

学校编码: 10384

密级\_\_\_\_\_

学号: 22420111151391

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

北部湾北部海域营养盐的分布特征及其对  
生态系统的影响研究

The Distribution Feature of Nutrients and the Study of  
Their Influence on Ecosystem in the Northern Beibu Gulf

吴敏兰

指导教师姓名: 郑爱榕 教 授

专 业 名 称: 海 洋 化 学

论文提交日期: 2014 年 05 月

论文答辩时间: 2014 年 05 月

2014年05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(海洋与地球学院海洋有机化学)课题(组)的研究成果,获得(国家海洋公益性科研专项 201005012)课题(组)经费的资助,在(海洋与地球学院海洋有机化学)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

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
<b>Abstract</b> .....	III
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
<b>1.1 营养盐概述</b> .....	1
1.1.1 氮.....	1
1.1.2 磷.....	3
1.1.3 硅.....	4
<b>1.2 海湾营养盐的研究历史与现状</b> .....	5
1.2.1 北部湾.....	5
1.2.2 国内外其他半封闭海湾.....	6
<b>1.3 人类活动的影响</b> .....	7
<b>1.4 研究目的和内容</b> .....	8
<b>1.5 论文框架</b> .....	9
<b>第 2 章 研究区域和方法</b> .....	10
<b>2.1 研究区域概况</b> .....	10
2.1.1 气候特征.....	11
2.1.2 重点港湾.....	11
2.1.3 水文状况.....	13
2.1.4 地形特征.....	19
2.1.5 产业结构和污染来源.....	20
<b>2.2 采样站位、测定方法和数据处理</b> .....	20
2.2.1 采样站位布设.....	20
2.2.2 采样和分析方法.....	21
2.2.2.1 样品的采集和保存.....	21
2.2.2.2 分析方法.....	21
2.2.2.3 数据质量控制.....	22
<b>第 3 章 北部湾北部海域营养盐的分布、结构和年际变化</b> .....	23

3.1 营养盐的空间分布 .....	23
3.1.1 春季营养盐的空间分布.....	23
3.1.2 夏季营养盐的空间分布.....	29
3.1.3 营养盐的季节变化和年际变化.....	33
3.1.4 与国内外海湾数据对比.....	40
3.2 营养盐结构分析 .....	40
3.2.1 营养盐比值分析.....	40
3.2.2 营养盐限制因子.....	46
3.2.3 海水自净能力分析.....	50
3.3 营养盐与其他环境因子的相关性分析 .....	53
3.4 本章小结 .....	56
<b>第 4 章 北部湾北部海域生态系统的营养水平评估</b> .....	<b>58</b>
4.1 海水富营养化评价 .....	59
4.1.1 单项指标评价法.....	59
4.1.2 综合指数评价法.....	61
4.1.2.1 营养状态质量指数 (NQI) 法 .....	61
4.1.2.2 有机污染评价指数 (A) 法.....	63
4.1.2.3 生物多样性指数 (H') 法.....	64
4.1.3 富营养化水平评价法.....	66
4.1.3.1 潜在性富营养化评价法.....	66
4.1.3.2 压力—状态—响应模式 (PSR) 法 .....	69
4.1.4 模糊数学综合评价法.....	72
4.1.5 综合结果.....	75
4.2 环境容量估算 .....	77
4.2.1 营养盐和 COD 的入海通量 .....	77
4.2.2 北部湾近岸港湾环境承载力.....	79
4.3 本章小结 .....	79
<b>第 5 章 影响北部湾北部海域生态环境的关键因子、区域和时间的识别</b> .....	<b>81</b>

5.1 主成分分析方法 .....	81
5.2 影响北部湾北部海域生态系统的关键因子 .....	83
5.2.1 海湾项目调查结果的主成分分析.....	83
5.2.2 908 专项调查结果的主成分分析.....	87
5.2.3 关键因子的识别.....	88
5.3 影响北部湾北部海域生态系统的关键区域 .....	91
5.3.1 海湾项目调查结果分析.....	91
5.3.2 908 专项调查结果分析.....	93
5.3.3 关键区域的识别.....	96
5.4 影响北部湾北部海域生态系统的关键时间 .....	97
5.5 本章小结 .....	98
<b>第 6 章 结论与展望</b> .....	100
<b>6.1 本文结论</b> .....	100
6.1.1 营养盐含量的时空分布.....	100
6.1.2 营养盐形态结构与比值.....	101
6.1.3 营养盐对海洋生态系统的影响.....	101
<b>6.2 尚未解决的问题与展望</b> .....	102
<b>6.3 创新与不足</b> .....	103
<b>参考文献</b> .....	104
<b>附录：在学期间所做的主要工作</b> .....	113
<b>致谢</b> .....	114

