

海湾生态过程与持续发展

焦念志 等著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书以胶州湾等典型海湾为代表,对海湾生态系统主要生源要素 N、P、Si 和有机碳的主要存在形式及其动态变化规律、海洋初级生产光动力学、初级生产过程的粒级特征、PDOC 释放的制约机制、新生产力、初级生产力的结构、浮游生物群落营养吸收动力学与营养吸收和再生通量、超微型生物在海湾生态系统的地位和作用、浮游生物种类组成与数量变动规律、作用于浮游植物的上下行效用、海洋生源气候气体二甲基硫(DMS)的生物生产基本规律与调控机制、典型生物和化学污染物的生态毒理效应、以及海湾环境生物监测等与资源、环境密切关联的生态过程热点和前沿领域作了较系统的论述。并在考察胶州湾水文、物理、沉积、水质、营养盐等理化环境指标以及生物因子的长期变化趋势的基础上,对引起海湾营养盐结构长期变化的原因作了较深入的分析,对营养盐结构变化正在或可能引起的生态系统结构与功能上的变化与后果进行了探讨。书中还就海湾渔业资源特点、海水养殖对生态系统的影响、养殖区的生态渔业管理等目前人们所关心的问题作了分析论述,同时探讨了海湾生态系统环境分析预警预测数值模型。

本书可供海洋科研单位、政府部门有关人员、大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

海湾生态过程与持续发展/焦念志等著.-北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-008999-5

I. 海… II. 焦… III. 海湾-生态系统-研究 IV. Q178.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81688 号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2001年9月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—1 000 字数:501 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前言

海洋生态学的研究可大致划分为观测研究、过程研究和系统研究三个层次或阶段。我国 20 世纪 80 年代以前的研究大多属于观测研究。90 年代初以来在一系列大型国际研究计划, 如“全球海洋通量联合研究 (JGOFS)”、“沿岸带陆海相互作用 (LOICZ) 研究”、“全球海洋生态系统动力学 (GLOBEC) 研究”等的推动下, 我国的海洋生态学研究迈入了一个崭新的时期。不仅在观测研究上注重多学科联合, 而且开始了较深入的过程研究, 并向着系统研究发展。与此同时, 另一个强劲的节奏也汇入海洋科学的乐章, 这就是海洋生态系统可持续发展研究。随着经济的飞速发展, 人类对其赖以生存的地球正施以越来越大的环境压力, 作为高密度人口居住区的沿海地区, 则首当其冲。维护海湾生态系统的生态环境、保障沿海社会、经济健康发展已成为共识。然而, 在开展系统研究和促进可持续发展中的一个突出问题是, 缺乏对有关生态过程全面、深入的了解。在这种情况下, 国家自然科学基金委员会以“典型海湾生态系统动态过程与持续发展 (39630060)”为题立项重点项目, 在以胶州湾为代表的典型海湾开展了较系统的研究。本书主要内容即来自该项目的主要成果。本书中的绝大部分数据均为第一手资料, 涉及若干创新领域, 如超微型生物研究方法及其生态作用、胶体有机碳、生源气候气体 DMS、环境生物监测新技术、生态毒理效应等。同时将作者先期在若干前沿领域如新生产力、初级生产力结构、浮游生物群落生源要素循环等的成果结合进来, 使有关知识逐渐得以系统化。

有必要说明, 上述过程研究, 特别是持续发展方面的研究得以开展, 还得益于中国生态系统研究网络胶州湾生态研究站 (JERS) 的支持。JERS 所提供的野外工作条件是有关过程研究的基础, 而 JERS 长期以来积累的多学科时间序列资料, 则是持续发展研究的前提。参加本书撰写的主要人员及主笔内容 (以目录为序) 为: 焦念志 (绪论、第 3、4、5、7、9、14 章)、赵卫红 (第 1、2 章)、杨燕辉 (第 5 章)、吴玉霖、张永山 (第 6 章)、王勇 (第 7 章)、张武昌、马喜平 (第 8 章)、杨宇峰 (第 8、15 章)、柳承璋 (第 9 章)、李钧、周名江 (第 10 章)、王文琪 (第 11 章)、赵淑江 (第 12、13 章)、卢继武、吴耀泉、张法忠 (第 15 章)、崔茂常、龚建新 (第 16 章)。

海湾生态过程与持续发展是一个宏大的命题。尽管作者力图深入探讨有关的过程、机制, 并注重多学科集成和系统性, 从微观 (超微型生物) 到宏观 (海湾复合生态系统)、从环境因子到生物群落、从基础理论到渔业生态学管理、从现场实验到数值模拟……但本书涉及的内容还只是这一前沿领域的一部分, 而所获得的成果也只能是初步探索的结晶。对于作者而言, 它既是我们以往工作的总结, 也是我们下一步拓展的基础; 而我们将它呈奉给读者, 则希望藉此与更多的同行进行交流, 共同推动这一领域研究的不断深入和细化。

