

学校编码: 10384
学号: 22620081151542

密级 _____

廈門大學

硕士学位论文

东海与南海北部新生产力研究

New Production

in the East China Sea and Northern South China Sea

王磊

指导教师: 黄邦钦 教授

专业名称: 环境科学

论文提交日期: 2011年9月

论文答辩时间: 2011年9月

2011年9月

厦门大学学位论文原创性声明

本人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其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(国家自然科学基金重点项目“南海典型海区重要浮游植物功能群的演变及其与生物地球化学过程的耦合(No.40730846)”及973项目“中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究(No. 2009CB421200)”课题的研究成果,获得厦门大学海洋浮游植物生态课题组的经费资助,在黄邦钦教授实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
缩写词表.....	V
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 新生产力的研究历史和现状.....	1
1.1.1 初级生产力研究进展.....	1
1.1.2 海洋氮循环.....	3
1.1.3 稳定性氮同位素的基本理论.....	5
1.1.4 稳定氮同位素方法在海洋学研究中的应用.....	5
1.1.5 新生产力研究进展.....	5
1.1.6 不同粒级浮游植物新生产力贡献.....	12
1.2 本研究的目的是和意义.....	13
第 2 章 研究海域、材料和方法.....	15
2.1 研究海域概况.....	15
2.2 调查站位设置.....	18
2.3 样品采集与测定方法.....	25
2.3.1 水样采集.....	25
2.3.2 现场培养及过滤.....	26
2.3.3 样品测定.....	27
2.3.4 数据分析.....	27
第 3 章 东海新生产力研究.....	29
3.1 环境参数分布特征.....	29
3.1.1 2009 年夏季航次.....	29
3.1.2 2009/2010 年冬季航次.....	32
3.2 东海新生产力的分布特征.....	35
3.2.1 2009 年夏季新生产力的分布特征.....	35

3.2.2 2009/2010 年冬季新生产力的分布特征.....	41
3.3 讨论.....	44
3.3.1 东海积分新生产力空间分布的比较.....	44
3.3.2 东海典型海区积分新生产力不同季节分布的比较.....	52
第 4 章 南海北部新生产力研究	55
4.1 环境参数分布特征.....	55
4.1.1 2009 年夏季航次.....	55
4.1.2 2009/2010 年冬季航次.....	58
4.2 南海北部新生产力的分布特征.....	61
4.2.1 2009 年夏季新生产力的分布特征.....	61
4.2.2 2009/2010 年冬季新生产力的分布特征.....	67
4.3 讨论.....	73
4.3.1 南海北部典型海区积分新生产力空间分布的比较.....	73
4.3.2 南海北部典型海区积分新生产力不同季节分布比较.....	80
4.4 与其他研究作者的比较.....	82
第 5 章 总结与展望	83
参考文献	87
致 谢	98

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Abbreviations	V
Chapter 1 Introduction	1
1.1 History and current status of marine new production study	1
1.1.1 Reviw of marine primary production	1
1.1.2 Nitrogen cycling in marine environment	3
1.1.3 Basic theory of isotope nitrogen	5
1.1.4 Application of isotope nitrogen in oceanography	5
1.1.5 Reviw of marine new production	5
1.1.6 Size-fractionated new production	12
1.2 The objectives and significance of this thesis	13
Chapter 2 Study areas, materials and methods	15
2.1 Introduction to the study areas	15
2.2 Sampling stations	18
2.3 Sampling procedures and measurement	25
2.3.1 Sampling	25
2.3.2 Incubation	26
2.2.3 Sample determination	27
2.3.4 data analysis	27
Chapter 3 New production in the East China Sea	29
3.1 Distribution of environmental parameters	29
3.1.1 Environmental parameters in summer cruise 2009	29
3.1.2 Environmental parameters in winter cruise 2009/2010	32
3.2 Distribution of new production in East China Sea (ECS)	35
3.2.1 Distribution of new production in summer cruise 2009	35