## CONTENTS

<b>Abstract (In Chinese)</b> .....	I
<b>Abstract (In English)</b> .....	III
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Nutrients summarization</b> .....	1
1.1.1 Nitrogen .....	1
1.1.2 Phosphorus.....	3
1.1.3 Silicon .....	4
<b>1.2 The gulf nutrient research history and actuality</b> .....	5
1.2.1 Beibu Gulf.....	5
1.2.2 Other semi-closed gulfs at home and abroad.....	6
<b>1.3 Influnce of human activities</b> .....	7
<b>1.4 Objectives and contents</b> .....	8
<b>1.5 Structure of this thesis</b> .....	9
<b>Chapter 2 Study area and methods</b> .....	10
<b>2.1 Regional overview</b> .....	10
2.1.1 Climate feature.....	11
2.1.2 Major harbors.....	11
2.1.3 Hydrology .....	13
2.1.4 Topographic feature .....	19
2.1.5 Industrial structure and pollution source.....	20
<b>2.2 Sampling, analysis and data processing</b> .....	20
2.2.1 Survey design.....	20
2.2.2 Sampling and analysis.....	21
2.2.2.1 Sampling and storage.....	21
2.2.2.2 Analysis.....	21
2.2.2.3 Data Quality Control.....	22
<b>Chapter 3 Distribution, structure and interannual variations of nutrients in the northern Beibu Gulf</b> .....	23
<b>3.1 Spatial distributions of nutrients</b> .....	23
3.1.1 Spatial distributions of nutrients in spring.....	23
3.1.2 Spatial distributions of nutrients in summer .....	29

3.1.3 Seasonal and interannual variations of nutrients .....	33
3.1.4 Compared with other gulfs at home and abroad .....	40
<b>3.2 Nutrients structure analysis .....</b>	<b>40</b>
3.2.1 Nutrient ratios analysis .....	40
3.2.2 Nutrients limiting factor .....	46
3.2.3 Seawater self-purification capacity analysis .....	50
<b>3.3 Correlation analysis of nutrients and other environment factors .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4 Brief summary .....</b>	<b>56</b>
<b>Chapter 4 Assessment of trophic level on the ecosystem of the northern Beibu Gulf .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 Assessment of seawater eutrophication level .....</b>	<b>59</b>
4.1.1 Single indicator method .....	59
4.1.2 Comprehensive index method .....	61
4.1.2.1 Nutrition Quality Index (NQi) .....	61
4.1.2.2 Evaluation index of organic pollution method (A) .....	63
4.1.2.3 Biodiversity index method (H') .....	64
4.1.3 Eutrophication level evaluation method .....	66
4.1.3.1 Potential eutrophication evaluation method .....	66
4.1.3.2 Pressure-Status—Response model (PSR) .....	69
4.1.4 Comprehensive evaluation method of fuzzy mathematics .....	72
4.1.5 Final result .....	75
<b>4.2 Estimation of environmental capacity .....</b>	<b>77</b>
4.2.1 Fluxes of nutrients and COD .....	77
4.2.2 Environmental carrying capacity of the Beibu Gulf coastal harbours .....	79
<b>4.3 Brief summary .....</b>	<b>79</b>
<b>Chapter 5 Identification of the key factor, area and time which affect the ecosystem in the northern Beibu Gulf .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1 Principal Component Analysis (PCA) .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2 Key factor which affect the ecosystem in the northern Beibu Gulf .....</b>	<b>83</b>
5.2.1 PCA of the gulf program .....	83
5.2.2 PCA of the 908 spatial program .....	87
5.2.3 Identification of key factor .....	88
<b>5.3 Key area which affect the ecosystem in the northern Beibu Gulf .....</b>	<b>91</b>



