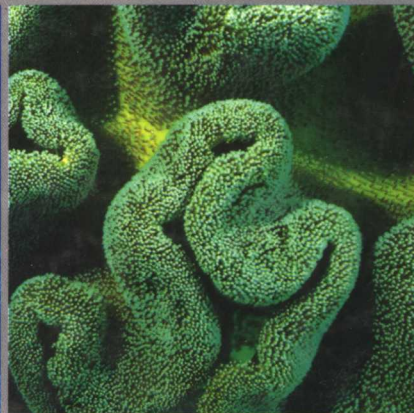
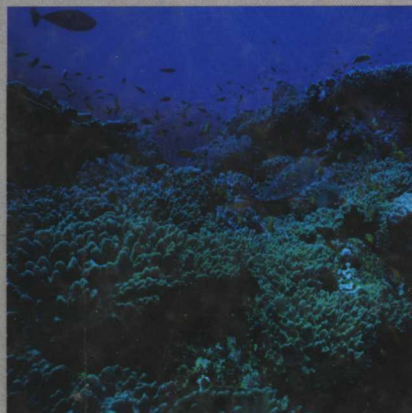


中国近海 生物地球化学

自 20 世纪 80 年代开始实施的全球性研究计划，把海洋生物地球化学这一海洋学研究的核心推到了全球变化研究的前沿，并成为其中的聚焦点，从此，世界各国不同学科的科学家致力于此研究，十几年来取得了该领域前所未有的进步，突出地表现在两个方面，即海洋学研究实现了空前的学科交叉，海洋学过程研究获得了从未有过的深入系统的结果。尽管海洋学过程异常复杂，但运用海洋生物地球化学的观点方法和通过多学科的集成，已使过去非常模糊的这些过程较清晰地展现在了人们面前。现在，恐怕很少再有人用单纯学科的观点去解决海洋学的问题了，可以这样说，十几年海洋学研究的进步很大程度上体现在海洋生物地球化学的发展上。

ZHONGGUOJINHAI SHENGWU DIQIUHUAXUE

宋金明 著



山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

山东省泰山科技专著出版基金会资助出版

中国近海生物地球化学

宋金明 著

山东科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国近海生物地球化学/宋金明著. —济南: 山东科学技术出版社, 2004.6

ISBN 7-5331-3382-X

I. 中... II. 宋... III. 近海-生物地球化学-中国 IV. P734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 005257 号

山东省泰山科技专著出版基金会资助出版

中国近海生物地球化学

宋金明 著

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)2098088

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: adkj@jn-public.sd.cninfo.net

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)2098071

印刷者: 山东新华印刷厂临沂厂

地址: 济南市胜利大街 56 号

邮编: 250001 电话: (0531)2079112

开本: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 39

字数: 875 千

版次: 2004 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7-5331-3382-X

P·36

定价: 98.00 元

作者简介



宋金明,男,海洋化学家,博士、研究员、博士生导师,国家杰出青年科学基金、中国科学院“百人计划”、“中国青年科技奖”与国务院政府特殊津贴获得者。

现任中国科学院海洋研究所所长助理、中国科学院海洋研究所海洋化学研究中心主任、中国科学院研究生院教授、中韩黄海环境联合研究中方首席科学家,兼任中国海洋湖沼化学会理事长、中国海洋化学学会副理事长、青岛市海洋化工行业技术中心主任。

1964年4月出生于河北省枣强县,1985年毕业于长春地质学院(现吉林大学)并获应用化学工学学士学位,后在中国科学院海洋研究所获硕士和博士学位。2002~2003年以高级访问学者身份在加拿大不列颠哥伦比亚大学留学并进行合作研究。

自1988年以来,主持和参加完成的科研项目20余项,其中国家自然科学基金项目6项,中国科学院重大项目6项,国家863及攻关项目3项,其他项目4项。目前正在执行的项目6项,包括国家杰出青年科学基金项目、中国科学院创新重大项目、中国科学院“百人计划”项目等。至今已发表学术论文120余篇,出版专著3部,科普著作3部。

因对海洋化学多方面创新性的重大贡献而获国家、省级重大科技成果奖10余项。1998年被中共中央组织部、国家人事部、中国科协授予“中国青年科技奖”,同年获山东省委组织部、山东省人事厅、省科协授予的“山东省青年科技奖”。1999年获国务院政府特殊津贴,同年被中共青岛市委、市政府评为“青岛市青年学术、工程技术带头人”。2003年入选中国科学院“百人计划”,当选“青岛市十大杰出青年”。

代表性论著:

