

胶州湾集水盆地生源要素的 流失与海湾的富营养化演变

JIAOZHOUWAN JISHUI PENDI SHENGYUAN YAOSU DE
LIUSHI YU HAIWAN DE FUYINGYANGHUA YANBIAN

张 经◎主编

 海洋出版社

胶州湾集水盆地生源要素的 流失与海湾的富营养化演变

张 经 主编



海洋出版社

2013 年 · 北京

内 容 简 介

本书中的内容是基于国家自然科学基金委员会资助的重点项目：“胶州湾流域生源要素的流失与海湾富营养化演变过程”（项目编号：40036010）研究工作的结果写成，其中也包括对前期研究工作的归纳和总结。书中涉及的内容包括物理海洋学、近海沉积动力学、化学海洋学与生物地球化学、生物学等诸多领域，集中体现在对胶州湾富营养化演变过程的分析和认知方面。

读者对象是大学高年级的学生、研究生，从事近海环境科学研究和管理的专业人员。

图书在版编目（CIP）数据

胶州湾集水盆地生源要素的流失与海湾的富营养化演变 /
张经主编. — 北京：海洋出版社，2013.7

ISBN 978 - 7 - 5027 - 8622 - 9

I. ①胶… II. ①张… III. ①黄海 - 海湾 - 富营养化研究
IV. ①X55

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 161100 号

责任编辑：高 英 于秋涛

责任印制：赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编：100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店发行所经销

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月北京第 1 次印刷

开本：787 mm × 1092 mm 1/16 印张：24.75

字数：535.08 千字 定价：88.00 元

发行部：62132549 邮购部：68038093 总编室：62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

编委会名单

主 编：张 经

编 委：（按拼音顺序排列）

白 洁	刘东艳	刘贯群	刘广山
刘素美	刘 哲	任景玲	魏 皓
杨世伦	张桂玲	张 经	

前言

PREFACE

尽管自 20 世纪 90 年代以来，陆-海相互作用问题成为国际上的一个热点研究领域，而且无论在学术界或者在社会舆论范围，人们业已认识到，尽管在陆地和海洋交互地域发生的“事件”，但会产生对社会和经济发展以及那里的生态系统的可持续性具有重要的乃至“不可逆转”的后果，但真正能够将针对“陆地”和“海洋”进行的研究工作整合在陆-海相互作用的框架之下，似乎并不是一件容易的事情，这中间的原因是多方面的，其中一点大概是同针对“陆地”和面对“海洋”的科学问题的时、空尺度不尽相同，以及相应的研究工作所面临的社会发展的需求不同有关。

在 21 世纪初，国家自然科学基金委员会资助我们开展了针对“胶州湾流域生源要素的流失与海湾富营养化演变过程”（项目编号：40036010）的研究项目，为期四年（2001-2004）。在此期间，项目组试图通过将针对伴随着半封闭海湾富营养化所产生对生态系统的负面影响，同周边集水盆地的生源要素与痕量物质流失方面的研究工作结合起来，以期刻画胶州湾富营养化过程的历史变化特点及其中的因果关系。通过剖析外部营养盐输送的变化与内部循环对海湾富营养化演变的不同贡献，认识胶州湾同开阔的黄海之间的水交换对生源要素的输运、周边集水盆地生源要素流失的数量、胶州湾内生物的合成与分解代谢作用相关的生源要素的更新和补充等方面的科学问题。

历史上，针对胶州湾地区的研究工作背景较好、资料丰富，这帮助我们能够在一定程度上认识这个地区富营养化的变化特点，并对生态系统在未来的演化趋势做出一些预测，期望项目的研究成果，能够为胶州湾地区未来发展的空间规划和管理决策提供一些分析依据。

