养盐结构特征

Distribution and Characteristics of Nutrients
in the Northern South China Sea

袁 梁 英

指导教师姓名：戴民汉教授

专业名称：环境科学

论文提交日期：2005年10月

论文答辩日期：2005年11月

学位授予日期：2005年 月

答辩委员会主席：张海生 研究员

评 阅 人：林洪瑛 研究员

陈建芳 研究员

2005年10月

附件 3：

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

Table of Contents.....	III
图、表目录.....	V
摘要.....	VII
ABSTRACT.....	IX
第一章 绪论.....	1
1.1 不同海域营养盐的结构与特征.....	3
1.1.1 河口和近岸海域的营养盐结构与特征.....	3
1.1.2 开阔海域和大洋的营养结构与特征.....	5
1.2 南海营养盐研究概况.....	10
1.2.1 南海营养盐的研究历史与现状.....	11
1.2.2 目前南海营养盐调查存在的问题与争议.....	12
1.3 本文研究目标.....	13
1.4 论文框架.....	13
第二章 研究区域与方法.....	14
2.1 研究区域概况.....	14
2.1.1 南海北部海域气候与表层流.....	15
2.1.2 南海北部的水团.....	16
2.1.3 南海的中尺度海洋现象.....	17
2.2 样品的采集及分析方法.....	20
2.2.1 采样站位.....	20
2.2.2 分析方法.....	22
2.2.3 固氮作用的测定.....	25
2.2.4 营养盐加富培养实验.....	29
第三章 镁共沉淀法(MAGIC)测定低浓度磷酸盐.....	31
3.1 材料与方法.....	33
3.2 结果与讨论.....	34
3.3 南海北部低浓度磷酸盐的分布.....	37
3.3.1 南海北部表层磷酸盐的水平分布.....	37
3.3.2 南海北部低浓度磷酸盐的垂直分布.....	40
第四章 营养盐与水文及生物活动的耦合.....	43
4.1 南海北部营养盐分布概况.....	44
4.1.1 南海北部营养盐浓度水平.....	44

4.1.2 南海北部表层营养盐水平分布状况.....	45
4.1.3 南海北部营养盐垂直分布状况.....	45
4.2 2004 年冬季营养盐与水文要素的关系.....	49
4.2.1 冬季航次的 A 断面.....	49
4.2.2 冬季航次之 B 断面.....	51
4.2.3 冬季航次之 C 断面.....	53
4.2.4 冬季航次之 D 断面.....	53
4.2.5 2004 年冬季水文条件对营养盐的影响小结.....	56
4.3 2004 年夏季营养盐与水文要素的关系.....	56
4.3.1 夏季航次之 A 断面.....	56
4.3.2 夏季航次之 C 断面.....	57
4.3.3 夏季航次之 D 断面.....	57
4.3.4 2004 年夏季水文条件对营养盐的影响小结.....	57
4.4 南海北部营养盐与生物活动的关系.....	60
4.4.1 叶绿素 a 的分布.....	60
4.4.2 表层浮游植物类群组成的分布.....	62
第五章 南海北部的营养盐限制.....	65
5.1 南海北部营养盐之间的比例.....	66
5.2 营养盐加富培养实验结果.....	68
5.2.1 近岸(河口)培养实验结果.....	68
5.2.2 远岸(陆架和陆坡)培养实验结果.....	71
5.3 南海北部的固氮作用.....	79
5.3.1 固氮生物(束毛藻)的丰度.....	79
5.3.2 氮异常.....	79
第六章 结论.....	82
参考文献.....	84
附录 攻读硕士学位期间参加的研究课题、科研活动和发表的论文.....	96
致谢.....	97