《中国近海沉积物-海水界面化学》,海洋出版社,1997

《中国的海洋化学》,海洋出版社,2000

序

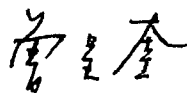
全球变化研究是世界各国都非常关心的科学问题。中国近海生物地球化学过程研究是全球气候变化与全球生态环境变化研究区域性响应的核心科学问题之一,涉及中国近海主要海域的典型海洋生态系,是全球变化研究的重要组成部分,具有重要的科学意义。全球海洋变化研究是 20 世纪 90 年代国际海洋科学的最新课题,而海洋生物地球化学研究作为其前沿,近几年才得到迅速发展。宋金明博士一直致力于这方面的研究,该书就是他领导的课题组所获成果的总结,是我国第一部有关中国近海生物地球化学的专著。

创新是科学研究的生命线,没有创新,科学研究也就失去了它本应有的意义。这部著作提出了许多创新的理论、观点,特别是在揭示海洋生源物质循环的规律上有较大进步。科学在走向综合,多学科相互交叉、渗透、整合是科学发展的趋势。该书就是这一趋势的典型体现。

科学研究的严谨性决定了研究成果的高水平。宋金明博士十几年如一日,踏实肯干,他突出的特点是特别重视野外调查,亲自出海采集样品,获得第一手资料,足迹数次遍及渤海、黄海、东海、南海及太平洋,经过精心分析研究,得出中国近海生源要素的变异规律。这种严谨的科学态度,不仅使所获资料具有坚实的可靠性,而且使这部专著具有了更深的内涵,保证了学术的高水平。

宋金明博士是中国科学院海洋研究所一位优秀的青年科技工作者,是国家杰出青年科学基金与“中国青年科技奖”的获得者,他工作积极努力,学术上刻苦钻研,获得了许多开创性的研究成果。他 1997 年出版的专著——《中国近海沉积物-海水界面化学》,1998 年即获得了中国科学院自然科学奖,充分证明了他的学术水平。海洋科学研究有宋金明这样的青年人,我感到欣慰。青年人勇于创新、奋力开拓,可喜可贺。特此为序。祝愿该书的出版能为促进我国海洋科学研究水平的提高和让世界了解我国的研究进展做出贡献。

中国科学院资深院士



序

近年来,作为地学学科前沿的海洋生物地球化学得到了迅速发展,它与全球气候变化和全球生态环境变化的研究息息相关。宋金明博士一直致力于这方面的研究,该书就是他和她领导的课题组所获成果的总结。该书选题新颖,站在了学术领域的前沿。

20世纪80年代开始实施的全球性研究计划,推动了海洋生物地球化学过程研究的发展,同时海洋生物地球化学过程研究成为其中的研究热点。从此,世界各国不同学科的科学家居致力于此研究,并取得了该领域前所未有的进步,突出地表现在两个方面:海洋学研究实现了空前的学科交叉,海洋学过程研究获得了显著的进展。尽管海洋学过程异常复杂,但运用海洋生物地球化学的观点、方法和通过多学科的集成,已使过去非常模糊的这些过程较清晰地展现在人们面前。现在,恐怕很少再有人用单纯学科的观点去解决海洋学的问题了。全球海洋变化研究集中于海洋对气候的影响和控制作用、全球海洋生态环境变化,全球海洋变化研究由区域海洋变化研究组成。因此,全球海洋变化的区域性响应是全球变化研究的具体体现,也是各国科学家研究的落脚点。作为边缘海的渤海、黄海、东海和南海,具有十分独特的环境特征,海域从陆架海到半深海,从温带到热带,并有世界著名的大河流输入,沿岸有经济较发达的人口聚集区。中国边缘海几乎包括了各类典型的海洋生态系统,如河口生态系、陆架生态系、上升流生态系、珊瑚礁生态系和红树林生态系等。因此,中国近海是研究海洋生物地球化学过程的理想海域。可喜的是,十几年来,我国的海洋科学工作者陆续对中国近海的生物地球化学过程进行了一些研究,使我国的海洋生物地球化学研究有了长足的进步和发展,该书就是这方面的代表。

《中国近海生物地球化学》系统地研究了中国近海主要生源要素碳、氮、磷、硅、氧、硫等的生物地球化学过程,是第一本有关中国近海的生物地球化学专著。它涉及中国近海主要典型海域的陆架生态系、河口生态系和珊瑚礁生态系,在不同的海域有不同的侧重。渤海主要研究沉积物中氮、磷、硅的迁移、转化特征,黄海、东海侧重研究生态环境与海水中碳、氧同位素的分布变化,而南海与南沙珊瑚礁生态系则主要研究沉降颗粒物中生源要素与非生源要素的循环过程。书中提出了一些新的理论观点,如维持珊瑚礁生态系高生产力原因——拟流网理论、沉积物自然粒度下形态研究等。该书的成果必将为深入开展海洋生物地球化学过程研究起到重要的促进作用,同时为海洋资源可持续利用战略的制定提供理论依据。我愿向海洋科学界和环境科学界的同行们推荐这本有重要学术意义的专著。

