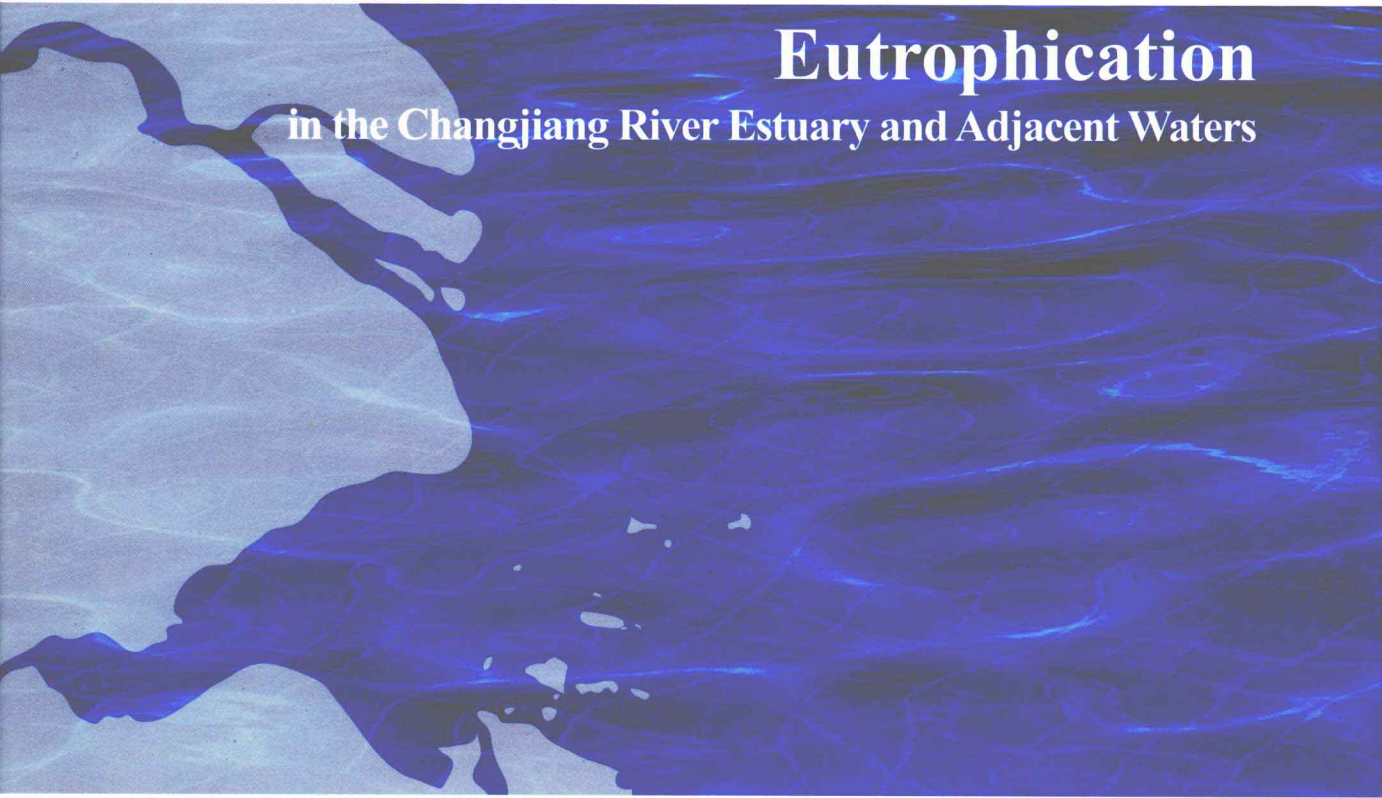


俞志明 沈志良 等 著

长江口水域富营养化



Eutrophication

in the Changjiang River Estuary and Adjacent Waters



科学出版社

长江口水域富营养化

Eutrophication in the Changjiang River Estuary and Adjacent Waters

俞志明 沈志良 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

富营养化是当今世界威胁近海生态系统最大的环境问题,我国近海富营养化问题十分严重,其中以长江口水域最为突出。本书是我国第一本系统研究长江口水域富营养化的成果专著,介绍了以俞志明等为代表的研究团队长期从事长江口水域富营养化研究的成果。本书科学阐述了近海富营养化的基本概念,介绍了长江口水域富营养化现状、特点和变化,分析了长江径流、最大浑浊带、上升流和生物过程等对该水域富营养化的影响,建立了该水域富营养化生态耦合模型,提出了该水域富营养化的形成机制及其控制原理与对策。本书以大量的科学调查资料为载体,旨在向读者展示我国近海富营养化最新研究成果和进展,为我国沿海管理、规划和开发提供科学依据,也为世界其他河口富营养化研究提供参考,具有重要的学术和应用价值。

本书主要适合于从事海洋、环境、生态及其他相关学科的科技工作者、大专院校师生阅读,也可供地方决策人员、政府官员、从事海洋环境保护的专业人员,以及对海洋生态与环境保护感兴趣的广大读者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

长江口水域富营养化=Eutrophication in the Changjiang River Estuary and Adjacent Waters/俞志明等著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031722-3

I. ①长… II. ①俞… III. ①长江口-水域-富营养化-研究
IV. ①X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 120962 号

责任编辑:李秀伟 李晶晶/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:美光制版

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年8月第一次印刷 印张:35 1/2 插页:10

印数:1—1 200 字数:815 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

主要著者名单

- | | |
|-----|------------------|