由于作者水平所限, 加之成书仓促, 书中以及研究工作中不当和错误之处, 恳请读者批评指正。

作者谨识

2001 年 1 月 18 日

第一篇 绪 论

绪 论

1. 海湾生态过程与可持续发展研究的意义

人口的增长、资源的开发和环境的破坏使得地球生态系统的维持能力正日益下降,保护生物圈、维护生态系统的持续发展已成为全球范围内亟待解决的重大问题。海洋作为地球系统的主要组分,在提供可再生资源、调节全球气候和维持生态平衡中起着举足轻重的作用,而海湾是整个海洋中与人类关系最密切的部分:海湾是全球单位面积生物生产力最高的区域,是人类可利用生物资源的重要生产基地;海湾地区也是人类活动最为频繁的地区,是社会与经济发展的重要组成部分;海湾又是陆、海相互作用以及人为干扰作用的强烈承受区域,是环境变化的敏感区和生态系统的脆弱带。因而,海湾是进行生态系统动态过程研究的最佳场所,也是可持续发展研究的优先区域。

我国是一个沿海大国,有着长达 18 000 km 的海岸线,跨越温带、亚热带和热带等气候带,众多的海湾蕴藏着丰富的自然资源,大部分海湾地区成为人类生活、生产和社会活动的活跃地带。目前,我国近 1/3 的人口居住在沿海地区,沿海地区的工农业总产值占全国总产值的 60% 以上。海湾复合生态系统已成为我国经济、社会发展整体系统中的一个重要组成部分。沿海经济(工业、农业、养殖业、外贸、运输、能源产业以及旅游业等)无不与海湾生态系统息息相关。然而,过去很长一段时间以来,由于缺乏可持续发展的思想,业已造成一系列严重后果:一方面,各种人类活动造成的环境污染和急功近利的掠夺性开发,已造成严重的资源衰退和生态系统失衡;另一方面,破坏了生态系统又通过种种反馈作用制约着沿海经济的持续发展。而我国主要海湾生态系统的动力学机制尚不明了;在维持生态系统持续发展方面也面临着一些相当严峻的问题。显然,针对典型海湾生态系统进行深入的调查研究,查明其生态学过程和动力学机制、以及动态变化规律和关键制约因子,对于保护海湾资源与环境、维持生态平衡、制定相关产业的经济战略和生态管理措施、进而保证沿海经济持续、稳定地向前发展,具有重要意义。

2. 国内外研究现状

海洋生态系统动态过程是全球性的研究热点。国际地圈与生物圈计划(IGBP)中与海洋有关的分计划,如“全球海洋通量联合研究”(JGOFS)(IGBP core project, 1990)、“沿岸带陆海相互作用研究”(LOICZ)(IGBP core project, 1993)、“表层海洋与低层大气研究”(SOLAS)(IGBP core project, 1995)等都将其列为主要研究内容,其重点是在全球尺度上了解碳等生源要素的生物地球化学循环及其资源、环境效应。而以国际海洋研究科学委员会(SCOR)和政府间海洋学委员会(IOC)发起的“全球海洋生

态系统动态研究”(GLOBEC)则也是以此为中心目标,旨在了解海洋生态系统对全球变化的响应与反馈的过程与机制。由美国科学家 K. Shelman 倡导、UNDP 和世界银行支持的“大海洋生态系统研究”(LMEs)(UNESCO, 1993)强调对海洋生态系统的动态监测与管理,这项计划的前提和基础也是对海洋生态系统动态过程与调控机制的了解。现全球海洋已被划出 49 个大海洋生态系统,覆盖了世界 95% 以上的海洋生物资源产量。正在启动实施的“全球海洋观测系统”(GOOS)将在全世界海洋范围内展开大尺度、多学科的动态监测,将为预测海洋和沿岸生态系统自然变化和人为干预及其环境效应、并最终为地球生态系统持续发展提供科学依据。“持续发展的生态系统”这一概念继美国生态学会于 1990 年在“创建可持续发展的生物圈(SBI)”计划中率先提出并加以系统化之后,1992 年巴西“联合国环境与发展大会”上,“持续发展”成为大会的中心议题并在更广泛的意义上受到重视和加以传播。从此,持续发展的思想被人们所普遍接受、持续发展的生态系统成为全球性的优先研究领域。目前,上述各大联合研究计划正在全球范围内逐步展开工作,JGOFS 已实施 10 年,并获取了大量有关生态系统动态规律和物质通量的数据资料,目前已进入“综合集成”阶段。LOICZ、GLOBEC 及其地区性计划[如,北太平洋科学组织(PICES)(PICES-GLOBEC Science Plan, 1994)的气候变化与承载力(CCCC)计划]也已付诸实施。