---

5.3.1 Analysis of the gulf program.....	91
5.3.2 Analysis of the 908 spatial program.....	93
5.3.3 Identification of key area .....	96
<b>5.4 Key time which affect the ecosystem in the northern Beibu Gulf .....</b>	<b>97</b>
<b>5.5 Brief summary.....</b>	<b>98</b>
<b>Chapter 6 Conclusions and outlook .....</b>	<b>100</b>
<b>6.1 Major conclusions .....</b>	<b>100</b>
6.1.1 Spatial and temporal distribution of nutrients concentration.....	100
6.1.2 Morphological structure and ratio of nutrients .....	101
6.1.3 Nutrients influence on marine ecosystem.....	101
<b>6.2 Unsettled problems and outlook .....</b>	<b>102</b>
<b>6.3 Innovation and deficiency .....</b>	<b>103</b>
<b>References.....</b>	<b>104</b>
<b>Appendix: the main work done during the learning.....</b>	<b>113</b>
<b>Acknowledgments.....</b>	<b>114</b>

## 摘要

北部湾是我国东南沿海一个天然的半封闭海湾，位于南海西北部。该海域处于泛北部湾区域经济合作区，近年来受城镇化、工业化和农业活动的影响显著，面临的水环境压力越来越大。为了制定更合理、科学的控制营养盐排海总量方案和海洋环境质量评价体系，需要系统地研究北部湾营养盐的分布、循环和结构特征，客观评估北部湾富营养化状况和承受的压力强度。

于 2011 年 4 月和 8 月，在北部湾北部海域进行了 2 个航次的调查，测定了各种水文、化学和生物要素。调查结果表明，氮营养盐在琼州海峡入口处和防城港附近海域浓度较高，春季在海南岛西北部甚至超标，春季溶解无机氮（DIN）、总溶解态氮（DN）和总氮（TN）的平均含量分别为 7.93  $\mu\text{mol/L}$ 、21.9  $\mu\text{mol/L}$  和 28.9  $\mu\text{mol/L}$ ，夏季分别为 2.54  $\mu\text{mol/L}$ 、11.5  $\mu\text{mol/L}$  和 16.8  $\mu\text{mol/L}$ 。活性磷酸盐（SRP）在春夏的平均含量均为 0.06  $\mu\text{mol/L}$ ，低于浮游植物生长阈值，且营养盐比值均偏离 Redfield 值，因此磷成为该海域营养盐绝对和相对限制因子。春季溶解态硅酸盐（DSi）的含量为 2.12  $\mu\text{mol/L}$ ，夏季有径流输入补充，增加至 5.18  $\mu\text{mol/L}$ 。广西近岸港湾的营养盐在 1990~2010 年期间浓度呈上升趋势，特别是氮。

春季水体中 DIN 的主要形态为硝酸盐（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ），比例达 55.0%，夏季为铵盐（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ），占 49.8%；DN 和总溶解态磷（DP）都以溶解有机态为主，分别占 63.8%~77.8%和 77.0%~88.5%；TN 主要存在形式是溶解态，而总磷（TP）在春季以颗粒态为主，夏季以溶解态为主，因此溶解有机态营养盐在该海域的生态系统中有着重要作用。通过分析该海域的氮磷循环特征，发现其水体的生物化学自净能力春季强于夏季。

用单项指标和综合指数法评估营养盐对各区域的压力强度的结果发现，廉州湾（南流江口）承受的压力强度最大，琼州海峡入口处和防城港附近海域的压力次之；对溶解有机态含量高、无机态含量低于浮游植物生长阈值的海湾，用潜在性富营养化水平评价模式评估时，应选择总溶解态的含量而非溶解无机态，研究海域评估结果为中度营养、春季存在磷限制；用压力—状态—响应模式进行的半定量评估结果表明，营养盐对海域的压力强度为中等。

对调查数据进行的主成分分析表明，影响北部湾北部海域生态环境的关键因子是溶解氧（DO）和 DN，氮营养盐对海域生态环境的压力最大；关键区域在

琼州海峡入口处的海南岛西北部和涠洲岛东南部海域，防城港附近海域次之；春季是关键季节，需要控制氮的输入，夏季次之，但要注意控制磷的含量。

关键词：北部湾；营养盐；分布特征；主成分分析；压力评估

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

Beibu Gulf is a natural semi-enclosed bay of China which located in northwestern of the South China Sea. The Gulf which is in the Beibu Gulf economic cooperation zone is being significantly affected by urbanization, industrialization and agricultural activities in recent years and suffering increasing pressure on the water environment. In order to develop a more reasonable and scientific total amount of nutrient solution discharging into the sea control plan and marine environment quality evaluation system, a systematic study of the distribution, circulation and structural characteristics of nutrients in the Beibu Gulf are required as well as an objective assessment of the eutrophication status and the pressure of the Beibu Gulf.