| 俞志明 | 中国科学院海洋研究所 |
| 沈志良 | 中国科学院海洋研究所 |
| 陈亚瞿 | 中国水产科学研究院东海水产研究所 |
| 孙 军 | 天津科技大学 |
| 尹宝树 | 中国科学院海洋研究所 |
| 柴 超 | 青岛农业大学 |
| 宋秀贤 | 中国科学院海洋研究所 |
| 赵卫红 | 中国科学院海洋研究所 |

序

近半个多世纪以来,随着全球工业化程度的提高、城市化进程的加快和人口的不断增加,近海富营养化问题日显突出,已经成为全球沿海国家普遍存在的生态环境问题。正如联合国海洋污染科学问题专家组(GESAMP)在2001年报告中所指出的,“无论是从影响范围还是破坏结果来看,富营养化无疑是目前人类影响海洋最大的环境问题”。

长江是我国最大的河流,每年的入海径流量达9560亿 m^3 。长江流域,特别是中下游地区是我国工农业生产最发达、经济实力最强的地区之一,高速的经济增长和日益加剧的人类活动给长江河口水域带来了巨大的压力。上海和浙江近岸海域无机氮平均浓度连年超过国家四类海水水质标准,长江口水域溶解无机氮浓度在40年里升高了约4倍,藻华灾害发生频率和影响面积增加,底层缺氧现象不断加重,成为我国近海富营养化最为严重的水域,已威胁到长江口水域生态环境的可持续发展。

近海富营养化不仅是一个影响人类社会可持续发展的生态环境问题,也是一个涉及许多学科的科学问题,具有明显的学科交叉性和地域特点。特别是长江口水域地处陆-海相互作用的交错带,水文、地形复杂,具有许多独特的理化和生物特征,巨大的径流量、复杂多变的流系、最大浑浊带、高生产力的生物过程等,均对该水域富营养化的形成产生不同影响,导致长江口水域富营养化更加复杂和独特。所以,长江口水域富营养化研究不仅对我国近海生态环境保护、蓝色经济可持续发展具有重要意义,而且对不同学科交叉、综合性学科建设具有重要的推动作用。

正是在上述背景下,俞志明等学者在多年研究的基础上,撰著了《长江口水域富营养化》一书。该书是目前我国第一本有关长江口水域富营养化的综合性专著,也是作者长期从事长江口水域富营养化研究的成果结晶。该书以40年来长江口水域富营养化长期演变过程为切入点,通过连续多年的现场调查,从长江径流、最大浑浊带、上升流、生物过程等诸多方面综合研究了长江口水域富营养化的形成机制与特点。书中的一些新发现、新观点和新方法具有很高的学术价值和意义,包括:对近海富营养化的科学定义、最大浑浊带对富营养化形成的缓冲机制、长江口水域富营养化的综合评价方法、长江口水域氮稳定同位素分布特征、营养盐收支模型与通量、上升流区营养盐动力学、低氧区的形成特征和影响因素等。该书尝试建立的长江口水域富营养化生态模型,不仅充分体现了水文、物理、生物、化学等诸学科的交叉和综合,而且提出了以此模型为基础的该水域环境容量、总量控制和预测预警原理与方法,具有新意。该书最后提出的有关长江口水域富营养化控制方法与对策,不仅具有学术意义,而且还具有潜在的应用价值,体现出较高的研究水平。