Table of Contents

Abstract.....	IX
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Nutrient structure and its characteristics.....	3
1.1.1 Nutrient distribution and limitation in the estuarine and coastal area.....	3
1.1.2 Nutrient structure and its characteristics in the open ocean.....	5
1.2 Review of the nutrient researches in the South China Sea.....	10
1.2.1 Progress of nutrient study in the South China Sea.....	11
1.2.2 Problems.....	12
1.3 Goals of this research.....	13
1.4 Structure of this thesis.....	13
Chapter 2 Study area and methods.....	14
2.1 Introduction to the study area.....	14
2.1.1 Climate and surface currents in the northern SCS.....	15
2.1.2 Water masses in the northern South China Sea.....	16
2.1.3 Mesoscale processes in the SCS.....	17
2.2 Sampling and analysis methods.....	20
2.2.1 Sampling.....	20
2.2.2 Analytical methods.....	22
2.2.3 Measurement of nitrogen fixation.....	25
2.2.4 On-deck enrichment experiments.....	29
Chapter 3 Low-level phosphate measured by MAGIC.....	31
3.1 Material and method.....	33
3.2 Result and discussion.....	34
3.3 Distribution of low-level phosphate in northern SCS.....	37
3.3.1 Surface distribution of phosphate in northern SCS.....	37
3.3.2 Vertical distribution of upper water column in northern SCS.....	40
Chapter 4 Coupling of nutrient with hydrography and phytoplankton activities.....	43
4.1 Nutrient distribution in the northern SCS.....	44
4.1.1 Nutrient levels.....	44
4.1.2 Status of surface nutrient distribution.....	45
4.1.3 Status of nutrient vertical distribution	45
4.2 Relationship between nutrient and hydrography in the winter of 2004.....	49
4.2.1 Transect A.....	49
4.2.2 Transect B.....	51
4.2.3 Transect C.....	53
4.2.4 Transect D.....	53

4.2.5 Summary on nutrients.....	56
4.3 Relationship between nutrients and hydrography in the summer 2004.....	56
4.3.1 Transect A.....	56
4.3.2 Transect C	57
4.3.3 Transect D	57
4.3.4 Summary on nutrients.....	57
4.4 Relationship between nutrients and phytoplankton activities in the northern SCS.....	60
4.4.1 Distribution of chlorophyll a.....	60
4.4.2 Distribution of phytoplanktonic community structure in the surface water.....	62
Chapter 5 Nutrient limitation in the northern SCS.....	65
5.1 Nutrient ratios in the northern SCS.....	66
5.2 Results of on-deck enrichment experiments.....	68
5.2.1 On-deck enrichment experiments in the coastal region.....	68
5.2.2 On-deck enrichment experiments in the offshore region.....	71
5.3 Nitrogen-fixation in the northern SCS.....	79
5.3.1 Abundance of nitrogen-fixer (<i>Trichodesmium</i> spp.)	79
5.3.2 Nitrogen anomaly.....	80
Chapter 6 Conclusions.....	82
References.....	84
Appendix Projects and activities involved.....	96
Acknowledgement.....	97

图、表目录

图 1	南海区域	14
图 2	涡旋上升流机制示意图	18
图 3	南海北部站位布设图	21
图 4	南海北部 100 m 以浅束毛藻的垂直季节变化	28
图 5	培养实验装置示意图	30
图 6	2004 年 2 月南海北部表层磷酸盐水平分布	38
图 7	2004 年 2 月航次南海北部表层盐度和温度的水平分布	38
图 8	2004 年 7 月南海北部表层磷酸盐水平分布	39
图 9	2004 年 2 月航次南海北部表层盐度和温度的水平分布	39
图 10	南海北部冬、夏季上层磷酸盐垂直分布	40
图 11	A1 站不同季节的磷酸盐垂直剖面	41
图 12	冬季 A4 站用常规方法与 MAGIC 法分别测定的磷酸盐结果比较	41
图 13	2004 年 2 月南海北部表层温盐、营养盐和叶绿素的水平分布	46
图 14	2004 年 7 月南海北部表层营养盐、温盐和叶绿素的水平分布	47
图 15	若干典型站位的温、盐和营养盐垂直分布	48
图 16	2004 年 2 月航次 A 断面理化参数的断面分布	50
图 17	2004 年 2 月南海北部同时出现的两个反气旋涡	51
图 18	2004 年 2 月航次 B 断面理化参数的断面分布	52
图 19	2004 年 2 月航次 C 断面理化参数的垂直分布	54
图 20	2004 年 2 月航次 D 断面理化参数的垂直分布	55
图 21	2004 年 7 月航次 A 断面理化参数的垂直分布	58
图 22	2004 年 7 月航次 C 断面理化参数的垂直分布	59
图 23	2004 年 7 月航次 D 断面理化参数的垂直分布	60
图 24	2004 年 2 月南海北部叶绿素 a 的断面分布	61
图 25	2004 年 7 月南海北部叶绿素 a 的断面分布	62
图 26	南海北部 A 断面表层浮游植物类群组成	63
图 27	2004 年 2 月南海北部各营养盐之间的比例	66
图 28	2004 年 7 月南海北部各营养盐之间的比例	67