Two voyages were held in April and August, 2011, and hydrological, chemical and biological factors were obtained in the northern Beibu Gulf. The findings suggest that nitrogen nutrients have a higher concentration in the entrance of Qiongzhou Strait and the waters near to Fangcheng Harbor, while in spring even exceeded the standard value of Chinese standard seawater quality in northwestern of Hainan Island. In spring, the average concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN), total dissolved nitrogen (DN) and total nitrogen (TN) is 7.93  $\mu\text{mol/L}$ , 21.9  $\mu\text{mol/L}$  and 28.9  $\mu\text{mol/L}$ , respectively, and 2.54  $\mu\text{mol/L}$ , 11.5  $\mu\text{mol/L}$  and 16.8  $\mu\text{mol/L}$  respectively in summer. The average concentration of reactive phosphate (SRP) in the spring and summer both are 0.06  $\mu\text{mol/L}$ , which below the threshold of phytoplankton growth. Furthermore, the nutrient ratios deviates the Redfield value, so that phosphorus becomes the absolute and relative nutrient limiting factor in the studied waters. Concentration of dissolved silicate (DSi) is 2.12  $\mu\text{mol/L}$  in spring and up to 5.18  $\mu\text{mol/L}$  in summer since the runoff input supplement. Nutrient especially nitrogen concentration in coastal waters of Guangxi is keeping an upward trend in the period from 1990 to 2010.

In spring, the main form of DIN is nitrates ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), which occupied a proportion of 55.0% while in summer is ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), accounting for 49.8%; The main forms of DN and total dissolved phosphorus (DP) are dissolved organics, accounting for 63.8%~77.8% and 77.0%~88.5%, respectively; And the main form of TN is dissolved species, while the total phosphorus (TP) in spring is mainly particulates and dissolved form in summer. Hence the dissolved organic nutrients play an important

role in the ecosystem of the studied area. As the result of the analysis of nitrogen and phosphorus cycling, the biochemical purification capacity of the water is stronger in spring than summer.

Meanwhile, the study found the place that under maximal nutrients pressure is Lianzhou Bay (Nanliu River estuary), then is the entrance of Qiongzhou Strait and the water near Fangcheng Harbor when combined single indicators and comprehensive index method to assessment the nutrients pressure on each region; When assessed by potential eutrophication level model, for the gulf which total dissolved content is very high but the inorganic content is below the threshold for phytoplankton growth, the evaluation would be more reasonable to use the total dissolved nutrients rather than dissolved inorganic, and the results of this study shows the studied waters is in a moderated nutrition state, but phosphorus limitation was existed in spring; At the same time, this paper applied pressure-state-response model evaluated the nutrients pressure strength of the entire sea half-quantitatively, with a result is moderate.

Employing the principal component analysis method to analyze the surveyed data, the results show that the key factors affecting the ecological environment of the northern Beibu Gulf are dissolved oxygen (DO) and DN, and nitrogen nutrient revealed the maximum pressure; Critical areas are located in the northwest of Hainan Island (the entrance of the Qiongzhou Strait), southeast waters of Weizhou Island and the waters near Fangcheng Harbor take the second place; Spring is the key season, which need control the input of nitrogen, and followed by summer that need control the concentration of phosphorus.

Key words: Beibu Gulf; Nutrient; Distribution feature; Principal component analysis; Assessment of pressure

## 第1章 绪论

20 世纪以来, 沿海城市的工业化进程逐渐加快, 人口激增, 大量工业废水和生活污水排放入海, 同时流域的畜禽养殖和化肥施用量增加, 输送了大量的氮、磷、有机物、重金属等进入海洋, 筑堤建坝、改道等工程减少了硅的输入 (Turner and Rabalais, 1991; Humborg *et al.*, 1997), 以及围填海等工程破坏海岸带和海洋生态环境。总之, 人类活动对海洋生态环境造成了严重影响, 特别是河口、海湾等近岸海域的污染和富营养化现象的产生, 使得赤潮和季节性底层缺氧等环境问题日益突出 (Billen *et al.*, 1999; Rabalais *et al.*, 2001; 张莹莹等, 2007; Conley *et al.*, 2009)。目前, 人为活动加重了海洋生态系统承受的压力, 改变了水体的营养状况, 引起营养盐比例失调、浮游植物的丰度和多样性下降、种类演替、食物链结构变化等问题 (Patrick, 1973; Justic *et al.*, 1995; Jickells *et al.*, 1998), 破坏了海洋生态系统平衡。