总之,该书全面论述了长江口水域富营养化现状、长期演变及其形成机制、特点和相应对策,内容系统、成果丰富,具有较高的理论水平和重要的实践意义。该书的出版将进一步促进我国近海富营养化研究的发展,满足我国蓝色经济战略发展的需要。

因此，在该书出版之际，我很高兴为之作序，祝贺该书的出版，也预祝我国近海富营养化研究取得更大的成就。

国际欧亚科学院院士，中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '陈圣' (Chen Sheng).

2011年2月28日

前 言

海洋富营养化是指“海水中营养物质过度增加，并导致生态系统有机质增多、低氧区形成、藻华暴发等一些异常改变的过程”。通常，海洋富营养化很容易被理解为仅仅指海水中营养物质过多。实际上富营养化（eutrophication）与营养过多（hypertrophication）在科学意义上有明显的不同：前者不仅反映水体中营养物质的水平，同时强调了由于营养物质的增加而引起生态系统的异常改变；而后者则主要是指水体中营养物质的水平，并不包含其是否对生态系统产生影响。简言之，海水中营养过多并不意味着海洋富营养化。

导致海洋富营养化的因素很多，通常可以分为自然因素和人为因素两大类。所谓自然因素主要是指自然界在其发展与演变过程中对海水富营养化产生的各种影响作用，如火山爆发、岩石风化等自然条件下的营养物质输入；人为因素则主要指由于人类活动而导致海水富营养化的各种因素。例如，农业化肥的大量使用、城市化的快速发展、近海养殖业的蓬勃兴起等。仅仅通过自然因素导致水体由贫营养转变成富营养的时间较长，以淡水湖泊为例，该过程通常需要经历数千年的时间才能完成。目前，全球面临的富营养化问题大都不是自然因素造成的，人为因素在其中发挥了决定性的作用。人类活动大大加速了水体的富营养化进程，导致富营养化成为当今世界威胁近海生态系统最大的环境问题，河口水域首当其冲。美国在 20 世纪 90 年代启动了“国家河口富营养化评估”计划，历经 7 年、近 300 多个专家参与，对全美 138 个河口的富营养化状况进行了评估。结果表明，其中 44 个河口水域处于高度富营养化水平，40 个河口水域处于中度富营养化水平。欧盟的奥斯陆-巴黎协作委员会（Oslo and Paris Commissions）也对欧盟 9 个沿海国家富营养化状况进行了调查，2003 年的调查报告指出，在所调查的 167 个沿海水域中，70 个存在“富营养化问题”，28 个存在“潜在富营养化问题”。正如联合国海洋污染科学问题专家组（GESAMP）在 2001 年报告中所指出的，“无论是从影响范围还是破坏结果来看，富营养化无疑是目前人类影响海洋最大的环境问题”。

我国近海富营养化问题也非常严重。进入 21 世纪以来，作为富营养化重要指标之一的近海营养盐浓度，超过国家一类海水水质标准的海域面积较 10 年前增加了近 1 倍。其中，长江口及其邻近海域溶解无机氮平均浓度连年超过四类海水水质标准，藻华灾害发生频率和影响面积居全国近海之首，底层缺氧现象不断加重，长江口水域已成为我国近海富营养化最为严重的水域。该水域是陆-海相互作用的交错带，具有许多独特的理化、生物特征和高生产力功能，生态环境敏感、脆弱，生物多样性和资源对富营养化的响应剧烈。相关调查研究表明，近 10~20 年来长江口水域水生生物物种明显减少，一些国家保护水生生物物种几乎灭绝，经济水产生物产量显著下降，河口生态系统呈现全面衰退的趋势，富营养化已成为该水域最严重的生态环境问题。所以，了解该水域富营养化的状况、揭示其形成机制和特点、提出相应的对策与方法，对该水域的生态环境保