在 2001-2004 年项目实施期间，我们在胶州湾和周边的集水盆地，组织了 10 余次针对不同季节和年际变化的多学科观测和样品采集工作，野外和海上的观测内容包括物理和水文、悬浮沉积物的分布格局、生源要素的循环和利用、大气的干/湿沉降与痕量气体的排放、沉积物-水界面交换、痕量元素与放射性同位素的迁移特点、地表与地下水对化学物质收支的贡献、环境变化的沉积记录等诸多方面的内容。基于对上述内容所取得研究数据的分析，在 2004 年项目结题时，我们取得了一些新的认知。

- 在普林斯顿大学海洋模型（POM）基础上建立了一个三维的物理-生物耦合模型，数值模拟的结果给出了胶州湾中水体的存留时间大约为 50 天左右，模型计算结果得到包括镭同位素和盐度等观测资料的支持。

- 估算出胶州湾向大气释放 CH_4 和 N_2O 的年通量分别约为 $8 \times 10^6 \sim 18 \times 10^6 \text{ mol/a}$ 和 $1.1 \times 10^6 \sim 2.2 \times 10^6 \text{ mol/a}$; 胶州湾每年向黄海输送的甲烷量约为 $2.7 \times 10^6 \text{ mol/a}$ 。

- 白沙河是胶州湾周边地区地下水向海输送水量和营养盐的主要地区。20 世纪 80 年代以来, 集水盆地的土地使用类型的转变和污染物的排放, 已经显著地改变了地下水向海洋输送营养盐的数量和结构。

- 胶州湾的沉积速率在 1 cm/a 的水平, 悬浮颗粒物中的非矿物质成分的含量可达 90% 以上, 这反映出该地区的悬浮颗粒物组成受到排污的明显影响。

- 对比不同来源的营养盐, 胶州湾的 PO_4^{3-} 主要来自河流输送和污水排放, 可占总入湾量的 94%; NO_3^- 主要来自河流输送, 占总输入量的 67%; NH_4^+ 主要来自污水排放 (占 87%), 其次是河流输送 (9%) 和大气沉降 (4%); SiO_3^{2-} 主要来自河流输入 (80%)。

- 过去的几十年中, 胶州湾生源要素的浓度和分布格局发生了显著变化, 从 20 世纪 60 年代到 90 年代, PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 浓度分别增加了 1.4、4.3、3.9 和 4.1 倍。

- 通过对胶州湾的调查以及与历史资料比较研究, 发现硅藻的优势物种已经发生更替, 沉积物中记录的硅藻组成改变, 反映了气候、温盐结构以及营养盐等变化对水体中初级生产力结构的影响。

- 在胶州湾中, 无机磷酸盐是胶州湾异养浮游细菌生长的重要限制因子之一, 异养浮游细菌可与浮游植物之间形成就营养盐之间的竞争关系。

- 通过数值模拟方式刻画了影响氮、磷、硅等生源要素, 在胶州湾输运过程以及与外海的交换量。结果表明, 湍混合强度跨量级的变化可能会引起模拟结果产生显著地差异。

在“胶州湾流域生源要素的流失与海湾富营养化演变过程”(项目编号: 40036010) 研究项目结束若干年之后, 我们回过头来对当年的研究结果和实验数据进行重新审视, 发现来自陆地和沿海区域的人类活动, 对胶州湾以及中国其他半封闭海湾中生态系统的改变, 是如此迅速, 以至于科学研究在区域尺度上, 是在不断地应对所面临的新问题, 当初的研究成果也带有我们对自然界认知的历史“烙印”。

参与本书写作的作者有: 第一章: 张经 (华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、白洁 (中国海洋大学 环境科学与工程学院)、高会旺 (中国海洋大学 环境科学与工程学院)、刘东艳 (中国科学院 烟台海岸带研究所)、刘贯群 (中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、中国海洋大学 环境科学与工程学院)、刘广山 (厦门大学 环境与生态学院)、刘静 (山东省青岛市环境保护科学研究所)、刘素美 (中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、刘哲 (中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室)、任景玲 (中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、孙鹤鲲 (山东省青岛市环境保护科学研究所)、汪景庸 (中国海洋大学 海洋环境学院)、魏皓 (天津科技大学 海洋科学与工程学院)、杨世伦 (华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张桂玲 (中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室); 第二章: 刘哲 (中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、魏皓 (天津科技大学 海洋科学与工程学院); 第三章: 刘贯群 (中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、中国海洋大学 环