3.2.2 Distribution of new production in winter cruise 2009/2010.....	41
3.3 Discussion.....	44
3.3.1 Spatial variations of new production in ECS.....	44
3.3.2 Seasonal variations of new production in ECS.....	52
Chapter 4 New production in the northern South China Sea.....	55
4.1 Distribution of environmental parameters.....	55
4.1.1 Environmental parameters in summer cruise 2009.....	55
4.1.2 Environmental parameters in winter cruise 2009/2010.....	58
4.2 Distribution of new production in northern South China Sea (NSCS).....	61
4.2.1 Distribution of new production in summer cruise 2009.....	61
4.2.2 Distribution of new production in winter cruise 2009/2010.....	67
4.3 Discussion.....	73
4.3.1 Spatial variations of new production in NSCS.....	73
4.3.2 Seasonal variations of new production in NSCS.....	80
4.4 Compared with others.....	82
Chapter 5 Summary and prospect.....	83
References.....	87
Acknowledgement.....	98

摘要

分别于 2009 年 7~9 月和 2009 年 12 月~2010 年 1 月,应用 ^{15}N 稳定同位素示踪法,开展了中国东海和南海北部新生产力时空分布格局及其粒级结构的研究,同时从物理过程和营养盐输送等方面探讨了不同海域新生产力的季节变化及其调控因素,取得主要结果如下:

1. 表层新生产力的空间变化特征

东海表层新生产力变化范围为 $0.053\sim 4.060\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$,夏季平均值为 $1.093\pm 1.192\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$,冬季平均值为 $0.330\pm 0.303\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 。夏、冬季表层新生产力分布呈现不同变化趋势,夏季呈现近岸高、陆架低的分布特征,冬季表现为北部低、南部高,近岸高、陆架低的分布特征。

南海北部表层新生产力变化范围为 $0.004\sim 4.741\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$,夏季平均值为 $0.236\pm 0.625\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$,冬季平均值为 $1.286\pm 1.344\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 。南海北部夏季表层新生产力的分布特征为陆架较高,陆坡与海盆区较低的分布特征;冬季分布特征为陆坡>陆架>海盆的特征。

2. 新生产力的垂直变化特征

夏季东海新生产力总体趋势呈现随着深度增加而减小。在某些测站,由于表层高温、强光照和营养盐限制,在次表层或叶绿素最大值层(DCM)层会出现新生产力的最大值;南海北部则在 DCM 层或真光层底部出现新生产力最大值。冬季,东海和南海北部新生产力高值均出现在表层,新生产力随着深度的增加呈下降的趋势。

3. 水柱积分新生产力(INP)的时空分布

东海水柱积分新生产力变化范围为 $14.70\sim 1532.45\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,夏、冬季平均值分别为 $421.98\pm 452.19\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $98.46\pm 137.47\text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,夏季值显著高于冬季值 ($p<0.05$)。夏季 INP 总体分布呈现上升流>近岸>中陆架>冲淡水区的分布趋势;冬季 INP 表现为南部高于北部的分布特征。夏季 INP 受温度、盐度营养盐等环境因子工作调控,但均未达到显著性相关,其中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 影响最

为明显 ($p>0.05$); 冬季主要受温度限制 ($p<0.05$)。

南海北部 INP 变化范围为 $28.39\sim 1758.67 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 夏、冬季平均值分别为 $109.92\pm 58.97 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $399.50\pm 470.85 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 夏季值显著低于冬季值 ($p<0.05$)。夏季 INP 分布呈陆架>陆坡>海盆的分布, 而冬季则呈为陆坡>海盆>陆架的分布特征。夏季 INP 主要受营养盐及温度共同限制, 尤其受 $\text{NO}_3\text{-N}$ 限制 ($p<0.05$); 冬季则主要受 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的限制 ($p<0.05$)。

4. 不同粒径结构新生产力

东海夏季, $>5 \mu\text{m}$ 的浮游植物是新生产力的主要贡献者 ($>65\%$)。南海北部夏季和冬季, $>5 \mu\text{m}$ 的浮游植物为陆架区新生产力的主要贡献者 ($>90\%$), 而 $<5 \mu\text{m}$ 的超微型浮游植物则是陆坡和海盆区的主要贡献者 ($>60\%$)。