图 29	2002 年 11 月 7 号站现场加富培养实验之叶绿素 a 变化	68
图 30	2004 年 2 月 A9 站现场加富培养实验之叶绿素 a 变化	69
图 31	2004 年 2 月 A9 站现场加富培养实验之营养盐变化	70
图 32	2004 年 2 月航次 A4 站现场加富培养实验的叶绿素变化	72
图 33	2004 年 2 月航次 A4 站现场加富培养实验之营养盐变化	73
图 34	2004 年 7 月 A1 站加富培养实验的叶绿素 a 变化	74
图 35	2004 年 7 月 A1 站加富培养实验之营养盐变化	75
图 36	2004 年 7 月 D1 站加富培养实验之叶绿素 a 变化	76
图 37	2004 年 7 月 D1 站加富培养实验之营养盐变化	77
图 38	其他研究中南海现场加富培养实验的叶绿素	78
图 39	显微镜下观察到的 2004 年 7 月 D1 站的束毛藻	79
图 40	2004 年 2 月和 7 月航次南海北部氮异常的垂直分布	80
表 1	营养盐现场测定的精密度	23
表 2	营养盐国际比对实验结果	23
表 3	显色剂用量对 MAGIC 法空白的影响	34
表 4	离心条件对 MAGIC 法最终结果的影响	35
表 5	MAGIC 法的精密度实验	36
表 6	南海北部表层营养盐浓度与世界其它海域的比较	44
表 7	114°E, 20°N 附近水域多年不同季节的营养盐	71

摘 要

南海是世界最大的边缘海之一，纵跨热带、亚热带，是一个典型的寡营养海区。本研究调查了南海北部冬(2004年2月)、夏(2004年7月)两季整个水体的营养盐(硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐)及其它相关参数，旨在研究南海北部营养盐浓度水平、各种营养盐之间的比例及其季节和区域变化，探讨南海北部营养盐结构的影响因子以及南海北部的营养盐限制状况并分析产生该限制的可能原因。

南海北部营养盐的典型特征是上层(小于75 m)营养盐极端的贫乏，其含量往往低至常规分光光度法的检测限；下层营养盐含量无明显季节变化。本研究采用目前国际上广泛应用的镁共沉淀法(MAGIC)测定了表层低浓度的磷酸盐，首次在国内测定了南海北部的低浓度磷酸盐。南海北部冬季表层磷酸盐平均浓度为34.6 nmol/L，受珠江径流的显著影响；夏季平均浓度为17.6 nmol/L，整个海区的浓度差异不大。

南海北部营养盐分布受水文状况特别是中尺度海洋过程影响显著。2004年冬季，南海北部存在两个反气旋型涡旋，它们对营养盐分布的影响显著。在反气旋型涡的中心，营养盐浓度水平很低，营养盐浓度等深线明显下移，表明表层寡营养的海水向下迁移；而在反气旋型涡的边缘，由于反气旋型涡与陆架边缘的摩擦，在涡旋附近的海域出现了下层低温高盐海水不同程度的涌升，将下层高浓度的营养盐带入真光层，为浮游植物的光合作用提供了丰富的物质基础。而在两个反气旋型涡中间的海域，则没有受到涡旋的明显影响。2004年夏季，南海北部盛行西南季风，营养盐分布主要受沿岸上升流和陆架坡折处下层冷水涌升影响，在我们调查的所有断面都有沿岸上升流和陆架坡折处下层冷水涌升的存在，上升流的强度在不同断面存在一定差异。