中国科学院院士

宋金明

序

揭示以碳为核心海洋生源要素的海洋生物地球化学过程是全球变化重大国际计划 IGBP 中 GLOBEC, LOICZ, JGOFS, SOLAS 的核心科学问题,其科学意义不仅会导致人类对自然科学规律认识上的重大突破,而且将对解决人类面临的人口、资源、环境的重大科学问题产生巨大影响。

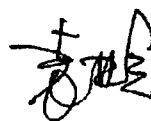
气候变暖主要是与人类活动排入大气的温室气体增加有关。据估计,地球上燃烧矿物排放的 CO_2 每年大约为 65 亿 t,其中约有 1/2 停留在大气中,其余的相当部分为海洋所吸收。但是,海洋究竟能吸收多少,吸收机制怎样,迄今还不很清楚。同时,海洋巨大的热容量和通过环流的热量输送,可以调节改变地球大气中热量的地理分布格局,减小不同纬度上的温度差异;大量海水蒸发过程,使海洋与大气之间进行着巨大的潜热交换和水量交换,所有这些过程无一不影响化学物质的循环过程。海洋记忆着过去的气候变化信息,调节控制着现在的气候变化,一旦出现激发气候变化的异常外界扰动,它便起着缓冲器的作用,延迟并减缓这种扰动的效应。因此,要了解和预测气候的长期变化,必须研究海洋对碳的吸收转移能力,研究海洋与大气间的耦合作用。具体地说,与全球变化有关的海洋学过程研究包括两大范畴的机理研究,即与全球气候变化有关的海洋学过程、与全球生态环境变化有关的海洋学过程,这两大研究范畴涉及的对象都是以碳为核心的生源要素,或者说是与生物过程有关的化学物质,所以以碳为核心的生源要素的海洋生物地球化学过程是这两大范畴的核心。

近海陆架区域是开展与全球变化有关的生物地球化学过程研究的主要海域。我国近海陆架是世界上最宽的陆架之一,具有独特的区域海洋学特征。在这个区域中,不仅有許多上升流和锋面区,而且有三条大河——黄河、长江、珠江注入其中,入海输沙量占全世界总入海河输沙量的 22%。有人估计,全球大洋沉积物中 10% 来自黄河和长江,如此巨量的颗粒物质和富含碳酸盐的河水入海,以及中国海广阔陆架的初级生产活动,无疑对全球海洋碳及有关生源要素为中心的海洋通量、收支平衡、海水的物理化学性质、生态环境和海洋沉积过程都有重要影响。因此,揭示陆架区生源物质循环及输送的机制,研究海洋生物生产产物的代谢过程,建立近海和大陆架区域的生源要素循环科学体系,不仅将给我国环境保护、资源合理开发带来直接的利益,也将为世界近海区域的生物地球化学过程研究做出贡献。

近几年来,非常可喜的是我国的科学家在海洋生物地球化学过程研究上取得了一系列重要进展。《中国近海生物地球化学》就是在这一背景下的典型代表,它是宋金明博士领导的课题组在这方面系统研究所获成果的总结,也是第一部有关中国近海的生物地球

化学专著,它的出版必将为我国海洋生物地球化学学科的建立奠定基础。书中大部分内容都是创新性的研究成果,有一系列的创新性理论和观点,将对我国海洋科学的发展产生影响。当然,作为新兴前沿的研究成果也不可能十全十美,书中的新理论、新观点需要时间的检验和大量调查数据的验证,但这丝毫不影响它的巨大科学价值。我愿把这本书推荐给大家。

中国工程院院士



前言

《中国近海生物地球化学》是 1999 年立项的国家杰出青年科学基金项目 (No.49925614)“近海沉积物-海水界面化学过程与生源物质循环”的主体研究成果,以及 2001 年立项的中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-08)“近海生态系统碳循环过程研究”的部分研究成果,它是项目组经过近四年的刻苦努力,并结合了前十年的研究积累倾力完成的。这是我国第一部有关中国近海生物地球化学的专著,它标志着我国海洋生物地球化学学科的形成与建立,并为其后的研究奠定了基础。