护和地区经济的可持续发展具有十分重要的意义。

长期以来,我们十分关注长江口水域的生态与环境问题,早在20世纪80年代就针对该水域的生态环境状况进行了相关的调查与研究。近年来,在国家自然科学基金委员会、中国科学院等部门的支持下,又针对长江口水域富营养化问题进行了专题研究,对该水域富营养化问题有了一些新的认识 and 了解。这本专著就是我们多年来对长江口水域富营养化问题研究的总结和汇报,较为系统地论述了长江口水域富营养化现状、长期演变及其形成机制、特点和相应对策,以期能够对我国近海富营养化研究有所贡献,为政府相关部门有关近海富营养化的防控与管理提供参考。

全书共分七章:第一章对富营养化的概念进行了概述,包括富营养化的定义、成因和危害等,特别是针对目前国际上对富营养化尚无统一的定义,作者从起初人们对富营养化的认识,到现代在概念上的发展,阐述了富营养化定义应包含的三个要素,提出了作者对近海富营养化定义的观点。第二章主要基于历史资料,从长江、长江口门处和长江口邻近海域三个层次介绍了几十年来长江口水域营养盐及其结构的变化,分析了长江口水域浮游植物的长期演变特征和生态系统的响应,阐释了长江口水域富营养化的长期演变特点、过程和规律。第三章通过作者连续多年的季度航次调查,阐述了长江口水域水文、化学和浮游植物的季节变化与规律,阐明了长江口水域富营养化的现状与特点,并根据国内外富营养化评价的理论与方法,构建了长江口水域富营养化评价模型,对该水域的富营养化状况进行了科学的评价。第四章、第五章则根据长江口水域复杂的水文、化学和生物等特点,分别从长江径流、最大浑浊带、上升流、生物过程和湿沉降等方面,阐述了各个关键过程对该水域富营养化形成的影响。第六章分别从该水域对营养盐变化响应的敏感性分析、营养盐 LOICZ 收支模型与通量、低氧区的形成以及氮稳定同位素和磷化氢的分布等角度,分析了该水域富营养化的形成特点,在 POM 和 NPZD 基础上,建立了长江口水域富营养化的生态耦合模型,更深入地阐释了该水域富营养化的形成机制。第七章从长江口水域富营养化的宏观调控和综合整治两个方面,论述了长江口水域富营养化的控制原理与对策,基于滩涂湿地、底栖贝类、大型海藻等方法,提出了一些对该水域富营养化具有调控作用的生态修复方法。

由于富营养化是一个涉及水文、化学、生物、地质等多学科的科学问题,本研究具有明显的学科交叉性,更加体现团队合作的特点。所以,本专著也是团队成员互相合作、共同发展的成果结晶,他们分别参与了本书的编写,其名单分别标注于各节之后。除此之外,本成果的取得也得到了许多老一辈专家、同行的指导,得到很多同事、同学的支持,正是他们的默默奉献,才能形成今天的专著。在这里需要特别指出的是,我国著名的河口海岸理论与工程领域奠基人,国际欧亚科学院院士、中国工程院院士陈吉余先生十分关注和支持本研究的进展,在90岁高龄之际,还亲自为本书作序,充分体现了老一辈科学家对长江口水域富营养化问题的关注和对年轻一代的鼓励。

从海洋富营养化问题的提出至今仅60年左右。所以,相对其他学科,海洋富营养化还是一个年轻、充满很多未知的研究领域,人们对海洋富营养化的认识也处在不断发展、不断深入和不断丰富过程中。所以,本研究对长江口水域富营养化的认识仍然有很多的局限性,可能存在遗漏、不足。希望这些不足和缺憾能够在以后的研究中得以不

断地补充和完善,使本书能够成为我国近海富营养化未来研究的重要基石。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金重点项目(50339040)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-232)、国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(40821004)、国家高技术研究发展计划(2008AA09Z107)以及国家重点基础研究发展计划(2010CB428706)等项目的资助,在此一并表示感谢!