关键词: 新生产力; 粒径结构; 东海; 南海北部

Abstract

Isotope ^{15}N protocol was used to measure new production (NP) with size-fractionation in the East China Sea and northern South China Sea in the two cruises in July-September, 2009 and December, 2009-January, 2010, respectively. Temporal and spatial distribution patterns of NP and their controlling factors were investigated. The main results were as follows:

1. Surface NP (NPs) ranged $0.053\text{-}4.060 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, NPs in summer (mean $1.093\pm 1.192 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$) was higher than that in winter (mean $0.330\pm 0.303 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$) in East China Sea. NPs decreased gradually from inshore to offshore in summer, while from south to north in winter. In the northern South China Sea, NPs ranged $0.004\text{-}4.741 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$. NPs in summer (mean $0.236\pm 0.625 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$) was lower than that in winter (mean $1.286\pm 1.344 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$), it had an obvious variation with study areas, which was shelf > slope (basin) in summer, while slope > shelf > basin in winter.

2. Profiles of NP decreased gradually from surface to bottom of euphotic zone in summer in East China Sea, while NP maximum appeared in deep chlorophyll *a* maximum or subsurface layer due to stratification in some stations. Profiles of NP increased gradually from surface to bottom of euphotic zone in summer in northern South China Sea. Profiles of NP showed the similar patterns between East China Sea and northern South China Sea in winter, NP decreased from surface to bottom.

3. In East China Sea, water column integrated new production (INP) ranged $14.70\text{-}1532.45 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and was significant higher in summer ($421.98\pm 452.19 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) than that in winter ($98.46\pm 137.47 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) ($p<0.05$). INP decreased gradually from inshore to offshore in summer, while from south to north in winter in East China Sea. In the northern South China Sea, INP ranged

28.39-1758.67 $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and was significant lower in summer (mean $109.92\pm 58.97 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) than that in winter ($399.50\pm 470.85 \text{ mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) ($p<0.05$). INP had an obvious variation with study areas, it was shelf > slope > basin in summer, while slope > basin > shelf in winter. INP was limited by nutrient and temperature in summer, while by temperature in winter in East China Sea ($p<0.05$). INP was mainly influenced by nutrient and temperature in summer ($p<0.05$), while by nitrate in winter in northern South China Sea ($p<0.05$).

4. INP of $>5 \mu\text{m}$ dominated both in inshore and offshore in summer in East China Sea ($>65\%$). INP of $>5 \mu\text{m}$ dominated only in shelf ($>90\%$), while $<5 \mu\text{m}$ dominated in slope and basin in northern South China Sea ($>60\%$).

Key words: New production; Size-fraction; East China Sea; Northern South China Sea.

缩写词表

缩略词	英文名称	中文名称
Chl <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>	叶绿素 <i>a</i>
DCM	Deep Chlorophyll Maximum	叶绿素最大值层
DIN	Dissolved inorganic nitrogen	溶解无机氮
ECS	East China Sea	东中国海（东海）
INP	Integrated nitrate-based new production over euphotic depth	水柱积分新生产力
IPP	Integrated primary production over euphotic depth	水柱积分初级生产力
N	Nitrogen	氮
NP	New production	新生产力
NSCS	Northern South China Sea	南海北部
P	Phosphorus	磷
PP	Primary production	初级生产力
SCS	South China Sea	南中国海（南海）

第1章 绪论

工业革命以来，人类活动影响引起大气 CO₂ 含量持续快速增加，CO₂ 产生的温室效应导致了全球持续变暖，对全球生态系统和人类活动产生重大影响（沈国英等，2002; Bemana et al., 2011）。海洋作为地球最大的碳储库，对全球碳循环具有举足轻重的作用，海洋浮游植物（phytoplankton）通过光合作用将 CO₂ 转化成颗粒有机碳，经过一系列生物地球化学过程，最终将碳埋藏到海洋深处。Falkowski 等（2000）基于稳态模型估算，上层海洋中有机碳通过“生物泵”（Biological Pump）效应输入深海的有机碳每年可达 11~16 GtC。初级生产力（primary production, PP）在海洋生物泵中扮演主要驱动力作用，而初级生产力依据其氮来源和形态，可划分再生生产力（regenerated production）和新生产力（new production, NP），新生产力的大小则直接反映了生物泵效率的高低（Dugdale & Wilkerson, 1967）。在海洋生态系统处于稳态条件下，新生产力与上层海洋输入深海的有机碳基本维持平衡，反映了海洋净固碳能力（Platt et al., 1992），新生产力概念成为海洋生物地球化学循环研究的基石（Michaels et al., 2001）。