就生态系统动态过程研究而言,在研究水平上,早期的研究主要是生态因子调查,后来发展到室内模拟实验和现场实验研究。研究内容包括:理化、水文、环境因子以及能量、营养输入与初级生产者、微生物二次生产者、浮游动物、底栖生物、游泳生物的群落组成、生物量、生产力、生产过程的相互作用与耦合机制;无机物(如:营养盐)与有机物之间、溶解有机物(DOM)与颗粒有机物(POM)之间、生命体与非生命体之间、不同营养级之间的物质分配和能量流动等。在表达方法上,早期多为种间竞争、捕食关系模型,此后发展到营养吸收动力学模型、生态过程、食物链模型。20 世纪 80 年代以来,随着对环境和全球变化的重视,大尺度的物理过程和生态过程的耦合越来越被强调。生态系统动力学成为跨学科、综合性的研究课题,有关模型也提高到宏观生态系统水平。就研究实例而言,全球规模最大、最为成功的当为欧洲北海生态动力学研究,已建立了相应的区域海洋生态系统模型(ERSEM MAST - 1 programme report, 1993)。此外还有美国和加拿大对东海岸的乔治浅滩生态系,西海岸的加利福尼亚上升流生态系,及切萨皮克湾生态系、圣劳伦斯湾生态系等研究工作(Frost, 1993)。切萨皮克湾是美国国家基金委(NSF)陆缘生态系统计划(LMER)的重点观测站,已在生物生产力、生源要素的循环、生态过程等方面积累了大量的数据资料,并为有关的研究计划和经济决策做出重要贡献。在可持续发展方面,日本濑户内海当属典型代表。这个面积 2.2 万 km²、被工业区包围的海湾 70 年代曾是日本环境污染最严重、生物资源破坏最厉害的海区,经过实施环境治理与资源保护等措施,特别是“渔业资源持续生产与环境保护”计划(1992~1995),使其生态条件大为改善,走上了持续发展的道路。

我国的海洋生态系统动态研究尚处在起步和发展阶段。过去的几次较大规模的海洋普查提供了海洋生态环境基本参数的第一手资料。20 世纪 50 年代以来,全国范围的调查有:“全国海洋普查”、“全国海岸带考察”、“全国海岛调查”、“全国海洋渔业区划”;地区范围的有“烟威渔场调查”、“舟山渔场调查”、“东海大陆架调查”、“中美长江口、

南黄海合作调查”、“三峡工程对长江口生态影响调查”、“台湾浅滩渔场和上升流调查”、“黑潮调查”、“西沙考察”、“南沙考察”、“西北太平洋考察”等。可以说，我们对中国近海各生态系统的基本特征（水文、物理、地质、化学、生物、环境、生态等）已经有了一个大体的了解，而动态过程 and 变化规律研究尚嫌太少。

最近几年，我国的海洋科学工作者积极追踪国际前沿发展趋势，成立了 JGOFS、LOICZ、GLOBEC 等中国委员会，并组织实施了相应的中国研究计划。这些工作为促进我国海洋生态学研究与国际前沿接轨创造了良好的前提，并已在若干方面取得重大进展，尤其是在多学科交叉、渗透和综合集成方面翻开了我国海洋科学研究全新的一页。此外，一大批的国家“攻关”、“基金”、“重大基础研究”项目也在各自的研究领域内取得开拓性成果，使我国的海洋生态学研究的整体水平上了一个新台阶。本书的主要内容即是国家自然科学基金委重点项目在胶州湾、烟台芝罘湾及毗邻海区四十里湾等代表性的海湾关于海湾生态系统动态过程与可持续发展方面的有关研究成果。

3. 代表性海湾生态环境特征

本书主要讨论的典型海湾主要有代表高度城市化的胶州湾（青岛）和代表浅海养殖型的四十里湾（烟台芝罘湾及毗邻海区）。此外，部分问题还涉及大亚湾、南澳湾等海区。

胶州湾

胶州湾位于黄海之滨、山东半岛南岸（北纬 $35^{\circ}55'$ ~ $36^{\circ}18'$ ，东经 $120^{\circ}04'$ ~ $120^{\circ}23'$ ），面积约 390 km^2 ，平均水深 7 m ，是一个典型的半封闭型海湾（图 1a）。

胶州湾属暖温带季风型气候，多年平均气温为 12.3°C ，年总太阳辐射量为 $480 \sim 518 \text{ kJ/cm}^2$ ，总日照时数为 $2\,400 \sim 2\,650 \text{ h}$ ， $>15^{\circ}\text{C}$ 的年平均积温为 $3\,326^{\circ}\text{C}$ 。降水量为 $725 \sim 1\,100 \text{ mm}$ ，主要集中于夏季。胶州湾潮汐为典型的半日潮，平均潮差为 2.71 m 。潮流为往返半日潮，流速在湾口处最大，可达 180 cm/s 。胶州湾海水盐度相对稳定，年平均约为 31‰ 。海水溶解氧丰富，约为 $4.2 \sim 8.0 \text{ mg/L}$ ，pH 值为 $7.7 \sim 8.2$ 。营养盐多年平均浓度为 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$: $0.37 \text{ }\mu\text{mol/L}$ ， $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$: $1.2 \text{ }\mu\text{mol/L}$ ，总无机氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$): $9.4 \text{ }\mu\text{mol/L}$ 。COD 平均含量约为 1.44 mg/L ，PON 浓度约为 $0.04 \sim 0.15 \text{ mg/L}$ ，POC 约为 $0.25 \sim 0.70 \text{ mg/L}$ （董金海、焦念志，1995）。