自 20 世纪 80 年代开始实施的全球性研究计划,把海洋生物地球化学这一海洋学研究的核心推到了全球变化研究的前沿,并成为其中的聚焦点。从此,世界各国不同学科的科学家致力于此研究,十几年来取得了该领域前所未有的进步,突出地表现在两个方面,即海洋学研究实现了空前的学科交叉,海洋学过程研究获得了从未有过的系统的结果。尽管海洋学过程异常复杂,但运用海洋生物地球化学的观点、方法和通过多学科集成,已使过去非常模糊的这些过程较清晰地展现在人们面前。现在,恐怕很少再有人用单纯学科的观点去解决海洋学的问题了,可以这样说,十几年海洋学研究的进步在很大程度上体现在海洋生物地球化学的发展上。全球海洋变化研究集中于海洋对气候的影响和控制作用、全球海洋生态环境变化,全球海洋变化研究由区域海洋变化研究组成。全球海洋变化的区域性响应是全球变化研究的具体体现,也是各国科学家研究的落脚点。我国是一个海洋国家,作为中国边缘海的渤海、黄海、东海和南海具有十分独特的环境特征,海域从陆架海到半深海,从温带到热带,并有世界著名的大河流输入,沿岸有较发达的人口聚集区。中国边缘海包括几乎全部的典型海洋生态系统,如河口生态系、陆架生态系、上升流生态系、珊瑚礁生态系和红树林生态系等。因此,中国近海是研究海洋生物地球化学过程理想的海域(图版 1)。可喜的是,十几年来,我国的海洋科学工作者陆续对中国近海的生物地球化学过程进行了一些研究,使我国的海洋生物地球化学研究有了长足的进步和发展,但这些研究由于项目立项时的具体限制,相对于海洋生物地球化学研究所要求的内容来说显得单调而不系统,缺乏对中国近海生物地球化学的综合研究。《中国近海生物地球化学》在这种背景下应运而生。

本书分四篇十二章。

第一篇阐述了生物地球化学产生与发展的历程、海洋生物地球化学研究的主要进展,特别阐述了海洋环境中碳、氮、磷、硅等生源要素的生物地球化学过程。这是目前海洋生物地球化学作为独立学科最系统的论述。

第二篇研究的对象是渤海沉积物中的氮、磷、硅。海洋沉积物是生源要素氮、磷、硅的主要源与汇,在氮、磷、硅的循环中起着非常重要的作用,但到目前的认识也仅此而已,究竟起多少作用和起多大的作用就不清楚了。本篇抓住这个重大科学问题,在一个全新的

思路下进行了系统研究,首先定义了一个新概念——“沉积物自然粒度下形态研究”,核心内容是认为在海洋沉积物中能进行循环的物质处于大颗粒的外层或海洋自生的微小颗粒中,颗粒大小的差异、处在颗粒内外层的不同以及结合形态的强弱,在生物地球化学循环中所起的作用截然不同,颗粒物外层起的作用较大,而包含在颗粒物内层就起很小的作用或不起作用而成为“惰性态”或“非转化态”。通过对渤海沉积物中氮、磷、硅的研究,获得了一系列的新结论:①在表层沉积物中可转化的氮、磷、硅的浓度分别为 551.7、56.3、349.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,仅占沉积物中总量的 30.8%、19.2%和 0.12%;②沉积物有机结合态氮、磷和碳酸盐结合态的硅分别是氮、磷、硅的主要可转化态,占总转化态的 26.5%、10.7%和 0.05%;③通过渤海沉积物-海水界面过程提供给水体氮、磷、硅循环总量的 26.1%、86.4%和 31.7%,这是首次定量给出渤海沉积物对氮、磷、硅循环的贡献大小。