营养盐的分布显然影响了南海北部浮游植物的生产活动。营养盐浓度与叶绿素a浓度呈正相关关系，并影响了浮游植物类群分布。

南海北部真光层各种营养盐通常都低于浮游植物生长的阈值，且各营养盐之间的比例显示，南海北部主要为氮磷共同限制。营养盐现场加富培养实验的结果也表明氮磷共同限制是整个南海北部不同季节的共同特征。近岸海区受珠江径流影响，秋、冬季表现出氮限制的倾向；春、夏季可能是磷限制比较重要。远岸海

区冬季主要是氮限制较明显，夏季则有磷限制的微弱信号出现。出现这种季节转变的原因可能与束毛藻的丰度及其占浮游植物类群组成的比例有关。目前研究人员认为营养盐限制的关键在于固氮作用的强弱。束毛藻是全球海洋非常重要的固氮蓝藻，但现场测得的束毛藻丰度远远低于预期值，并且存在巨大的时空差异。南海北部氮异常的数值为正，说明冬夏季都有固氮作用的存在；2004 年南海北部的固氮作用与大气铁输入的季节变化不一致。

关键词：营养盐；南海北部；限制因子

Abstract

Located in the tropical-subtropical region, the South China Sea (SCS) is one of the largest marginal seas in the west Pacific. In this thesis, we investigated the distribution of macro-nutrients (nitrate, phosphate and silicate) and other related parameters in the northern SCS in February and July 2004 in order to examine the biogeochemical processes that influence the nutrient structure and nutrient limitation.

Oligotrophy is a significant characteristic in upper water column of the northern SCS. Using the MAGIC (MAGnesium Induced Co-precipitation) technique, we measured low-level phosphate concentrations in the upper mixed layer. In winter, the average surface phosphate concentration is 34.6 nmol/L, while this value in summer is 17.6 nmol/L. This higher phosphate concentration in winter than in summer is overall in agreement with the primary production level in the region.

We observed close coupling of nutrient distribution and the hydrography in the northern SCS. Among others, mesoscale processes appear to play a significant role in determining the distribution and supplies of nutrients in the upper ocean. In Feb 2004, there exist two anti-cyclonic eddies near the shelf break of northern SCS. At the center of the anti-cyclonic eddy, the level of nutrients was very low, and surface oligotrophic water appeared to be downwelled. At the edge of the eddy, cool and nutrient-enriched water upwelled intensively in winter, bringing nutrients into the euphotic zone, which may support photosynthesis processes. In between the two eddies, the effect of the eddies seems to be minimal. During the summer time, southwest monsoon prevails the whole SCS, and coastal upwelling and near shelf break upwellings were the most important mesoscale processes which can also be seen from the nutrient distributions.

At the same time, we observed clear evidence pointing to the relationship between the nutrient distribution and the phytoplankton productivities in the northern SCS. High nutrient concentrations apparently have a direct linkage with high concentrations of chlorophyll. Moreover, phytoplanktonic community structure is also affected by the nutrient distribution and its structure.

According to nutrient concentrations, their molar ratios and on-deck incubation experiments, we contend that nitrogen and phosphorus generally co-limited the primary production in northern SCS. In the nearshore region, winter should be nitrogen-limitation dominant, while phosphorus-limitation appears more important in summer. N-limitation in winter and P-limitation in summer are possible in offshore water. This shifting of nutrient limitation scenarios may be affected the phytoplanktonic community structure and by the abundance of *trichodesmium* which is the most important N₂-fixer in the ocean. Although we observed *trichodesmium spp.* in the northern SCS, its abundance was much lower than we expected to sustain significant N₂ fixation. The positive N anomaly value suggests N₂-fixation is existent in both seasons. However, there is no evidence that N₂-fixation has a significant relevance to the iron input from the atmospheric deposition in this particular region.