境科学与工程学院)、朱新军(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、王树英(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、叶玉玲(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、廖小青(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、袁瑞强(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、刘素美(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第四章:杨世伦(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、朱骏(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张经(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室);第五章:刘素美(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第六章:刘广山(厦门大学 环境与生态学院);第七章:任景玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第八章:张桂玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第九章:刘东艳(中国科学院 烟台海岸带研究所);第十章:白洁(中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、中国海洋大学 环境科学与工程学院)、李岍然(中国海洋大学 海洋生命学院)、张昊飞(国家海洋局东海环境监测中心)、李佳霖(中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、中国海洋大学 环境科学与工程学院);第十一章:刘贯群(中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、中国海洋大学 环境科学与工程学院)、朱新军(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、王树英(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、叶玉玲(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、廖小青(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、袁瑞强(中国海洋大学 环境科学与工程学院)、刘素美(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张经(中国海洋大学 化学化工学院、华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室);第十二章:杨世伦(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、李鹏(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、郜昂(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张文祥(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张经(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室);第十三章:刘素美(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、戚晓红(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、罗忻(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、叶曦雯(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、李肖娜(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、吴莹(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张国森(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、任景玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张桂玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张经(中国海洋大学 化学化工学院、华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室);第十四章:任景玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张经(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、谢亮(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、李丹丹(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、程岩(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第十五章:张桂玲(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张经(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、许洁(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室)、张峰(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室);第十六章:刘东艳(中国科学院 烟台海岸带研究所);第十七章:白洁(中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室、

中国海洋大学 环境科学与工程学院)、李岩然(中国海洋大学 海洋生命学院)、张昊飞(国家海洋局东海环境监测中心)、刘东艳(中国科学院 烟台海岸带研究所)、刘广山(厦门大学 环境与生态学院)、李佳霖(中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室;中国海洋大学 海洋环境科学与工程学院);第十八章:刘哲(中国海洋大学 环境与生态教育部重点实验室、华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、张经(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室)、魏皓(天津科技大学 海洋科学与工程学院);第十九章:刘广山(厦门大学 环境与生态学院)、贾成霞(厦门大学 环境与生态学院)、魏皓(天津科技大学 海洋科学与工程学院);张经(华东师范大学 河口海岸国家重点实验室)、黄奕普(厦门大学 海洋与地球学院)、陈敏(厦门大学 海洋与地球学院)。

本书所报告的实验数据与认知,其主体来自于课题组成员在2001-2004年期间,执行国家自然科学基金委员会的重点项目:“胶州湾流域生源要素流失与海湾富营养化演变过程”所取得的研究成果。在此,我们感谢国家自然科学基金委员会对胶州湾研究项目的资助,感谢上海市科委在项目实施期间给予的支持;诚挚地感谢参加项目工作的老师和学生,他(她)们的辛勤工作与创造使研究目标得以实现。借此机会,也感谢青岛海洋大学(现中国海洋大学)和华东师范大学的科研管理部门,在本项目的申请与实施期间给予的关心和帮助。

“胶州湾流域生源要素的流失与海湾富营养化演变过程”