俞志明

2011 年元旦于青岛汇泉湾畔

目 录

序

前言

第一章 富营养化概述	1
第一节 富营养化的定义	1
第二节 富营养化的成因与危害	4
第三节 近海富营养化的概念与发展	12
第四节 世界主要国家近海富营养化现状	18
第五节 典型河口水域富营养化形成机制与特点	30
参考文献	40
第二章 长江口水域富营养化的长期演变过程	50
第一节 长江口环境及长期变化特点	50
第二节 长江口水域营养盐长期演变特点	63
第三节 长江口水域生态系统结构特点和演变	74
参考文献	91
第三章 长江口水域富营养化现状与评价	97
第一节 长江口水域水文环境现状	97
第二节 长江口水域水化学环境现状	114
第三节 长江口水域浮游植物群集组成结构与特点	144
第四节 长江口水域浮游植物生物量及结构特点	184
第五节 近海河口水域富营养化主要评价理论和方法	204
第六节 长江口水域富营养化现状评价	217
参考文献	243
第四章 长江营养盐的分布迁移及其对河口水域富营养化的影响	248
第一节 长江营养盐的分布和迁移	248
第二节 长江营养盐的输送通量	266
第三节 长江口高含量氮的主要来源和控制	284
第四节 长江和长江口磷的主要来源和控制	295
参考文献	304
第五章 长江口水域关键过程及其对富营养化的影响	310
第一节 长江口最大浑浊带磷和硅迁移及其对富营养化的影响	310
第二节 长江口上升流区营养盐动力学及其对富营养化的影响	323
第三节 长江口水域浮游植物关键过程对富营养化的影响	336
第四节 湿沉降对长江口水域富营养化的影响	349

参考文献	361
第六章 长江口水域富营养化的形成机制与生态模型	369
第一节 长江口水域对营养盐变化响应的敏感性分析	369
第二节 长江口水域氮稳定同位素分布特征及其环境意义	382
第三节 长江口水域沉积物中磷化氢及其对富营养化的影响	410
第四节 长江口水域低氧区的形成特征和影响因素	425
第五节 长江口水域营养盐 LOICZ 收支模型与通量	438
第六节 长江口水域富营养化生态模型	459
参考文献	486
第七章 长江口水域富营养化的控制方法与对策	497
第一节 河口富营养化的控制原理与方法	497
第二节 人工牡蛎礁对长江口生态系统的修复功能	511
第三节 长江口湿地在水体富营养化治理中的作用	522
第四节 金山城市沙滩人工潟湖水域生态修复工程实例	530
参考文献	544

彩图

Contents

Foreword

Preface

Chapter 1 Eutrophication overview	1
1.1 Definition of eutrophication	1
1.2 Causes and hazards of eutrophication	4
1.3 Concept of coastal eutrophication and its evolution	12
1.4 Eutrophication status in coastal waters of the major countries	18
1.5 Characteristics and mechanisms of eutrophication in the typical estuaries	30
References	40
 Chapter 2 Long-term change of eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	50
2.1 Environment of the Changjiang River estuary and its long-term change	50
2.2 Long-term change of nutrients in the Changjiang River estuary and adjacent waters	63
2.3 Characteristics and evolution of ecosystem structure in the Changjiang River estuary and adjacent waters	74
References	91
 Chapter 3 Eutrophication status and assessment in the Changjiang River estuary and adjacent waters	97
3.1 Status of hydrological environment in the Changjiang River estuary and adjacent waters	97
3.2 Status of chemical environment in the Changjiang River estuary and adjacent waters	114
3.3 Phytoplankton species composition and assemblage structure in the Changjiang River estuary and adjacent waters	144
3.4 Phytoplankton biomass and its ecological feature in the Changjiang River estuary and adjacent waters	184
3.5 Major assessment theories and methods on the coastal estuary eutrophication	204
3.6 Assessment on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	217