良好的自然条件，孕育着丰富多样的生物群落。胶州湾浮游植物已鉴定的种类约 175 种。近年初级生产力平均为 $503 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。浮游动物生物量约 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。已鉴定种类有 110 种。底栖动物平均生物量为 $73.6 \text{ g}/\text{m}^2$ ，栖息度为 $203.6 \text{ 个}/\text{m}^2$ ，产量最高的经济底栖动物是菲律宾蛤仔。此外，胶州湾是多种经济鱼、虾蟹类的繁殖、育幼和索饵场所，也是对虾、扇贝、海带等经济物种的增养殖基地（刘瑞玉，1992）。

胶州湾四周为青岛市、胶州市、胶南市所包围，形成了高度密集的沿湾产业区。胶州湾与周边社会经济体系已构成了一个多元化的复合生态系统。工农业生产、港口开发、交通运输、商业贸易、旅游观光、居民生活等各类活动无不与胶州湾联系在一起，环胶州湾经济圈的持续发展问题已成为政府、群众和科学家共同关心的事情。目前胶州湾入海的十几条河流（如大沽河、南胶莱河、洋河、海泊河、李村河、白沙河等）的相

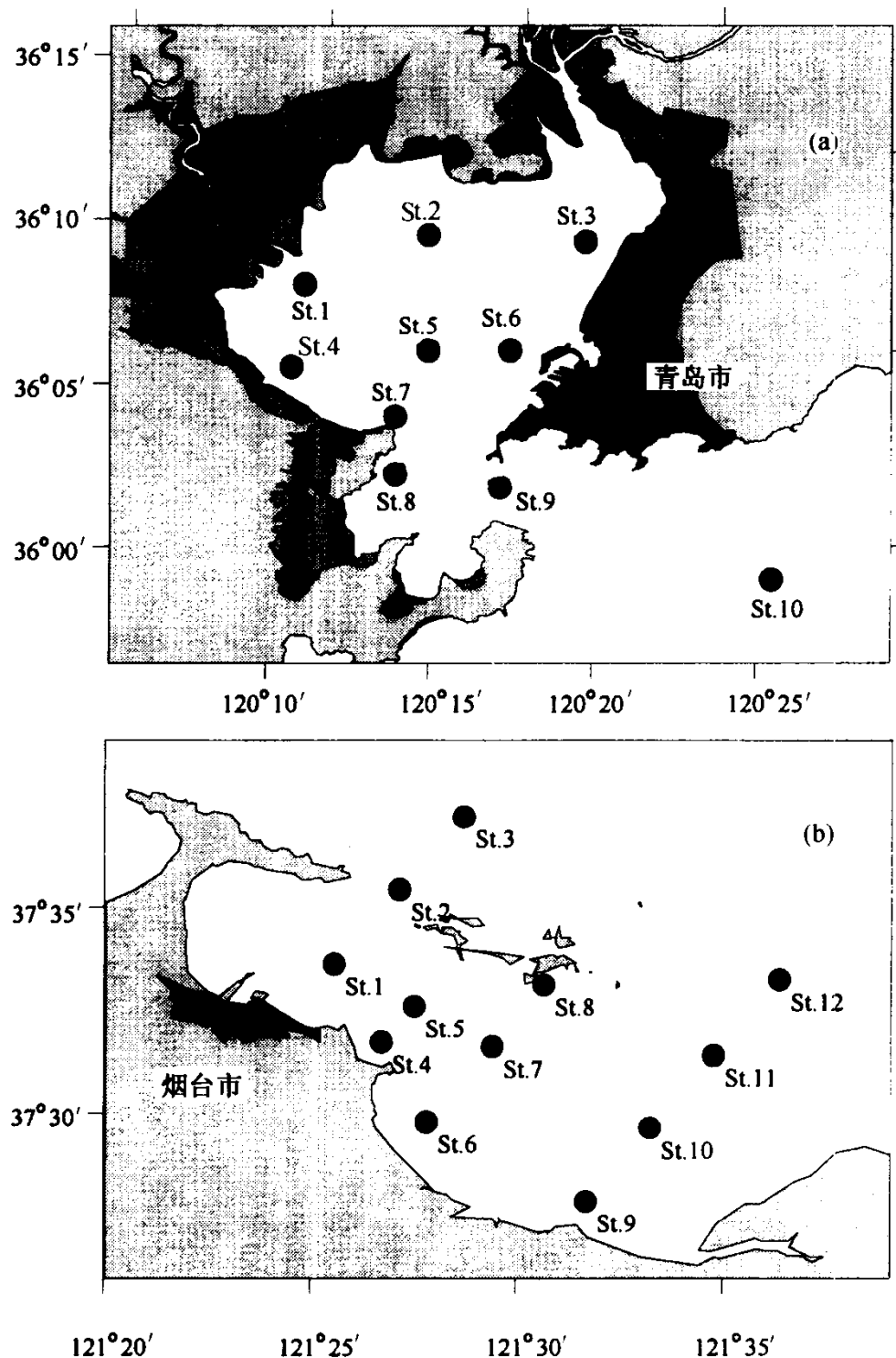


图1 胶州湾 (a) 和芝罘湾及毗邻海区四十里湾 (b) 地理位置
以及采样站位 (图中圆点代表采样点位置)