项目组

目次

CONTENTS

第一篇 前期研究成果评述

第一章 胶州湾：从集水盆地中生源要素的流失到海湾的富营养化	3
1.1 问题的提出	3
1.2 胶州湾集水盆地的近期变化	6
1.3 关于胶州湾富营养化问题的前期工作	10
1.4 国家自然科学基金委员会重点项目的工作概述	12
第二章 胶州湾物理因子特征与生态模型	19
2.1 前言	19
2.2 气象、水文特征	20
2.3 水动力与水体更新周期	21
2.4 生态模型研究	23
2.5 结论	25
第三章 胶州湾周边地区地下水向胶州湾营养盐输送	28
3.1 国内外研究现状	28
3.2 胶州湾周边前人所做水文地质工作	34
3.3 胶州湾周边水文地质条件	35
3.4 地下水向胶州湾的水量及营养盐输送概况	36
3.5 结论	44
第四章 胶州湾沉积环境研究述评	48
4.1 沉积物来源	48
4.2 悬沙特征	51
4.3 湾内外水沙交换	53
4.4 沉积速率	59

4.5	底质沉积物特征和运动方向	61
4.6	海湾沉积环境的变迁	62
4.7	今后海湾的发育趋势	63
第五章	胶州湾富营养化的研究现状	66
5.1	前言	66
5.2	胶州湾环境概况	66
5.3	水体中生源要素的分布	68
5.4	胶州湾生源要素 40 年的变化	70
5.5	生源要素的再生	72
5.6	胶州湾生源要素的质量收支	74
5.7	胶州湾富营养化研究中存在的主要问题	75
第六章	半封闭海湾的同位素海洋学——兼论放射性同位素方法进行胶州湾的海洋学 研究	79
6.1	前言	79
6.2	用于近岸海域海洋学研究的放射性同位素	79
6.3	半封闭海湾的同位素海洋学	83
6.4	胶州湾同位素海洋学研究展望	85
第七章	胶州湾污染物研究概况——以重金属污染为例	90
7.1	污染物的主要来源	90
7.2	污染物研究概况	91
第八章	海洋中溶解 CH_4 和 N_2O 研究进展	113
8.1	前言	113
8.2	海洋中溶解 CH_4 研究现状及进展	113
8.3	海洋中溶解 N_2O 研究现状及进展	117
8.4	目前研究中存在的问题	121
8.5	我国海水中溶解 CH_4 和 N_2O 的研究现状	121
第九章	胶州湾浮游植物研究的历史回顾	129
9.1	胶州湾浮游植物种类组成特征	129
9.2	胶州湾浮游植物生物量特征	138
9.3	胶州湾浮游植物群落的结构特征	139

9.4 结语和建议	140
第十章 海洋异养浮游细菌生态作用的研究现状	144
10.1 前言	144
10.2 海洋异养浮游细菌在微食物环中的作用	145
10.3 异养浮游细菌在碳循环中的作用及对海洋生物泵效应的影响	145
10.4 异养浮游细菌对含氮营养盐的作用	146
10.5 异养浮游细菌对无机磷酸盐的作用	147
10.6 异养浮游细菌在硫的生物地球化学循环中的作用	148
10.7 异养浮游细菌生态作用的研究展望	148
 第二篇 胶州湾的富营养化的演变过程	
第十一章 胶州湾周边地下水向海湾营养盐输送	155
11.1 研究区自然地理概况	155
11.2 地质及水文地质条件	162
11.3 地下水向海湾输送水量的计算方法和营养盐采样与测试方法	172
11.4 地下水向胶州湾的水量及营养盐输送	174
11.5 影响地下水和营养盐输送的因素	181
11.6 结论	182
第十二章 胶州湾悬浮颗粒物的组成和浓度变化	185
12.1 前言	185
12.2 研究区概况	186
12.3 采样与分析方法	187
12.4 研究结果和讨论	188
12.5 结语	199
第十三章 胶州湾营养元素的动力学	204
13.1 前言	204
13.2 材料与方法	205
13.3 胶州湾的营养盐	208
13.4 胶州湾硅的生物地球化学循环	222
13.5 胶州湾磷的生物地球化学研究	228