当前，新生产力成为海洋碳循环研究的核心内容，“全球海洋通量联合研究计划”（JGOFS）核心内容之一就是在全球尺度上了解新生产力的规模、时空变化和制约机制，对全球气候变化中海洋所发挥的调节作用做出预测（王荣，1992；焦念志，1993a; Valela, 1995）。研究新生产力对了解海洋生态系统的物质循环、能量流动及全球气候变化趋势具有重大的理论意义和现实意义。

1.1 新生产力的研究历史和现状

1.1.1 初级生产力研究进展

初级生产力（primary production）是指自养生物通过光合作用或化学合成制造有机物和固定能量的过程。地球表面约 70% 的面积被海洋覆盖，海洋中的

初级生产者利用光能，以 CO_2 、 H_2O 和营养盐为原料合成有机物质，为整个海洋生态系统提供物质和能量基础（沈国英等，2002）。浮游植物是海洋主要初级生产者，其初级生产力约占全球初级生产力的一半，近海海区占全球海洋总面积 7~8%，但其浮游植物年固碳量却占全球总固碳量的 26%（Lalli & Parsons, 1997）。可见，近海浮游植物是生物地球化学循环的关键组分，对全球碳通量变化过程及大气圈 CO_2 调节具有重要意义（王荣，1992；宁修仁等，2000）。

20 世纪 50 年代以来，海洋初级生产力研究取得了长足的发展，1952 年 Steemann-Nielsen 引入了放射性同位素 (^{14}C) 示踪法测定浮游植物初级生产力，初步得到了全球海洋初级生产力分布（Ryther, 1957; Steemann, 1963）。其后液体闪烁技术装置的应用，提高了对 ^{14}C 的探测效率，为 ^{14}C 示踪法带来了更广泛的应用，Morris 等（1971）和 Seindler 等（1972）对 ^{14}C 示踪法进行了进一步改进，使 ^{14}C 示踪法能够测定颗粒态和溶解态碳生产量。

到目前为止，对全球各海区初级生产力的调查已经相续展开，并初步估算了全球海洋初级生产力水平。Ryther（1969）认为全世界海洋初级生产量约为 $200 \times 10^9 \text{ tC/a}$ ；Koblentz-Mishe 等（1970）根据 7000 多个观测站所得数据，估计全世界海洋浮游植物的总初级产量为 $23 \times 10^9 \text{ tC/a}$ ；Platt & Subba（1975）和 Berger 等（1989）估算全球初级生产力约为 $30 \times 10^9 \text{ tC/a}$ ；Lalli（1997）估计海洋浮游植物生产量约为 $37 \times 10^9 \text{ tC/a}$ 。Field 等（1998）应用的遥感估算全球海洋初级生产力约为 $45 \sim 50 \times 10^{15} \text{ gC/a}$ （图 1.1）。

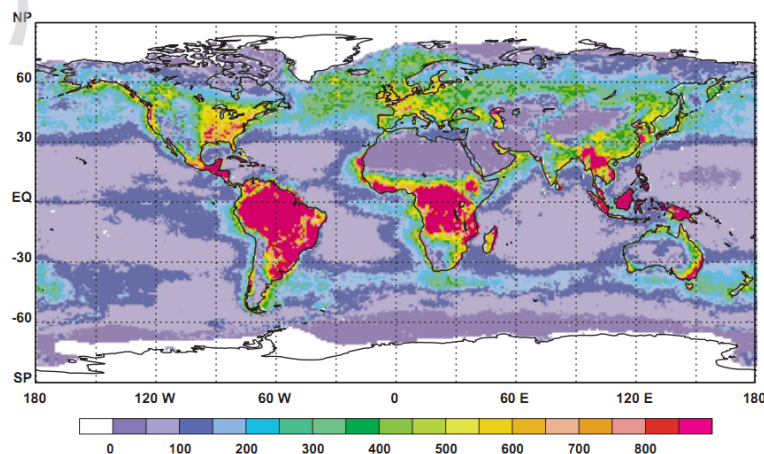


图 1.1 海洋初级生产力分布图（Field et al., 1998）

Fig 1.1 Distributions of Ocean Net Primary Productivity (Field et al., 1998)