Fig.1 Geographic locations of the Jiaozhou Bay (a) and the Zhifu-Sishili Bay (Closed circles indicate sampling sites)

当部分已成为周边城镇工农业生产和居民生活的排污渠道 (刘瑞玉, 1992), 构成了外源有机物质和污染物的重要来源 (康兴伦等, 1990; “胶州湾环境质量评价和自净能力研究” 课题组, 1990)。胶州湾东部的青岛港和湾口西部的黄岛码头^① 以及正在建设的前湾港也是胶州湾海水污染的重要来源。其他人类活动 (包括养殖、捕捞等经营开发)

^① 吴永成等, 1990, 胶州湾环境质量评价和自净能力研究; 胶州湾及邻近海域溢油污染范围数值预报, 1991。中国科学院海洋研究所研究报告。

也都给予胶州湾生态系统以强烈影响。此外,即将建设的胶州湾跨海大桥为中国第一、世界第二大的桥梁,在促进胶州湾地区社会、经济发展、繁荣的同时,繁忙的交通运输以及由此带来的环境效应也必将对胶州湾生态系统带来更大的环境压力。胶州湾的自然环境与周边社会-经济复合体,已成为高度人为干预下的多功能复合生态系统。胶州湾已成为未来发展型海湾的一个典型代表,同时也是进行生态系统动态进程与可持续发展研究的一个良好对象。

芝罘湾及毗邻海区四十里湾

烟台芝罘湾及毗邻海区(121°20′~40′E, 37°25′~40′N)包括芝罘湾、金沟湾和四十里湾等海区。湾口宽 26 km, 纵深 13 km。水深除湾口附近超过 10 m, 最深达 20 m 以上外,其余海区的水深均在 10m 以内。而且由湾口向湾底逐渐变浅。它三面邻陆,一面向海,是一个耳状半封闭性海湾(图 1b)。湾内海底为泥沙质,地形平坦。

该海区多年平均日照时数 2 400~2 600 小时,日照百分率为 55%~60%。年平均降水量 737.9mm,全年降水多集中在 7, 8 月份。全年表层平均水温为 12.50℃。海水盐度 29.56‰~31.25‰。透明度夏半年(4~9 月)平均值为 3.5~7.7m,而冬半年(10 月~翌年 3 月)为 0.9~5.0m。潮汐型属正规半日潮,多年平均潮差为 1.66m。该海区潮流复杂,总的特点是涨潮流速小于落潮流。该海区主要有 6 条河流入海:通伸河、通伸西河、罗锅桥河、海流路河、西南河和解放路河(赵迎春等, 1989; 姚兰芳, 1991)。

四十里湾是我国开展浅海筏式养殖较早的海湾之一,20 世纪 40 年代初就开始了海带和裙带菜养殖试验。此后,以海带为主要品种的浅海养殖逐渐发展起来。从 20 世纪 60 年代初期开始滩涂贝类养殖。70 年代末到 80 年代初,扇贝人工育苗获得成功,扇贝养殖由试验阶段向大面积生产过渡。以海参为主的海珍品增殖养殖也有了较快的发展。1985 年起海湾扇贝在该海区安家落户,成为主要的养殖品种之一。

目前,浮筏养殖主要的对象有贻贝(*Mytilus edulis*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)和海带(*Laminaria japonica*)。养殖面积分别为:扇贝 830 hm² (6 000 笼为 1 hm², 贻贝同),贻贝 460 hm², 海带 250 hm² (6 000 绳为 1 hm²)^①

近年来烟台四十里湾养殖海区的扇贝死亡率明显增加,研究表明,原因是综合性的,其根本问题是长期超容量的养殖导致养殖环境的恶化(郭新堂, 1992; 隋锡林等, 1996)。

该海区是我国北方浅海养殖最具代表性的海区之一。

4. 本书涉及的主要问题

在生态过程方面,本书讨论的主要问题包括:海湾生态系统 N, P, Si 等主要生源要素的水平和时空变化规律及其影响因素;海湾生态系统有机物质的主要存在形式——

① 杨红生, 1998, 大规模海水养殖区环境容量研究, 博士后出站报告。

溶解有机碳 (DOC) 与颗粒有机碳 (POC) 以及胶体有机碳 (COC) 的动态变化规律; 海洋初级生产过程及其光动力学、初级生产的粒级特征、PDOC 释放的制约机制、新生产力、初级生产力的结构; 浮游生物群落营养吸收动力学与营养吸收和再生通量; 超微型生物在海湾生态系统的地位和作用; 浮游植物、浮游动物种类组成与数量变动规律; 作用于浮游植物的上下行效应; 海洋生源环境气候气体二甲基硫 (DMS) 的生物生产动态规律与调控机制; 典型生物和化学污染物的生态毒理效应; 以及海湾环境生物监测等直接与资源环境密切关联的生态过程热点和前沿领域。