第十四章 胶州湾溶解态铝、砷的生物地球化学行为	243
14.1 前言	243
14.2 采样与分析方法	244
14.3 结果	246
14.4 讨论	258
14.5 结论	266
第十五章 胶州湾溶解 CH_4 和 N_2O 的生物地球化学特征	274
15.1 前言	274
15.2 采样与分析方法	275
15.3 结果与讨论	278
15.4 结论	301
第十六章 胶州湾浮游植物群落结构演替	306
16.1 前言	306
16.2 采样与分析方法	307
16.3 结果	307
16.4 讨论	313
第十七章 胶州湾异养浮游细菌的生态特征及影响因素	317
17.1 前言	317
17.2 采样与分析方法	318
17.3 结果	321
17.4 讨论	325
17.5 结论	329
第十八章 胶州湾物理环境变化特征的分析与富营养化过程的数值研究	332
18.1 前言	332
18.2 胶州湾物理环境多尺度变化特征	332
18.3 胶州湾富营养化过程的数值模拟研究	341
18.4 结论	359
附录	363
第十九章 胶州湾水体 ^{234}Th 和 ^{210}Pb 分布与颗粒物清除	365
19.1 前言	365

19.2	样品的采集与测量	365
19.3	水体中 ²³⁴ Th、 ²¹⁰ Pb 的含量与分布	367
19.4	水体 ²³⁴ Th 和 ²¹⁰ Pb 颗粒动力学模型简述	372
19.5	²³⁴ Th 清除、迁出通量和停留时间的估算	374
19.6	²¹⁰ Pb 的清除、迁出通量及停留时间的估算	377
19.7	结语	379

第一篇



前期研究成果评述

第一章

胶州湾：从集水盆地中生源要素的流失到海湾的富营养化

1.1 问题的提出

从研究工作的角度讲，近海的生态系统是一个复杂的体系，它所具有的功能受到来自陆地和海洋的多重驱动作用的影响。因而，近海生态系统为人类社会所提供的服务也在气候与人类活动的制约之下存在不同时、空范围的明显变化(图 1.1)。

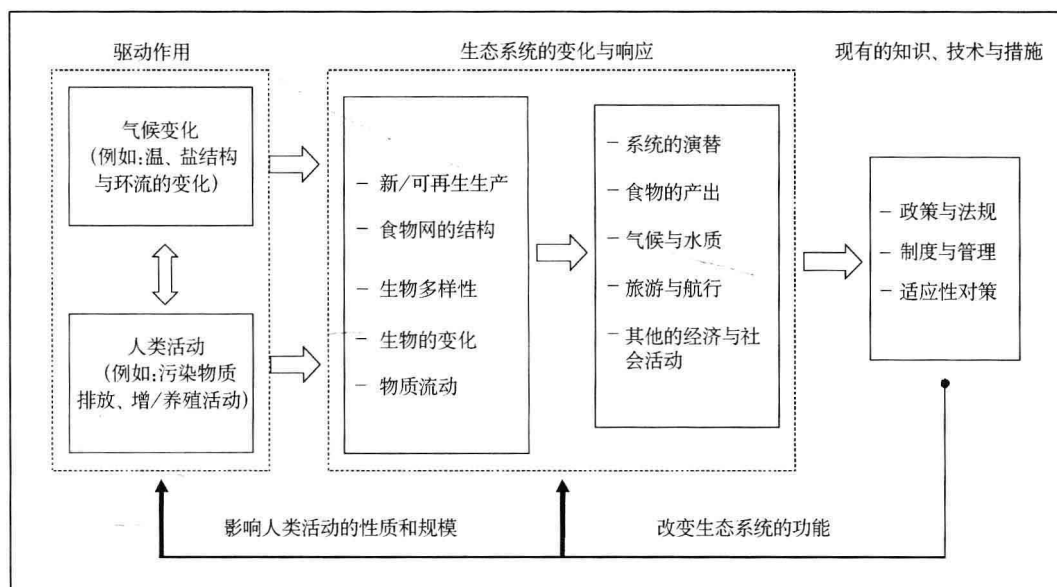


图 1.1 近海生态系统的结构与功能受到来自自然过程与人类活动组合构成的多重驱动作用的影响，它所提供的服务也因我们的知识水平和政府采取的管理措施而发生改变；最终所有这些因素都会影响生态系统的演化，只是在学术界目前有限的认知能力下，许多为我们所不知晓