第三篇集中研究了南黄海的生态环境,黄海沉积物中的氮,黄海、东海海水中无机碳、氧同位素和东中国海的碳源汇强度。

几年的连续调查说明,在几年的幅度上,黄海生态环境无明显变化。

提出了海洋沉积物氮的粒度结构新概念,将南黄海表层沉积物分为三个粒级,首次研究了该海域沉积物中各形态氮的分布特征,南黄海表层沉积物中的 IEF-N 自西向东递减, WAEF-N 自西向东递增, SAEF-N 则自南向北递减, SOEF-N 和 TN 则呈现出自西向东递减,在老黄河入海口附近海域达最大值。沉积物中氮的形态和分布受沉积物细粒度组分含量的影响, IEF-N、SOEF-N 和 TN 的分布与其呈现出显著的正相关,相关系数分别为 0.68、0.58、0.71,即沉积物中细粒度组分所占的份额越高,各形态氮的含量也越高; WAEF-N 的分布与其相关性较差,相关系数仅为 0.35,而 SAEF-N 的分布与其没有相关性。从沉积物中各形态氮断面分布与横向测线距离的关系来看,陆源输入并不是南黄海沉积物中氮断面分布的主要控制因素,海洋自生氮对南黄海表层沉积物中氮的形态、含量与分布具有重要影响。所以,南黄海表层沉积物中各形态氮的分布与沉积物的分布有着紧密的联系。根据沉积物中细粒度组分的含量,将南黄海分为细粒度的含量大于 65% 的 I 区、大于 35% 且小于 65% 的 II 区和小于 35% 的 III 区。沉积物中各形态氮在 I、II、III 区域内的含量比值分别为 1.65:1.26:1 (IEF-N)、1.23:1.10:1 (WAEF-N)、1.41:1.04:1 (SAEF-N)、2.08:1.45:1 (SOEF-N)、1.70:1.26:1 (TN),即细粒度组分含量越高的区域各形态氮的含量越高;在不同粒度的沉积物中,沉积物的粒度越细,沉积物中各形态氮的含量越高,细粒度沉积物中各形态氮的含量与中、粗粒度沉积物中含量的比值分别为 2.52:1.76:1 (IEF-N)、1.93:1.35:1 (WAEF-N)、2.19:1.42:1 (SAEF-N)、9.23:4.42:1 (SOEF-N)、3.44:2.40:1 (TN),其中 SOEF-N 在不同粒度沉积物中的差异最大,它受沉积物粒度的影响最强;随着沉积物粒度的由粗到细,沉积物中有机氮所占的比例逐渐升高 ($60\% < 80\% < 86\%$),而无机氮的份额逐渐降低 ($40\% > 20\% > 14\%$),这可能预示能被生物利用的氮所占的份额在降低;氮的四种可浸取态氮对氮循环的相对最大贡献 SOEF-N (80%) > IEF-N (11%) > SAEF-N (6%) > WAEF-N (3%),其中 SOEF-N 是可转化态氮的绝对优势形态。在南黄海的三个分区内,各形态氮的埋藏通量非常相近,而埋藏效率随 I、II、III 区域而逐渐递增。不同粒度的沉积物中各形态氮的生态学功能有较大差异,一般细粒度沉积物中可浸取各形态氮与浮游植物、底栖生物有较密切的关系,而中、

粗颗粒沉积物中的可浸取态氮主要与浮游动物有关。在南黄海不同粒度的表层沉积物的四项可浸取态氮中, SOEF-N 、 SAEF-N 与浮游植物的生长繁殖、提升海域的生产力有密切关系; 两种无机形式的氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$) 和叶绿素 *a*、浮游植物细胞总量及初级生产力具有正相关关系, 说明表层沉积物中的可浸取态 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 对于促进浮游植物的生长及提高初级生产力具有非常重要的作用, 是浮游植物可以直接吸收利用的氮的两种主要形式, 其中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的作用要稍大一些, 且粒度越细, 影响越大; $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 对于促进浮游动物及底栖动物生长繁殖的作用则不明显, 因不能被直接吸收利用而只能通过食物链的传输等一系列中间环节, 所以可推知氮无论以什么形态存在, 只有都转化为无机形式的氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$) 后, 生态学功能才被显现。北黄海沉积物中占主导地位的是细粒度组分, 平均含量为 87.03%, 细粒度组分的结构和性质直接影响着沉积物中化学元素的形态、含量与分布, 使自然粒度沉积物中各形态氮的垂向分布与细粒度组分中各形态氮的分布非常相近。在氮的早期成岩过程中, 粒度也起着非常重要的作用, 细粒度组分中有机氮的分解速率最低, 比粗粒度组分中有机氮的分解速率常数低一个数量级, 是中粒度组分中的 1/2, 即细粒度沉积物中有机氮的分解矿化速率最小, 易于富集有机氮。对于不同站位的沉积物来说, 因沉积速率的差异, 致使沉积物中各形态氮的埋藏通量有很大差异, 沉积速率越大, 沉积物中各形态氮的埋藏通量越大, 在沉积速率最大的 C4 站 (北黄海中部), 各形态氮的埋藏通量最大。