然而在初级生产力和生物资源的研究和实践中,经常会遇到一些难以解释的现象,如两个具有相同初级生产力的海区,却存在差别巨大的资源输出,甚至出现了能量流动的金字塔倒挂现象(焦念志等,1993a),仅仅测定初级生产力不足以对一些海域生产力状况作出合理的解释,正基于此,新生产力(new production, NP)概念的提出(Dugdale & Wilkerson, 1967),以及之后初级生产力“产品结构”(焦念志等,1993a)等观点的阐述,成功解释了这些现象。

1.1.2 海洋氮循环

氮作为大气圈中最丰富和化学价态最多的元素之一,是生物体重要的生物化学组成成分(蛋白质、核酸)。在海洋生态系统中,氮元素是浮游植物生长所必需的大量元素,通常情况下会成为浮游植物生长的限制性因子,影响海洋浮游植物的生物量和分布(Capone, 1983; Vitousek & Howarth, 1991; Carpenter & Barber et al., 1992; Herbert, 1999)。海洋中N相对于P、Si等元素形态较多,除气态的 N_2 、 N_2O 和 NH_3 外,还有溶解无机态的 NO_3-N 、 NO_2-N 、 NH_4 和有机态PON、DON,不同价态之间相互转化循环构成了不同路径的氮循环,形成了复杂的生物地化循环过程(Wada & Akihiko, 1991; Ivan et al., 1995; Richardson & Jorgensen, 1996; Bemana et al., 2011)。氮循环控制着海洋生态系统中的生物生产力,尤其是新生产力,与大气 CO_2 的吸收及海洋颗粒有机物的迁移有密切关系(Falkowski et al., 1998; Clark et al., 2008)。

海洋氮循环的主要生物化学反应有:

1) 同化作用:浮游植物吸收海水中的铵盐和硝酸盐,将这些无机氮同化成体内有机氮,浮游动物直接或间接以浮游植物为食(Altabet & Deuser, 1985),进而将植物体内有机氮进一步同化成其自身体内有机氮的过程,这些过程也称有机氮的合成。

2) 固氮作用:固氮微生物细胞内的固氮酶在厌氧条件下(低的氧化还原条件),将 N_2 催化还原成 NH_4 或有机氮的过程称固氮作用。固氮作用过程十分复杂,目前尚未完全清楚。海洋中常见固氮生物有蓝藻类、异养细菌类和光合细菌类(Capone et al., 1997; 侯建军等, 2005)。

3) 氨化作用: 动植物遗体、排出物和残落物中的有机氮被微生物分解后产生氨的过程 (Clark et al., 2008)。

4) 硝化作用: 在有氧条件下, 氨或铵盐在硝化细菌的作用下最终氧化成硝酸盐或亚硝酸盐的过程。

5) 反硝化作用: 在氧气不足条件下, 海水中硝酸盐被反硝化细菌等多种微生物还原成亚硝酸盐, 并进一步还原成分子态氮的过程。

虽然 N_2 在海洋中以溶解态大量存在, 但除极少部分固氮生物外, 绝大多数海洋浮游植物光合作用不能直接利用分子态的氮。通常情况下, 浮游植物只能通过同化作用将铵盐和硝酸盐转化为有机氮参与细胞内各种物质合成, 随后生物以 NH_4-N 为主要形式将氮到排外界环境中, 氨盐再通过厌氧细菌的硝化作用形成硝酸盐, 继续参与同化作用的循环合成有机氮 (Redfield, 1958; Broecker et al., 1984; Barber, 1992; Lam et al., 2009) (图 1.2)。