Keywords: Nutrient, northern SCS, limitation

第一章 绪论

海水中存在的常量营养盐通常包括硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$, 常用 SRP 表示, Soluble Reactive Phosphorus 溶解活性磷, 指能形成磷钼蓝的那部分磷酸盐)、硅酸盐($\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$)等。有时也把某些微量元素(如铁、锌等)、维生素和生长激素等植物生产所不可缺少的成分叫做微量营养盐(陈镇东, 2000)。本论文提到营养盐主要指前者。营养盐结构指的是宏观上不同营养盐之间的组成比例, 即水体中氮、磷、硅的相对量。

营养盐是浮游生物生命活动的物质基础, 在浮游植物的光合作用过程中, 这些营养元素为海洋浮游植物所摄取, 构成浮游植物的组成部分, 并成为其物质和能量代谢的来源。大量的研究表明海水中氮(N)、磷(P)、硅(Si)等营养盐的水平及其供应比例极大地影响着浮游植物的初级生产水平以及生态系统结构特别是浮游植物的群落结构(Redfield et al., 1958; Harris, 1986; Tilman et al., 1982; Lagus et al., 2004)。因此营养盐的分布和循环机制对了解海洋生态系统初级生产过程至关重要的(林洪瑛等, 2001)。营养盐循环还对海洋生物泵的控制起着重要作用, 而生物泵能吸收大气二氧化碳并将其转移到深海, 因此, 营养盐循环与海洋碳循环紧密相关, 营养盐循环的不平衡也影响着其他元素(如碳, C)的生物地球化学循环。因此, 研究海洋中的营养盐结构、探讨浮游植物初级生产过程中的营养盐限制因子就成为本论文研究的主要目的。

进入“人类纪”后, 营养盐的研究更是受到特别的关注, 因为营养盐与人类活动的关系特别紧密, 特别是工业革命以来, 人类社会、经济活动向环境输入了大量的营养盐。例如, 受人类活动影响, 由河流输入海洋的氮和磷显著增加, 工业革命以来, 在全球尺度上增加了 2 到 3 倍(Howarth et al., 1995), 许多地区的营养盐增加远远大于这个增加幅度, 特别是在北欧和北美(Howarth et al., 1996), 近年来, 中国各大河口的营养盐浓度已经接近欧洲和北美那些污染和营养化的河流(刘昌岭等, 1998), 这对近岸海区营养盐结构产生了重大的影响。

营养盐结构存在时空变化, 对预测未来的海洋生态系统至关重要。Karl et al. (2001)通过十年数据推测, 夏威夷海域已经从过去的氮限制开始向磷限制转变;

这种营养盐结构的变化还可能在短时间尺度上(如年际尺度上)发生,例如在一次 El Nino 事件中,夏威夷海域内从平时的氮限制转变为短时间的磷限制(Karl et al., 1995)。这些现象在某种程度上印证了 Tyrrell (1999)的观点,他认为目前氮是主要的限制性营养盐,而在长时间尺度上,磷将最终限制初级生产力。