在持续发展方面, 作者在考察胶州湾水文、物理、沉积、水质、营养盐等理化环境指标以及生物因子的长期变化趋势的基础上, 结合胶州湾复合生态系统周边社会、经济因素, 对引起海湾营养盐结构的长期变化的原因作进一步的分析, 并对营养盐结构变化正在或可能引起生态系统结构与功能上的变化与后果进行探讨。书中还就海湾渔业资源特点、海水养殖对生态系统的影响、养殖区的生态渔业管理等目前人们所关心的问题作了基本的分析论述。同时在建立海湾生态环境 GIS 数据库、生态环境分析预警系统以及海湾生态系统数值模型等方面作了有益的探讨。

参 考 文 献

- 董金海、焦念志, 1995, 胶州湾生态学研究, 科学出版社。
- 郭新堂, 1992, 养殖扇贝死亡原因及防治方法探讨, 齐鲁渔业, (6): 45~46。
- 康兴伦等, 1990, 胶州湾自净能力的研究, 黄渤海研究, 8 (3): 48~56。
- 刘瑞玉, 1992, 胶州湾生态学和生物资源, 科学出版社。
- 隋锡林等, 1996, 大连浮筏养殖太平洋牡蛎死亡原因的调查与分析, 水产科学, 15 (5): 3~7。
- 姚兰芳, 1991, 烟台芝罘湾流场特征的分析, 黄渤海研究, 9 (3): 43~49。
- 赵迎春等, 1989, 芝罘近海渔场水文、化学特性的研究, 齐鲁渔业, (2): 36~38。
- ERSEM MAST - 1 Programme Report, 1993. European regional model-Some tentative results. Brussels, pp. 1~17.
- Frost, B. W., 1993. A modelling study of processes regulating plankton standing stock and production in the open subarctic Pacific Ocean. *Prog. Oceanog.* 32: 17~56.
- GLOBEC—Global Ocean Ecosystem Dynamics, 1993. Draft GLOBEC. International Science Plan, GLOBEC INT International Secretariat University of Maryland, Chesapeake Biological Laboratory PO Box 38, Solomons, Maryland 20688, USA. pp. 1~55.
- JGOFS—Joint Global Ocean Flux Study, IGBP core project 1990, Ms. E. Tidmarsh, Executive Secretary JGOFS, SCOR Secretariat, Department of Oceanography, Dalhousie University, Halifax, N. S. B3H 4J1, pp. 1~61.
- LMEs UNESCO, 1993. Assessment & Monitoring of Large Marine Ecosystem. IOC/INF-942, pp. 1~51.
- LOICZ—Land and Ocean Interaction in the Coast Zone, IGBP core project, 1993. Ed. T. S. Hopkins & C. A. Kinder, NC. USA, pp. 1~429.
- PICES PICES-GLOBEC Science Plan for Climate Change and Carrying Capacity, 1994. N. Brent Hargreaves, Chairman of PICES-GLOBES' 94 Workshop Steering Committee. pp. 1~24.
- SOLAS—Surface Ocean and Lower Atmosphere Study, IGBP core project, 1995.

(焦念志)

第二篇 海湾生态过程

第1章 生态系统营养动力学

氮、磷、硅是海洋生物繁殖生长不可缺少的化学成分，在海洋学上，把氮、磷、硅称为“生源要素”。由于这些元素参与生物生命活动的整个过程，它们的存在形态与分布受到生物的制约，同时受到化学、地质和水文因素的影响，所以它们的含量和分布并不均匀也不恒定，有着明显的季节性和区域性变化。同时浮游植物的生长又会受到营养盐的调节，在一定的浓度范围内，营养盐对浮游植物的生长有促进作用，但如果营养盐浓度过低，则会对浮游植物的生长产生限制作用，过高易产生富营养化，进一步会发展成为赤潮。胶州湾和烟台四十里湾是我国北方两个典型的温带海湾。胶州湾的自然环境与周边社会-经济复合体目前已成为高度人为干预下的多功能复合生态系统，是生态环境监测的典型站点，也是持续发展的重点研究对象；烟台四十里湾海区是我国北方浅海养殖最具代表性的海区之一。本章以这两个海湾为典型，通过胶州湾 1997~1999 年及烟台四十里湾 1997~1998 年的调查资料，研究海湾生态系统的营养盐的存在形态、分布变化规律、营养盐动态变化的调控机制。

1.1 海湾营养盐的存在形态及观测方法

1.1.1 海水中营养盐的存在形态

海水中的营养盐一般按过滤法分为溶解态和颗粒态，而两者又各分为无机态和有机态。当然这种划分并非是热力学上的严格划分，因为用过滤法划分的溶解态部分，还有一部分是较小粒径的胶态形式存在的，海洋胶体的研究是当今海洋学发展的一个热点，对重新认识海洋中的物质循环具有重要意义。