### 1.1 营养盐概述

氮 (N)、磷 (P)、硅 (Si) 是海洋生物生长所必需的元素, 一般被称为主要营养盐或生源要素, 与海洋生物活动相互影响 (陈敏, 2009)。营养盐的生物地球化学循环仍然是当今海洋科学的研究热点和重点之一, 是海洋相关学科各大国际合作计划中的核心内容 (Amon and Meon, 2004; 刘素美等, 2000)。它的分布和变化不仅对全球气候和环境变化有着耦合和反馈作用, 同时影响海洋的生物生产力和资源量 (高生泉, 2004)。要研究一个海域的生态系统, 营养盐的来源与迁出、不同形态间的转化过程及其与其他环境要素间的相关关系是研究的基础和关键。营养盐的分布与变化不仅受物理化学 (如水团输运、再矿化、形态转化、沉积) 等过程的影响, 与海洋中的各种生物过程也密切相关。同时, 它也影响着海洋初级生产力和碳输出, 因此与大气二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 浓度的变化乃至全球气候变化有密切联系 (陈敏, 2009)。

#### 1.1.1 氮

N 是海洋生物生长的必需营养元素, 是生物体中蛋白质、核酸、光合色素等有机分子的重要组成元素。氮气分子 ( $\text{N}_2$ ) 是海水中的氮的主要存在形式, 除此

之外, 还有以溶解态和颗粒态存在的无机态和有机态氮 (陈敏, 2009)。相比磷和硅, 氮在海水中以无机态存在形式为主, 主要有亚硝氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、硝氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 和氨氮 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), 三者之和为溶解无机氮 (DIN), 溶解有机氮 (DON) 主要有腐殖质、尿素、游离氨基酸、酰胺和维生素等, 颗粒有机氮 (PON) 包括有机氮碎屑、细菌和浮游植物成分等 (杨小龙等, 1990), 氮的多种存在形态使其在海洋环境中的循环相对磷、硅复杂。浮游植物生长主要吸收溶解无机态氮, 但其对于不同形态氮具有优先选择性吸收, 当  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  同时存在时, 浮游植物优先利用  $\text{NH}_4\text{-N}$ , 只有氮浓度  $<0.5\sim 1 \mu\text{mol/L}$  时才利用  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Conway, 1977), 而当  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  同时存在时, 浮游植物一般优先利用  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Syrett, 1981)。因此,  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  是浮游植物主要利用形态, 对于一些微藻和细菌溶解有机氮也是可利用营养盐之一 (Paul, 1983)。

不同形态的氮之间可以通过生物化学反应进行相互转化 (图 1.1): (1) 厌氧氨氧化作用, 指  $\text{NH}_4\text{-N}$  在厌氧条件下以  $\text{NO}_2\text{-N}$  为电子受体直接反应生成  $\text{N}_2$  的过程; (2) 固氮作用, 指固氮生物在固氮酶作用下将  $\text{N}_2$  转化为  $\text{NH}_4\text{-N}$  或 DON; (3) 硝化作用, 指在有氧条件下  $\text{NH}_4\text{-N}$  被氧化成氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ )、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$ ; (4) 异养反硝化作用 (脱氮作用), 指  $\text{NO}_3\text{-N}$  还原成  $\text{NO}_2\text{-N}$  后继续转化成  $\text{N}_2\text{O}$ , 最后转化成  $\text{N}_2$ ; (5) 硝酸盐还原作用, 指  $\text{NO}_3\text{-N}$  或  $\text{NO}_2\text{-N}$  异化还原为  $\text{NH}_4\text{-N}$ 。其中, 生物固氮作用与反硝化作用分别是海洋氮收支中最重要的源和汇 (Codispoti *et al.*, 2001)。此外, 生物的新陈代谢过程、颗粒态氮有机物的再矿化作用和水—沉积物界面交换作用在氮循环过程中也扮演着重要角色。