References	243
Chapter 4 Distribution and transport of nutrients in the Changjiang River as well as their effects on eutrophication in the estuary waters	248
4.1 Distribution and transport of nutrients in the Changjiang River	248
4.2 Transport flux of nutrients in the Changjiang River	266
4.3 Major sources and control processes of high nitrogen concentration in the Changjiang River estuary	284
4.4 Major sources and control processes of phosphorus in the Changjiang River and its estuary	295
References	304
Chapter 5 Key processes and their effects on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	310
5.1 Transport of phosphorus and silicone in the maximum turbidity zone and its effect on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	310
5.2 Dynamics of nutrients in upwelling area and its effect on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	323
5.3 Effect of the key biological processes of phytoplankton on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	336
5.4 Effect of wet deposition on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	349
References	361
Chapter 6 Evolution mechanism and ecological model of eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	369
6.1 Analysis on sensitivity of response to the change of nutrients in the Changjiang River estuary and adjacent waters	369
6.2 Distribution characteristics and its environmental implication of stable nitrogen isotopes in the Changjiang River estuary and adjacent waters	382
6.3 Phosphine in sediments and its effect on eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	410
6.4 Occurrence characteristics and influencing factors of hypoxia in the Changjiang River estuary and adjacent waters	425
6.5 LOICZ budget model and flux of nutrients in the Changjiang River estuary and adjacent waters	438
6.6 Ecological model of eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	459

References	486
Chapter 7 Management of eutrophication in the Changjiang River estuary and adjacent waters	497
7.1 Principles and methods on estuary eutrophication control	497
7.2 Restoration function of artificial oyster reef for the ecosystem of the Changjiang River estuary	511
7.3 Function of wetlands on eutrophication control in the Changjiang River estuary	522
7.4 A case study: Aquatic ecosystem restoration of an artificial lagoon, Jinshan city beach	530
References	544

Colour graphs

第一章 富营养化概述

第一节 富营养化的定义

富营养化 (eutrophication) 一词的英文词根来自于希腊语, 其中 “eu” 表示良好、“trope” 表示营养的意思。环境科学意义上的 “富营养化” 一词最早出现于 1907 年, 德国科学家 Weber (1907) 用它来描述泥炭沼泽地 (peat bogs) 的营养状况。他研究发现随着沼泽地营养状况的改变, 沼泽植物种类发生了变化: 起初是一种高浓度营养元素方能维持的沼泽植物, 他称之为富营养性 (eutraphent); 随着营养物质的不断消耗, 最后出现了一种耐低营养盐浓度的种类, 布满了沼泽的表面。为此, 他利用泥炭沼泽地所出现的不同植物, 将沼泽地的营养状况划分为富营养 (eutrophe)、中度营养 (mesotrophe) 和寡营养 (oligotrophe)。1919 年, 瑞典科学家 Naumann 在 Weber 研究的基础上, 将富营养化的概念扩展到湖泊、溪流等淡水体系。他认为应根据磷、氮和钙的浓度, 将水体分为贫营养、中度营养和富营养的不同类型。尽管这一观点较 Weber 对富营养化的认识更加深入和科学, 但是他没能给出划分不同营养水平水体的浓度值, 仍然沿用 Weber 的方法, 从感官上对湖泊水体类型进行了区分: 富营养化湖泊的水体会出现高密度的藻类、有浑浊现象; 而贫营养湖泊的水体清澈、蔚蓝。实际上这种简单的判定方法一直延续到现在: 在缺少其他有效参数的情况下, 透明度与水色依然是判断湖泊水体营养状况最简单的因子。

在随后的几十年里, “富营养化” 一词越来越多地应用于湖泊、江河等淡水体系, 人们围绕湖泊的不同营养类型 (Strom, 1930; Thienemann, 1921)、生物结构与特点 (Pennak, 1949; Griffiths, 1939)、富营养化的形成机制 (Hutchinson, 1973; Shapiro, 1973) 等进行了广泛的讨论与研究, “富营养化” 一词逐渐成为描述淡水体系营养状况的重要词语。