同时,营养盐限制的观点也在不断的发生变化。早在 1840 年, Von Liebig 就提出了最小法则(Von Liebig, 1840),他认为“植物的生长取决于处在最小量状况的食物的量”,即不论什么时候都只有一种营养盐会限制植物生长,这曾经是海洋学家描述浮游植物生态及其对营养盐循环的影响的主要理论依据。但 Smayda (1974)通过天然海水加纯种藻类的营养强化实验,提出了与传统观点截然不同的看法,他认为: 1) 某种营养盐对浮游植物的生长或产量的限制作用会发生季节性变化; 2) 营养盐的限制作用的强度随季节而不同; 3) 通常是几种营养盐同时有限制作用,但限制强度各不相同; 4) 限制性营养盐的组成随季节而变化; 5) 营养盐限制的类型会发生季节性演替。近十年来,这个单一限制因子的观点更是大大受到了挑战,因为在某些海域可能存在多种来源同时限制浮游植物生长的现象(Hitchcock & Smayda, 1977; Morel et al., 1995; Sunda & Huntsman, 1997; Price & Morel, 1991; Howarth & Marino, 2005),特别是在大多数寡营养盐海域,人们已观察到多种营养盐共同限制的现象(Chen et al., 2000; Dufour & Berland, 1999)。这些寡营养盐海域的营养盐浓度很低,对全球初级生产力的贡献却很大(Bryant, 2003)。多种营养盐共同限制的证据在生物培养实验中得到了初步证实。同时添加两种或更多种不同的营养盐或单独添加不同的营养盐,浮游植物的生长都会受到刺激,这种现象就是多因子共同限制(Arrigo, 2005)。Arrigo (2005)指出,多因子共同限制又分为多种营养盐共同限制、生物化学共同限制和群落共同限制三种。当各种营养盐浓度都低到生物难以利用,同时添加不同的营养盐会刺激浮游植物的生长的状况称为多种营养盐共同限制;在单独添加不同营养盐同样刺激浮游植物生长,可分为生物地球化学共同限制和群落共同限制两种,前者是由于其中一种营养盐有利于生物对另一种营养盐的利用;后者指的是不同的营养盐限制不同的生物群落生长。另外,某一区域的营养盐限制并不一定是均一的,有可能存在空间和时间上的转变。在咸淡水交界的河口地带较易出现几种营养盐的同时或交替限制。Yin et al. (2001)发现珠江口从河端的 P 限制向外海的 N 限制变化;

Lohrenz et al. (1999)报道了密西西比河从冬春季的 P 限制转向夏秋季的 N 限制；Fisher et al. (1992)研究了切萨皮克湾的营养盐限制状况，发现了 N、P 限制的季节性转变。

综上所述，尽管海洋中营养盐的研究已经持续了近一个世纪，但目前对营养盐的认识还有很多未解之谜，因此，随着检测手段的不断进步和生物地球化学研究的不断发展，我们对营养盐结构的认识也处在不断的发展变化之中。

1.1 不同海域营养盐的结构与特征

1.1.1 河口和近岸海域的营养盐结构与特征

河口和近岸受多方面因素影响，其营养盐状况复杂。一般来说，河口和近岸的营养盐来源主要有：与离岸水的交换、河流、地下水以及大气输入。这些输送的营养盐通量受人类活动(主要为农业活动和城市污水排放)影响很大(Jickells, 1998)。其中，河流输入一直是研究人员关注的焦点。近年来，各国学者也逐渐认识到大气输入和地下水输入的重要性。河口和近岸N: P: Si比值受到人为活动的干扰，这些人为干扰有加剧的趋势(Jickells, 1998)。2000年农业使用的N和P的量分别相当于全球河流入海通量的242%和83%(Schlessinger, 1991)，并且在未来50年可能成倍增长(Tilman et al., 2001)。尽管硅酸盐浓度可能由于水文变化减少50%，但Si的分布主要受其地球化学性质、纬度和径流影响(Correll et al., 2000; Humborg et al., 2000)。因此，随着全球N、P输入的不断增长，而Si仍处在输入相对稳定甚至减少的状态，全球河流和海洋中的N: P: Si组成将会受到巨大的影响，最终影响整个水体生态系统(Turner, 2003)。

随着河流输入营养盐的不断增长，河口及近岸水体中的溶解氮和磷的浓度也随之增大。例如，Po河的SRP和总无机氮(DIN)浓度在1968到1987年间分别增加2和2.5倍(Marchetti et al, 1989)；密西西比河在过去40年间总P和DIN浓度分别增加了2到3倍，Si浓度则下降了50%(Turner & Rabalais, 1991; Dinnel & Bratbovith, 1993; Bratbovith et al, 1994; Rabalais et al, 1996)。同样的，在Rheine河，SRP和NO₃-N浓度从1950至1990年分别增加了3到6倍(Bennekom & Wetsteijin, 1990)。六十年代到九十年代，胶洲湾DIP增加1.4倍，NO₃-N增加4.3倍，NH₄-N增加4.1倍，DIN增加了3.9倍，Si(OH)₄-Si则一直维持在一个很低的浓度水平(Shen, 2001)。这些营养盐浓度的增加，导致浮游植物的生产力提高，最终导致富营养化。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库