[注：根据张经(2011)的结果修改]

近岸水域的富营养化在过去的 50 年中已经成为全球性海洋环境的灾害性问题，其后果常常是形成高生物量(即：high bio-mass)水体，并可引发灾难性的赤潮事件。目前已有研究数据表明，伴随着富营养化，有害赤潮(即：HAB—harmful algal blooms)的出现频率、

影响范围及其带来的危害确实显著地增加了(GEOHAB, 2001)。伴随着陆地向海洋排放的污染物质的增加,某些植物性营养元素(即: plant nutrients)在近岸环境中被利用、积累与再生,不同元素之间的比例关系也发生了改变。近海富营养化亦会促使水体中浮游生物的群落结构发生变化,并且通过食物网作用于整个生态系统,系一种“上行效应”(例如:多瑙河—黑海与密西西比河—墨西哥湾)。这种情况从20世纪40年代以后,在发达国家、稍后60-70年代于发展中国家都开始成为十分普遍的环境问题,并且在今后相当长一段时间仍然难以改善。与流域中生源要素流失相伴的富营养化常常引起近海生态系统发生难以逆转的变化(例如:生态系统多样性问题),并且对人类的生存环境产生直接威胁(GEOHAB, 2001, 2003)。

20世纪90年代,在欧洲与北美洲海洋环境污染控制与生态系统健康的一些国际计划中,将富营养化问题的研究放在十分重要的位置(ECOHAB, 1995; EUROHAB, 1998)。20世纪末与21世纪初,联合国教科文组织政府间海洋委员会(IOC)与国际海洋科学研究指导委员会(SCOR)发起了国际赤潮的生态学与海洋学计划(即: GEOHAB—Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms)。在GEOHAB的科学实施计划中(GEOHAB, 2001, 2003),强调陆源植物性营养盐的输入与近海富营养化之间的内在联系,以及由此引起的海洋生物群落组成和结构的变化,并作用于生态系统的功能和其所提供的服务。如果从近海水域富营养化的发生与演化过程的特点分析,比较重要的影响因素应该包括:

- 陆源植物性营养元素(例如:氮、磷等)的过量排放并在近海水域中的积累,对研究的海洋体系来讲提供的是“新生产力”;
- 主要生源要素(即:氮、磷、硅、碳等)在水域内不断地再生与循环并对浮游生物的群落产生影响,由此影响“可再生生产力”的贡献;
- 近海环境中主要生源要素之间的比例发生了改变,结果是形成某一种或几种元素相对亏损,另外一些营养盐出现相对过剩的局面;
- 研究的水域与开阔海洋之间的水交换不畅,表现的特点是体系中的水交换在时空尺度上比较缓慢,水域中植物性营养盐被积累;可再生生产力的贡献增加。

然而,在许多情况下上述诸情况往往缠结在一起,不同的因素之间以各自的特点相互叠加,同时发生作用,使得陆地生源要素的流失同近海富营养化之间的联系愈加复杂。

在以往对富营养化的研究中比较多地注重地表水与污染物排放的影响,而地下水、大气沉降与地表冲刷(例如:面源的问题)对物质输送的贡献被忽视(Zhang, 1994; Moore, 1996; Paerl, 1997)。然而,研究表明,随着对地表水污染的有效控制,污染物通过地下水、大气沉降等从流域向海洋的输送作用日益显著(Behrendt et al., 2002)。流域土壤/植物对不同的营养盐与污染物质的保持能力(即: retention)或者说营养盐与污染物在流域存留时间的差异,也影响了植物性营养盐在近海环境中的行为、归宿以及其对生态系统的作用(例如:营养盐限制)。