相对于淡水湖泊, 人们对海洋富营养化的认识较晚。富营养化作为海洋环境问题首次引起人们的关注是在 20 世纪 50 年代, 美国长岛 Moriches 湾频繁发生藻华, 导致牡蛎大量减产。研究人员发现, 主要是由于沿岸鸭禽养殖业的迅速发展, 导致营养盐的增加所致 (Ryther, 1954)。尽管在这之后的一段时间里, 人们对海洋中的营养盐、藻华等问题给予了一定的关注, 但是 “富营养化” 一词真正出现在海洋环境研究的科学论著中是在 70 年代初, Ryther 和 Dunstan (1971) 研究了 Moriches 湾藻华发生的富营养化环境与特点, 从氮、磷营养盐结构、分布及其与微藻生长、人类活动的关系等角度, 首次阐述了营养盐在近海水域富营养化中的作用, 认为单独减少磷的输入不能降低近海水域的富营养化, 氮才是控制近海水域微藻生长和富营养化的关键限制因子。

从 20 世纪 70 年代开始, 海洋环境中的 “富营养化” 一词越来越多地出现在不同的期刊与杂志上。人们针对美国最大的河口海湾——切萨皮克湾 (Chesapeake Bay) 的研

究发现,富营养化现象已逐渐成为该水域的重要环境问题,1979年美国环境保护署举办了“首届河口水域营养盐加富效应”的国际研讨会(Neilson and Cronin, 1981)。1985年欧洲科学家Rosenberg发表了一篇具有影响性的文章《富营养化——未来海洋沿岸的烦恼》认为,过去几十年营养盐的陆源输入,已经为欧洲一些国家的沿海奠定了富营养化的基础,富营养化症状最初出现在波罗的海(Baltic Sea),随后慢慢扩展至卡特加特(Kattegat)海峡和贝尔特(Belt)海的瑞典和丹麦沿岸,并将成为欧洲沿海各国未来发展面临的重要问题。90年代,美国大气海洋局(NOAA)启动了美国“河口富营养化评估”计划,以期对美国各大河口水域富营养化的状况、起因等有一详尽的了解。1999年该计划初步预测,如果不加控制的话,到2020年美国约超过一半的河口富营养化现象将进一步加重(Bricker et al., 1999)。

随着人们对海洋富营养化认识的逐渐深入,世界资源研究所(World Resources Institute)研究发现,至今全球超过415个近海水域处于富营养化状态(Selman et al., 2008)。对美国和欧洲的调查显示,美国78%的近海水域和欧洲大西洋沿岸65%的近海水域出现了富营养化症状(Bricker et al., 2008; OSPAR, 2003a)。正像2000年美国国家科学研究委员会(National Research Council, NRC)在其报告中指出的那样,现今“富营养化已成为威胁近海生态系统健康最主要的因素之一”(National Research Council, 2000)。

综上所述,人类对富营养化的认识是一个由陆地到水体、由淡水到海洋,不断扩展、不断深入的过程,至今不过100多年的历史。特别是对于海洋富营养化的认识历程更短,对富营养化的定义多达十几个,主要从富营养化的原因和效应两方面进行描述,至今没有一个统一的定义,对富营养化的概念和认识在不断地丰富和完善中。

人们对富营养化的认识主要起源于环境的营养状况,所以很多关于海洋富营养化的定义是围绕环境中的营养物质展开的。例如,20世纪90年代初欧盟委员会(European Commission)在城市废水处理导则(UWWT Directive)中将富营养化定义为:由于营养盐(特别是氮和磷)导致的水体加富现象,并引起藻类和其他更高级植物加速生长,对水质和生态平衡产生不良影响(Council Directive 91/271/EEC, 1991)。以该定义为基础,又进一步发展出一些其他有关富营养化的定义。例如,在欧盟的硝酸盐导则(EC Nitrates Directive)中将富营养化进一步定义为:由于氮化合物导致的水体加富现象,并引起藻类和其他更高级的植物加速生长,对水质和生态平衡产生不良影响(Council Directive 91/676/EEC, 1991),这一定义的提出主要考虑到在某些特殊水域农业氮流失对富营养化的影响占主导作用。与之类似,奥斯巴委员会(OSPAR Commission)在海洋富营养化定义中对“营养盐加富”做了进一步的阐述,指出其“是由于人类活动而导致的营养盐加富现象”(OSPAR, 2003b),从而区别于一些因为自然因素产生的富营养化。Jørgensen和Richardson(1996)认为导致富营养化可以有人为和自然两种因素,而通常我们所指的主要是那些由于人类活动而产生的富营养化现象。