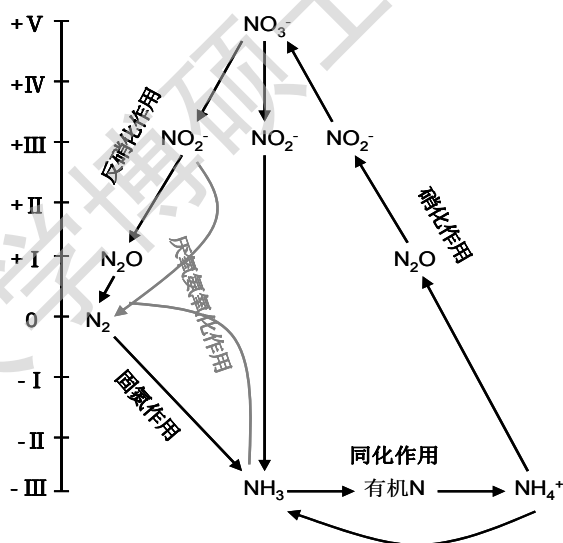


图 1.2 海洋氮循环示意图 (改自 Liu, 1979)

Fig 1.2 Nitrogen cycling in marine environment (modified from Liu, 1979)

海洋氮循环伴随海洋碳循环, 都受控于各种生物地球化学过程, 是海洋生态系统物质循环的重要组成部分, 在生物地球化学系统的平衡和调节中发挥着不可替代的作用, 一直是海洋学界研究的热点 (Wada & Akihiko, 1991; Richardson & Jorgensen, 1996)。

1.1.3 稳定性氮同位素的基本理论

同位素是质子数相同而中子数不同的一组核素。氮元素具有七种同位素，分别为 ^{12}N 、 ^{13}N 、 ^{14}N 、 ^{15}N 、 ^{16}N 、 ^{17}N 和 ^{18}N ，其中 ^{14}N 和 ^{15}N 是稳定同位素，其他为放射性同位素。在大气中， ^{14}N 的丰度为 99.633%， ^{15}N 的丰度为 0.365%。天然物质中 ^{15}N 的原子百分数变化极小，因此，通常用大气氮作为工作标准，用以检测其他各种含氮物质的氮同位素组成。在该标准下， $\delta^{15}\text{N}(\text{‰}, \text{air})$ 被定义为：

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}, \text{air}) = \frac{(\text{15N/14N})_{\text{样品}} - (\text{15N/14N})_{\text{标准}}}{(\text{15N/14N})_{\text{标准}}} \times 1000$$

在地球系统中， $\delta^{15}\text{N}$ 值为 -50‰~100‰，其中绝大多数含氮物质的 $\delta^{15}\text{N}$ 值集中于 -10‰~20‰ (Freyer, 1991)。

1.1.4 稳定氮同位素方法在海洋学研究中的应用

^{15}N 同位素方法以其安全、准确及不干扰自然等优越性已逐渐引起了海洋学界的重视 (Dugdale & Wilkerson, 1961)，随着同位素质谱技术的不断发展和完善，氮同位素越来越广泛应用于海洋学研究中，氮同位素可以示踪海水中氮化合物的主要来源及其转化机制等水体氮的生物地球化学循环 (Mariotti et al., 1984; Ostrom et al., 1997; Wu et al., 2003)。基于此，本文新生产力测定采用 ^{15}N 同位素示踪法。

1.1.5 新生产力研究进展

1.1.5.1 新生产力概念及研究意义

同化作用中，浮游植物直接利用的氮源包括水溶性有机氮化合物（氨基酸、尿素和酰胺）和无机氮化合物（氨盐、硝酸盐和 N_2 ），其中氨盐和硝酸盐是最主要氮源。由海洋生物各种氮代谢途径产生的氨盐，经浮游植物吸收后，直接合成细胞所需氨基酸进入体内循环；海洋环境中本身存在的硝酸盐，则经过代谢还原后才可以被细胞吸收利用（图 1.3）。因此，根据浮游植物细胞吸收氮的最终来源，可将其分为 2 类：1) 由大气或真光层之外供应的硝酸盐和 N_2 ；2)