海洋中氮的来源主要有陆地径流、地表水和地下水输入、污水排放、大气沉降、固氮作用等, 通过潮汐、风、对流扩散、生物活动、沉积间隙水上覆等作用影响其在海水中的分布 (任玲等, 2000), 迁出途径包括有机质的沉积埋藏、反硝化作用等。就全球而言, 通过河流输送入海的氮通量约为  $30 \text{ Tg/a}$  ( $\text{T}=10^{12}$ ), 陆地地表水输入的氮约为  $10 \text{ Tg/a}$ , 大气沉降有  $40 \text{ Tg/a}$ , 生物固氮约  $20 \text{ Tg/a}$  (Paerl *et al.*, 2000)。对于不同海区, 各来源的氮量所占比例有所不同, 河流的输入作用对于近岸海域比开阔大洋重要。水—沉积物界面交换是水体中营养盐的来源迁出主要过程之一, 其发生的物理过程有: 有机碎屑和动植物残骸的沉降; 水流、生物扰动引起的再悬浮; 沉积物向水体的扩散和释放 (任玲等, 2000)。沉积物间隙水中的氮含量往往比上覆水的高, 在浅海区域, 由沉积物释放的营养盐是满足

生产力需求的重要途径之一，甚至有研究发现水—沉积物界面上各种形态的氮通量比河流输入要高出 10 倍 (Wallast, 1983)。

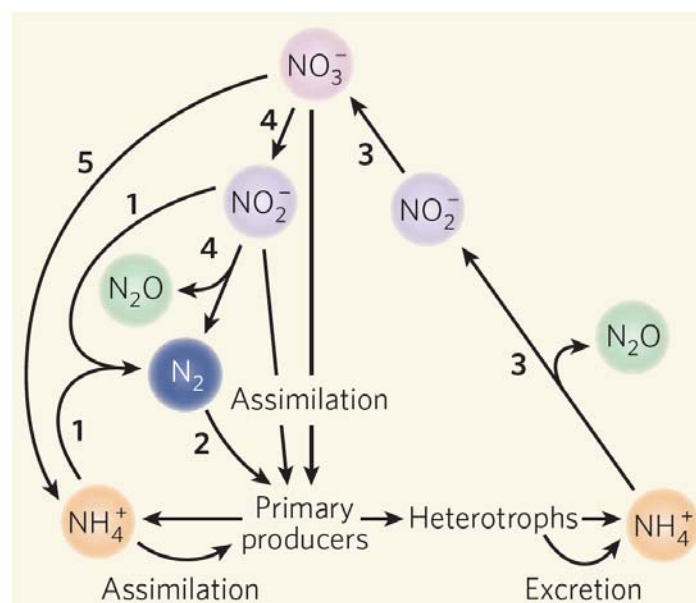


图 1.1 海洋氮循环的主要过程 (引自 Voss and Montoya, 2009)

(1、厌氧氨氧化作用；2、固氮作用；3、硝化作用；4、异养反硝化作用；5、还原作用)

Fig. 1.1 Principal process of the marine nitrogen cycle (Voss and Montoya, 2009)

(1. Anammox; 2. Nitrogen fixation; 3. Nitrification; 4. Heterotrophic denitrification; 5. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA))

### 1.1.2 磷

P 是生物生长和进行能量传输必需的生源要素之一，也是海洋初级生产力和食物链的基础元素。P 在海水中的无机形态包括正磷酸盐、焦磷酸盐和其他无机磷聚合物，正磷酸盐也被称为活性磷酸盐 (SRP)，仅此形态可用磷钼蓝法定量测定，而有机态存在形态包括磷酸酯单体、磷酸酯聚合体、磷酸酯和其他有机磷聚合物 (陈敏, 2009)。在开阔大洋中一般溶解态磷含量高于颗粒态磷，但在近岸海域则以颗粒态磷为主。生物生长时主要利用 SRP，溶解有机态和颗粒态也有部分可被利用 (Bentzen *et al.*, 1992)。

磷的来源有陆地径流输入、大气沉降、火山活动等，其中陆地岩石、土壤风化的产物是河流中磷的自然来源，总磷通量约为  $(2.6\sim 3.3) \times 10^{11}$  mol/a，若考虑



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