1.1.1.1 氮

海水中的氮气几乎处于饱和状态，但它不能被绝大多数的植物所利用，它只有转化为氮的化合物后才能被绝大多数的植物所利用。氮化合物在海水中存在形态较多，主要有可溶解的 NH_4^+ (NH_3)， NO_2^- ， NO_3^- 三种无机化合氮、有机氮化合物和不溶于海水的颗粒氮，其中有机氮主要为蛋白质、氨基酸、脲和甲胺等一系列含氮有机化合物。颗粒氮包括活的生物组织及碎屑物质、黏土矿物吸附的无机氮。这些氮化合物处于不断的相互转化和循环之中。海洋浮游植物通常利用的是溶解无机氮，在无机氮缺乏时也可以利用部分溶解有机氮如氨基酸、尿素等 (Fogg, 1975)。

1.1.1.2 磷

海水中的溶解无机磷主要以正磷酸盐的形式存在，在 pH 为 8.0 的海水中约有 1%

以 H_2PO_4^- 形式存在, 87% 为 HPO_4^{2-} , 12% 为 PO_4^{3-} (Kester and Pytkowicz, 1967)。溶解有机磷则有核酸-聚磷酸盐、脱氧核酸、磷酸酯、氨基磷酸等成分, 它们主要来自生物体分解和排泄产物。颗粒磷主要包括活体生物组织、碎屑有机磷、吸附于黏土等矿物的无机磷、磷矿石等。生物可利用的磷主要来源是陆地岩石风化, 其中只有 5%~10% 是以溶解态进入海洋, 绝大部分以悬浮颗粒物的形式被带入海洋, 其中部分可以解吸, 具有潜在的生物活性 (Froelich, 1988)。浮游植物通常吸收利用溶解无机磷。在磷酸盐较多的时候, 浮游植物可以吸收过量的磷酸盐, 贮存于体内, 当磷酸盐耗尽时, 还可以维持浮游植物的生长 (Fogg, 1975)。磷酸盐缺乏时, 部分藻类还可利用部分溶解有机磷, 如在一些藻类细胞表面可分泌碱性磷酸酶可将部分磷酸酯类化合物水解成磷酸盐被细胞利用 (Perry, 1972; 洪华生等, 1992)。浮游植物代谢过程可向胞外释放有机磷, 有机碎屑在细菌作用下可分解成有机及无机磷释放到海水中以供浮游植物继续吸收利用。

1.1.1.3 硅

海水中硅以溶解和颗粒两种形式存在, 在海水的 pH 值在 7.7~8.3 情况下, 硅酸解离很小, 主要以硅酸分子形式存在 ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。此外, 还有一部分发生聚合, 形成多硅酸 ($x \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$), 因为聚合程度不等, 所以分散在海水中多硅酸的颗粒大小不同。通常将海水中单分子和低聚合度的硅酸及其离子称为溶解的无机硅, 其中只有 5% 的溶解硅以离子形态 (H_3SiO_4^-) 存在。颗粒硅中除包括聚合度大的胶体状态之外, 尚还有黏土及含硅的碎屑等。通常用硅钼黄或硅钼蓝法测定海水中单分子或低聚合度的硅酸 (聚合度不大于 2) 总称为“活性硅酸盐”, 它容易被硅藻吸收。

1.1.2 海水中营养盐的观测方法

1.1.2.1 样品的采集与保存

水样用有机玻璃采水器采集, 取 300~500 mL 水样, 用直径 25 mm 的 GF/F (Whatman) 滤膜过滤, 滤膜使用前在 450℃ 下预灼烧 4 小时。收集约 100 mL 滤液于 120 mL 聚乙烯瓶中, 加入 200 μL 氯仿于 -20℃ 下冷冻保存, 用于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, $\text{SiO}_4 - \text{Si}$ 、溶解总氮 (DTN)、溶解总磷 (DTP) 的测定。另取一 120 mL 聚乙烯瓶收集未过滤水样 -20℃ 下冷冻保存, 用于总磷 (TP) 的测定。将附有颗粒物的滤膜于 -20℃ 下保存, 用于测定颗粒氮 (PN), 用另一膜于滤液中浸润后取出冷冻保存作为空白膜。

1.1.2.2 分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, $\text{SiO}_4 - \text{Si}$ 用 Skalar San&plus 微量自动分析系统分析。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用酚-次氯酸钠法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用 Cd-Cu 还原后重氮偶氮法, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用重氮偶氮法测定; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用抗坏血酸-磷钼蓝法测定, $\text{SiO}_4 - \text{Si}$ 采用硅钼蓝法测定。溶解无机氮 (DIN) 为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 之和。溶解总氮 (DTN)、溶解总磷 (DTP) 和总磷 (TP) 采用 Valderrama (1981) 方法消解

后，利用自动分析测定水样中的硝酸盐和磷酸盐的含量。溶解有机磷（DOP）为溶解总磷与溶解无机磷之差，颗粒磷（PP）为总磷与溶解总磷之差。溶解有机氮（DON）为溶解总氮与溶解无机氮之差，颗粒氮（PN）样品采用杨鹤鸣等（1995）方法用 PE 240 CHN 元素分析仪测定，总氮（TN）为 DTN 与 PN 之和。