由系统内再循环作用产生的氨盐和尿素等。

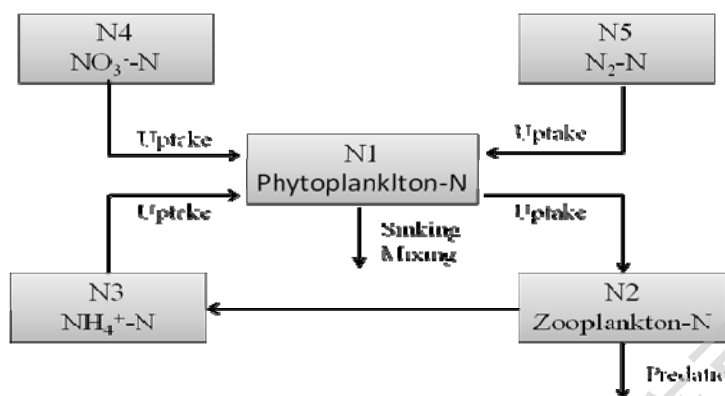


图 1.3 海洋真光层内无机氮的循环（改自 Dugdale & Wilkerson, 1967）

Fig 1.3 Cycling of inorganic nitrogen through the euphotic zone ecosystem
(modified from Dugdale & Wilkerson, 1967)

基于初级生产中浮游植物对不同氮源利用的划分，Dugdale 和 Goering (1967) 提出了新生产力 (new production, NP) 的概念，即在真光层内由外来新生氮源（如 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 N_2 ）等提供的那部分初级生产力称为新生产力；由真光层内再循环氮源（ NH_4 和尿素）等提供的那部分初级生产力称为再生生产力 (regenerated production, RP)。

碳和磷不能作为新生营养盐和再生营养盐的区分，因为氮是细胞的主要构成元素之一，且不参与生物体内能量循环，C/N 值、N/P 值相对保持恒定，使其对生产力描述比碳、磷对初级生产力的描述具有更高精确性；此外，氮元素常常成为海洋浮游植物生长的限制性因子，因而建立在氮源基础上生产力的划分更有现实意义 (Dugdale & Wilkerson, 1967)。

新生氮主要来源：

1) 上升流或海水的梯度扩散。在大洋，尤其在低纬度寡营养盐海域中，表层硝酸盐不足，真光层以外输入的氮源对支持海洋生产力至关重要。由于上升流或海水梯度扩散等作用，深层富含 $\text{NO}_3\text{-N}$ 海水涌入真光层内，成为新生氮最主要来源 (Dugdale & Wilkerson, 1967; Alvarez-Salgado & Beloso, 2002; Parker, 2011)。本论文研究即为基于硝酸盐基础上的新生产力，若无特殊说明，下文所

涉及的新生产力 (new production, NP) 均指在硝酸盐基础上产生的新生产力。

2) 海洋生物固氮作用。目前已知海洋固氮生物多为原核生物, 主要有细菌和蓝藻, 尤其以束毛藻 (*Trichodesmium* spp) 为主 (Dugdale et al., 1953), 此外还有一些动植物共生的固氮微生物 (Capone et al., 1997; 侯建军等, 2005)。束毛藻主要生活在水温高于 20°C 的热带和亚热带海域 (LaRoche & Breitbarth, 2005)。Lin 等 (1998) 研究表明, 束毛藻仅有 15% 的细胞含有固氮酶, 为植物生长提供所需“新”氮。大量研究表明, 束毛藻固氮速率很低, 特别是氨盐的存在, 降低了细胞固氮速率, 固氮作用对新生产力贡献仅占 5%~10% (Chen, 2006; Dugdale et al., 2007)。东海营养盐充足, 温度较低, 除黑潮区外束毛藻支持的固氮速率并不高; 在南海, 现有研究尚未发现南海存在高丰度的束毛藻, 固氮作用对新生产力贡献较小, 南海北部固氮速率仅为 $0.34 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, 占其新生产力 3%~5% (张世泰, 2003; Chen et al., 2004; Lee, 2005), Dong 等 (2008) 对三亚湾束毛藻分布进行的研究表明, 铁氏束毛藻是浮游蓝藻的优势种, 其支持的初级生产力不足 1%。因此, 在本论文研究的新生产力中, 忽略了固氮作用对新生产力的贡献。