黄海、东海海水中的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-1.636 \sim -10.251$ 间变化, $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-2.908 \sim 4.714$ 之间变化, 两者均有明显的日变化, 特别是在表层水中尤为明显, 两者也有明显的随深度的变化, 反映了碳、氧同位素受多种因素的影响, 碳、氧同位素可用于研究海水的混合状况、海水来源和物质循环的示踪剂; 通过对海洋碳源汇研究成果的分析, 剖析了海洋碳源汇的内涵, 提出了“表观碳源汇”与“实际碳源汇”的概念, 对海洋碳源汇不确定性的原因进行分析, 提出碳参数测定不准确与关键生物地球化学过程不清楚是根本原因, 海洋碳源汇研究应特别注重陆架边缘海碳循环过程研究, 提高碳参数测定的准确性和应深入研究控制碳循环关键的海洋生物地球化学过程是研究关键; 用室内模拟的方法获得了温带海表层海水温度与海水 CO_2 分压的关系, 统计关系为 $p_{\text{CO}_2}(\text{水}) = 6.62T + 221.03$, 与实测 $p_{\text{CO}_2}(\text{水})$ 误差小于 $\pm 4.5\%$ 。用表层海水温度大气 CO_2 分压资料, 第一次获得了渤海、黄海、东海海-气界面 CO_2 通量的季节分布变化特征和该海域碳源汇的强度。渤海、北黄海、南黄海、东海 4 个区域的春季和冬季均是海水吸收大气中的 CO_2 , 在量值上冬季远大于春季, 夏季 4 个区域皆是海水向大气释放 CO_2 , 秋季最为复杂, 渤海与北黄海是吸收 CO_2 , 而南黄海和东海是释放 CO_2 。吸收 CO_2 通量最小和最大的区域和季节是北黄海的秋季 [$5.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计)] 和渤海的冬季 [$106.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计)], 释放 CO_2 通量最小和最大的区域和季节是北黄海的夏季 [$-1.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计)] 和东海的夏季 [$-18.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计)]。就全年而言, 渤海、北黄海、南黄海、东海的通量分别为 36.8、35.2、21.0 和 $3.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计), 南北黄海合二为一则为 $23.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计), 且均是海水吸收大气中的 CO_2 。整个东中国海平均值为 $11.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计), 春、夏、秋、冬季分别为 25.5、-15.2、-9.8 和 $44.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 C 计)。春季和冬季东中

国海皆为大气 CO_2 的汇,可吸收的碳分别为 769 万 t 和 1 356 万 t;夏季皆为 CO_2 的源,可释放大气中的 CO_2 为 459 万 t;秋季渤海与北黄海为 CO_2 的汇,可吸收 27 万 t,南黄海与东海是 CO_2 的源,可释放碳 324 万 t,在秋季整个东中国海可释放的碳为 297 万 t,东中国海作为大气 CO_2 的汇全年总平均可吸收的碳为 1 369 万 t。对东海表层沉积物的再悬浮比率和颗粒有机碳(POC)的垂直净通量研究可知,东海丰水期表层沉积物的再悬浮比率为 47.4%~79.18%(平均值为 65.6%);底层的再悬浮比率为 72.75%~96.96%(平均值为 89.43%);再悬浮比率的极大值出现在 106 站的底层,再悬浮比率的最小值出现在 102 站的表层。颗粒有机碳的垂直净通量极大值出现在 107 站的 10m 层,为 $117.4\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计);最小值为 $0.79\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计),出现在 111 站的底层。垂直净通量的平均值,表层水 POC 为 $53.00\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计),次表层水为 $117.40\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计),中层水为 $8.18\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计),底层水为 $5.73\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 C 计)。在丰水期,海水由于海气交换得到的 CO_2 ,仅有 13% 以颗粒有机碳的形式垂直转移而形成表层沉积物中的有机碳。