（赵卫红）

1.2 典型海湾氮的动态变化特征及其调控机制

1.2.1 胶州湾的氮

1.2.1.1 氮的结构及含量

表 1.1 列出了胶州湾各航次的各种形态氮的浓度范围及平均值，表 1.2 给出了各形态氮占 TN 的平均百分比，表 1.3 列出了三种溶解无机氮占 DIN 的平均百分比。胶州湾 TN 含量范围在 14.78~121.43 $\mu\text{mol/L}$ ，溶解态占 85% 以上，其中有机氮占 TN 的

表 1.1 胶州湾各种形态氮的含量 ($\mu\text{mol/L}$)
Tab. 1.1 The amount of different nitrogen forms in Jiaozhou Bay ($\mu\text{mol/L}$)

采样时间 (年, 月)	项目	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	DIN	DON	PN	TN
1997. 9	范围	1.37~25.48	0.37~3.04	0.16~1.10	2.47~28.39	7.02~38.14	0.11~3.68	15.38~57.29
	平均值	6.44	1.51	0.46	8.41	22.49	1.58	32.49
1997. 12	范围	3.03~31.98	1.09~6.76	1.70~2.84	7.05~41.51	11.77~16.84	1.46~6.14	23.24~57.88
	平均值	8.42	2.45	2.42	13.29	14.66	2.97	30.92
1998. 2	范围	3.01~18.16	0.21~2.06	0.07~0.51	3.34~20.35	13.31~62.78	0.00~6.86	17.60~87.61
	平均值	6.28	0.78	0.29	7.35	27.44	3.89	38.69
1998. 4	范围	2.65~18.21	0.64~6.36	0.25~1.47	3.78~26.02	5.91~28.92	1.60~5.79	14.78~43.70
	平均值	6.57	2.30	0.57	9.43	14.28	3.11	26.82
1998. 8	范围	1.44~17.06	0.66~34.09	0.26~7.41	2.86~45.54	7.42~57.51	1.14~23.38	16.09~117.37
	平均值	4.43	7.67	1.78	13.88	24.69	5.13	43.70
1998. 11	范围	0.32~22.46	0.99~12.99	1.30~5.13	3.34~38.92	14.08~38.28	2.30~12.86	23.30~80.20
	平均值	4.87	3.50	2.67	11.04	21.05	5.30	37.39
1999. 2	范围	3.99~59.77	0.67~13.59	0.23~3.09	4.99~76.46	5.61~32.98	1.34~12.00	17.67~121.43
	平均值	10.36	2.88	0.72	13.96	14.34	4.18	32.47
1999. 5	范围	2.33~12.90	0.58~8.80	0.16~2.01	3.60~21.93	10.42~32.84	1.46~5.12	17.89~48.60
	平均值	5.25	2.67	0.51	8.43	19.75	2.77	30.95
1999. 8	范围	1.64~11.54	0.16~1.83	0.15~0.91	2.00~14.28	16.86~41.60	2.63~8.82	23.07~53.10
	平均值	3.42	0.52	0.32	4.27	27.28	4.85	36.40
平均含量		6.23	2.70	1.08	10.01	20.66	3.75	34.42

表 1.2 胶州湾 DIN, DON, DTN, PN 占 TN 平均百分比 (%)

Tab.1.2 The percents of DIN, DON, DTN and PN in TN in Jiaozhou Bay

采样时间 (年.月)	DIN	DON	DTN	PN
1997.9	26	69	95	5
1997.12	39	51	90	10
1998.2	20	69	89	11
1998.4	34	54	88	12
1998.8	28	62	90	10
1998.11	26	59	85	15
1999.2	37	50	87	13
1999.5	27	64	91	9
1999.8	11	76	87	13
平均	27	62	89	11

表 1.3 胶州湾氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮占 DIN 平均百分比 (%)

Tab.1.3 Percents of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in DIN in Jiaozhou Bay

采样时间 (年.月)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$
1997.9	72	21	7
1997.12	57	19	24
1998.2	85	11	4
1998.4	72	22	6
1998.8	46	43	11
1998.11	38	31	31
1999.2	72	22	6
1999.5	65	29	6
1999.8	80	12	8
平均	65	23	12

50%~76%，胶州湾 DIN 含量范围在 $2.00 \sim 76.46 \mu\text{mol/L}$ ，占 TN 的 11%~39%。DIN 是浮游植物生长吸收的主要氮源，其中平均 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占 65%， $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占 23%， $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 占 12%。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是 DIN 的主要存在形式。60 年代、80 年代和 90 年代初 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别占无机氮的 79%、78% 和 79%，变化不太大，是浮游植物生长的主要氮源（中国科学院海洋研究所水化学研究组，1982a, 1982b；沈志良等，1994；沈志良，1995）。90 年代末， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 比例有所回落， $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的比例有所增加，但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仍为主要存在形式。