上述富营养化定义中的营养物质主要针对营养盐,有些学者认为引起海洋富营养化的营养物质不应仅仅是营养盐,还应包括其他物质,所以一些富营养化定义中还包括了有机物的影响(Anonymous, 2004)。无论进行何种补充和修订,以上富营养化定义都

是围绕环境中的“营养物质加富”展开的。换句话说,上述富营养化定义主要强调了富营养化的起因。这种定义的优点是可操作性、指导性强,直接检测水体中的营养物质即可,有利于从源头上防控富营养化。所以,至今很多专业性的导则中大都使用这类定义。但这类定义在科学上不够严谨,使人们很容易将海洋富营养化仅仅理解为海水中营养物质过多。实际上富营养化(eutrophication)与营养过多(hypernutrification)在科学意义上有明显的不同(Maier et al., 2009):前者不仅仅反映水体中营养物质的水平,同时强调了由于营养物质的增加而引起的环境效应;而后者则主要是指水体中营养物质的水平,并不包含其是否对生态环境产生影响。因为富营养化是一种由于水体加富后的变化过程,既有“前因”(营养因子),又有“后果”(效应),有些水体营养盐浓度很高,但没出现由此产生的生态环境效应,我们仍不能称之为富营养化,所以海水中营养物质过多并不意味着海洋富营养化。上述定义主要强调营养物质加富,对其效应没有做明确的阐述,仅仅使用“不良影响”、“加速生长”等词汇进行描述,不够明确,特别是“加速生长”一词不够严谨和准确(Andersen et al., 2006)。

除了上述从“起因”上定义富营养化之外,还有一类富营养化定义主要是针对其效应进行的。例如,Gray (1992)、Khan 和 Ansari (2005)等分别从营养盐加富后对水体的直接影响和间接影响等方面对富营养化进行了定义。其中最具代表性的是1995年Nixon提出的富营养化定义:富营养化是指水域中有机质的积累速度增加。这是至今有关富营养化最为简短的定义,在人们对富营养化传统认识的基础上做了进一步的归纳,更加强调了富营养化的症状——水体中有机质的增加。由于导致水体中有机质增加的因素很多,所以该定义并没有仅仅限定于传统认识的营养盐加富,还隐含着能够导致有机质积累速度增加的一切因素。另外,该定义中的“有机质”也不只局限于浮游的初级生产力,还包括更高级的植物和底栖藻类的初级生产力以及来自于邻近水域、陆地或点源输送的有机质。由此可见,尽管该定义短小,但是对富营养化的描述较其他的定义更加宽泛,所以是目前在学术论文中经常被引用的富营养化定义。但是该定义也存在一定的不足:过分强调了富营养化中的效应要素,将富营养化的起因隐含在效应之中,没有强调富营养化是一个过程而不是一个营养状态这一特点,没有能够明确反映出构成富营养化的其他关键要素。

针对这一不足,美国1999年在“国家河口富营养化评估”中,强调了富营养化是一种由于营养盐增加而导致水体中生产力(有机质)增加的过程(Bricker et al., 1999)。与之类似,Vollenweider (1992)、de Jonge 和 Elliott (2001)从水体营养盐加富、Richardson 和 Jørgensen (1996)从营养状态改变等“过程”角度,对富营养化进行阐述。在这些富营养化定义中,均强调了富营养化是一个过程而不是一个营养状态这一特点。

综上所述,由于富营养化的复杂性,不同学者从不同角度归纳出了富营养化的一些特点,对富营养化进行了定义。相关定义多达十几个,至今尚没有一个标准的或统一的定义。纵观这些富营养化定义,尽管各不相同,但都离不开构成富营养化三个基本要点:原因、效应、过程。所谓原因主要是指引发富营养化的一些因素,在大部分的富营养化定义中主要是指营养盐,也有部分定义包括了有机营养成分,正如前面所说,通常