3) 陆源输入。在沿岸、海湾和河口区, 陆源输入及近岸人为排污的营养盐输入 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$), 也是构成近岸新生氮的重要来源。

4) 大气沉降或降水。主要包括降雨、降雪及大气沉降等现象中所含的营养盐成分, 相对于其他氮来源, 其贡献要小很多 (Dugdale & Wilkerson, 1967)。

再生氮主要来源: 氮营养盐被浮游植物吸收转化成自身有机氮并通过食物链在更高营养级生物中传递, 在此过程中, 相当一部分有机氮由于溶出、死亡代谢等作用排入水体形成了再生氮 (任玲等, 2003), 其构成主要有: 1) 浮游植物胞外溶出: 主要有蛋白质、氨氮及部分亚硝酸盐和氨基酸 (Meffert & Zimmermann, 1979); 2) 生物的排泄: 氨氮是其主要排泄形式, 同时还包括脲、氨基酸及蛋白质等 (Yuan & Peters, 1994; Schaus et al., 1997); 3) 有机碎屑: 海洋动物新陈代谢后的排泄物和死亡生物个体是海洋中有机碎屑的主要来源。这些过程产生的再生氮绝大部分在真光层内被海洋生物再次利用, 构成了海洋再生生产力, 在大洋寡营养区域再生生产力贡献了 80~90% 的初级生产力

(Harrison et al., 1992; Miller & Moran, 1997)。

新生产力的研究意义:

首先,新生产力的研究从更深层次阐明了海洋生态系统的结构和功能。新生产力概念提出将初级生产力划分为再生生产力和新生生产力,从而将真光层内营养物质的循环和外来营养物质补充区分开来,更清晰的表现出不同生态系统下的结构、功能以及其运转循环特征 (Michaels et al., 2001)。

其次,新生产力的研究对阐明全球碳循环过程具有重大意义。在全球变暖的当今社会,海洋碳库的作用越来越受到重视,新生产力的水平能真正反映出海洋真光层净吸收 CO₂ 的能力 (Eppley & Peterson, 1979)。

最后,新生产力概念的提出为区分维持水层生态系统所需的能量和用于增加生产的能量提供了科学依据。新生产力不仅反映出海洋真光层净吸收 CO₂ 的能力,也反映了其向高层次营养级输送物质的能力 (Eppley & Peterson, 1979),新生产力的及时补充为海区有机物的持续输出 (包括鱼类和大型海藻) 提供了可能,保持了海洋生态系统的平衡,对探讨海洋生物资源的持续开发具有重要的实际意义。

1.1.5.2 国外进展

Dugdale 和 Goering (1967) 首先提出了新生产力的概念,并于马尾藻海、阿拉伯海和北太平洋等海域首次应用 ¹⁵N 同位素示踪法进行了现场试验,对真光层内氮代谢与循环等生态学问题进行了研究。Atkin (1969) 指出了运用 ¹⁵N 示踪剂时的优缺点,指出添加示踪剂可能会改变整个体系的状态。

Eppley 等 (1979) 结合以往大量 ¹⁵N 数据和初级生产力数据,首次提出了 *f*-比和 *r* 值等相关概念。*f*-比即新生产力与总初级生产力的比值,建立起两者间的定量关系,并对全球新生产力做了粗略估计。他们同时将新生产力和输出生产力联系起来,认为浮游植物在真光层内合成的颗粒态有机物质,由于其比重海水大,会下沉到海洋底部,这部分碳输出原则上应该等于新生产力 (Eppley & Peterson, 1979; Boyd & Trull, 2007),这赋予了新生产力在生物地球化学方面新的含义,直接将新生产力与海洋吸收的温室气体 CO₂ 联系起来,使新生产力的

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.

厦门大学博硕士论文摘要库