第四篇系统研究了南海与南沙珊瑚礁生态系的生物地球化学过程。通过对珠江口枯水季节海水中 DOC、TDN、TDP、叶绿素 a 的分析,把珠江口区域分为近河口区域、珠海-澳门外海域、深圳-香港外海域、珠江口中南部开阔区和万山群岛海域五个区域,近河口区域具有较低 DOC、较高 TDN、高 TDP 及较高叶绿素 a 的特点,珠海-澳门外海域具有高 DOC、较低 TDN、很低 TDP 及很高叶绿素 a 的特点,珠江口中南部开阔区域则具有高 DOC、中等 TDN、很低 TDP 及低叶绿素 a 的特点,万山群岛海域则具有较低 DOC、很低 TDN、很低 TDP 及较低叶绿素 a 的特点,这些特点对生源要素的水平输运与垂直转移有重要影响。南海北部表层沉积物中氮、磷、硅的研究结果表明,①随着北纬度的降低,站位愈向深海而远离海岸,南海北部表层沉积物可转化态氮、磷、硅的总量趋于减小,反映了陆源输入对南海北部沉积物环境营养盐的影响,硅含量无明显变化,说明所研究区域海洋沉积物中的硅受陆地的影响相对较小;②南海北部表层沉积物有机态氮、磷、硅的总量与强碱转化态相近,比离子交换态氮、磷、硅的总量高,比弱酸转化态高得多,这说明,南海北部沉积物中氮、磷、硅潜在的释放主要来源于有机质的降解和沉积物中硫化物矿物的氧化,有机态的磷和硅还有一部分来源于硅酸盐的进一步溶解,尤其是硅;③有机态氮是表层沉积物中可转化氮的主要赋存形态,它比其他形态存在的氮高 2~3 个数量级,磷和硅与强碱转化态相近,这说明以硫化物或有机质存在的磷与硅相对于氮而言少得多。这从另一个侧面说明,人类活动主要造成了该海域沉积物中氮的积聚。南海北部沉积物可转化态氮、磷、硅的垂直分布的变化特征是沉积物中氮、磷、硅的垂直变化集中表现在有机态中的变化,尤以有机氮最为明显。南海北部沉积物氮、磷、硅变化一个较普遍的特征是,沉积物表层与次表层之间的变化与次表层以下的变化特征不同。一般次表层可转化态的氮、磷、硅总量比表层的高,表层的又比取样最低层高。而 NH_4-N 则是表层最高,次表层最低。表层最高说明了沉积物受陆源氮的影响较大,次表层 NH_4-N 与 NO_3-N 互为消长,说明 NH_4-N 与 NO_3-N 之间存在着一定的氧化还原平衡。无论在哪一个沉积层次之间,平面分布都呈现出这样一个趋势:随着北纬度的减小(即由北向南),沉积物中可转化态氮、磷、硅总量趋于减小。

这可能是由于逐渐远离人口密集的珠江三角洲,人为因素的影响越来越小的缘故。有机态氮、磷、硅垂直变化的一个明显特征是,氮的含量比强碱浸取态高1~3个数量级,比弱酸转化态高3~4个数量级,比吸附态高2~3个数量级。有机态磷、硅垂直变化与强碱转化态磷、硅垂直变化非常相似,沉积物磷、硅释放的垂直变化特征是细粒级的释放量比较大粒级的释放量普遍地高,说明有机质中氮的含量比磷、硅的含量要多得多,有机质中磷、硅的含量对沉积物中磷、硅的含量影响相对要小,强碱浸出部分的磷、硅是沉积物中磷、硅可转化释放的主要来源,这些磷、硅主要是以磷酸盐或硅石等形式存在于沉积物中的。强氧化剂溶出部分的是构成沉积物中可转化态氮、磷、硅的主体,由此推知有机质的氧化是沉积物中氮、磷、硅迁移的主控成岩过程。对南海北部沉积物中潜在可转化的氮、磷、硅的研究表明,南海北部沉积物中,有43.7%~88.9%的氮,96.2%~99.7%的磷和99.7%~99.8%的硅在相当长的时期内不能参与生物地球化学循环,而是被埋藏在沉积物中成为惰性态。南海北部沉积物样品中氮的赋存形态主要是有机态, $\text{NH}_4\text{-N}$ 在可转化态所占的比例是很小的。在氮的转化潜能方面,不同形态氮的转化能力顺序是 $\text{OSF} > \text{IMOF} > \text{IEF} > \text{CF}$ 。南海北部沉积物均是向上覆海水提供氮、磷、硅,提供氮的量多于硅,远远大于磷;氮向海水扩散的量在河口高于远离河口的站位,近河口的A站向上覆水扩散的无机氮为 $2.46\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,离河口稍远的B站则为 $2.08\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,更远的C站为 $1.70\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,最远的D站仅为 $0.80\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,再一次说明南海北部的无机氮确实是来自人为污染而在沉积物中积聚的结果,磷与硅则没有这一现象。

第四篇对南沙珊瑚礁生态系的生物地球化学过程的探索,是我国目前对珊瑚礁生态系物质循环最系统的多学科综合研究,绝大部分内容属首次报道。在研究对象上,第一次对海水、沉降颗粒物、浮游生物、海藻、珊瑚及沉积物进行系统集成并结合活体珊瑚培养的方法进行研究,在珊瑚礁生态系研究上取得了一系列突破:①首次对元素在珊瑚礁生态系中的垂直转移过程给出了清晰的轮廓。包括:非生源要素在内的所有元素在珊瑚礁生态系中的垂直转移80%以上是由生物来完成的,非生物过程仅占不到20%;生源要素垂直转移到达潟湖底部后,大部分在沉积物中再生释放进入潟湖水中进行再循环,其中再生释放的量占垂直转移到沉积物中的比例,总碳、总氮、总磷分别为22.9%、91.5%、74.6%,有机碳、有机氮、有机磷分别为90.5%、86.8%、88.8%。②在国内外首次对珊瑚礁生态系中垂直沉降颗粒物的生物标志化合物进行了研究,并第一次检出了较高含量的类异戊二烯二烯烃(C_{25}HBI),提出其主要来源于角刺藻和根管藻,并检出了较丰富的类异戊二烯酮、醛、醇脂类,表明垂直沉降颗粒物在到达沉积物-海水界面前,已经进行了强烈的生物化学改造。③对维持珊瑚礁高生产力的原因进行了深入的研究,提出了拟流网新理论,即维持珊瑚礁生态系高生产力的根本原因在于由热带相对固着的生物(主要是珊瑚)组成的生物化学反应器大量富集外海寡营养水中的营养物质并在其内进行快速循环。这些相对固着的生物起着类似“流网”的作用,可以捕集流动海水中密度很小的“鱼虾”营养物质。这是对珊瑚礁物质循环研究的重大贡献。④发现了珊瑚中的虫黄藻可以“奢侈消费”营养盐的特性,当珊瑚礁生态系中营养物质含量快速增大时(如由于生态环境的突变,底部有机质快速分解,释放大量的营养物质或短时间海水运动带来大量的营养盐),虫黄藻可在短时间内大量吸收之,从而间歇得到所需的营养盐,这种机制可对拟流网理论形成补充。

从上述可以看出,本书的大部分结论是全新的,许多是首次报道,从研究的方法上进行了源头创新,所得的成果显然是原创性的,所以创新是本书的最大特点。

本书是集体劳动成果的结晶。李鹏程研究员参与了部分研究工作的实施,协助整理了第四篇第十二章第二节的一、二部分。中国科学院兰州地质研究所的段毅研究员协助整理了第四篇第十二章第一节中的二、三部分。我的研究生罗延馨、赵卫东、马红波、吕晓霞及博士后孙云明副教授进行了大量的实验分析和测定,并协助进行了部分资料整理。特向以上为本书的完成担负过实质性工作的同志表示我深深的谢意。中国科学院资深院士、著名海洋学家曾呈奎教授,中国科学院院士、著名海洋地质学家秦蕴珊教授,中国工程院院士、著名物理海洋学家袁业立教授分别为本书作序。中国科学院海洋研究所原情报研究室主任徐鸿儒先生、《海洋科学》编辑部原主任周海鸥编审、原专著编辑室的孙北林先生对本书初稿提出过建设性建议,特向以上专家表示感谢。在这里,还要特别感谢国家自然科学基金委员会、中国科学院的项目资助和山东省泰山科技专著出版基金会的资助,感谢国家自然科学基金委员会地学部领导和海洋学科主任王辉教授、中国科学院资源环境科学与技术局原副局长陈泮勤研究员的指导与支持。没有以上同志的帮助与有关单位的支持,本书不可能顺利完成,再一次躬谢他们。

作为一部为创立新学科奠定基础 and 全新内容的专著,书中无论是结论还是叙述方法都肯定会有不足乃至错误之处,恳请读者批评指正。

宋金明

PREFACE

Biogeochemistry of China Seas is the first monograph on biogeochemistry in China. It is the main research achievement of the Project “Chemical processes of sediment-seawater interface and biogenic elements cycling of China seas”, which is a National Science Foundation for Outstanding Young Scientists in China (No.49925614) starting in 1999, and the part results of the “The biogeochemical processes in carbon cycling of China seas ecosystem” which is a Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No.KZCX1 – SW – 01 – 08) starting from 2001. The monograph, which is based on work of my research group in the past ten years, lasted for nearly four years to finish its writing with the efforts of our team. This book is a landmark of the marine biogeochemistry development in China, and it also lays good foundations for the further study in this field.

The global research programs launched from the 1980s have greatly accelerated the development of marine biogeochemistry and made it one of the main concerns of the studies of oceanography. Since then, scientists of different fields throughout the world have been devoting to this study, and have made unprecedented progress, which were clearly shown by two aspects, i. e. unparalleled cross-link between all the specific research fields in oceanographic research, and the systematic new results achieved up to date. Though oceanic process is very complex, it has been understood more clearly than before. Nowadays, oceanic problems cannot be resolved using only the knowledge of one single field, as we can say that, in recent ten years, the progress of marine research was largely demonstrated by the development of marine biogeochemistry. Global oceanic evolution research, which consists the researches of different regions, is concerning mainly on the ocean's role in the global climate and marine environment changing. So the regional response to global oceanic changing is the groundwork of those researches. China seas, including the Bohai Sea, the Yellow Sea, the East China Sea and the South China Sea, have their particular environmental characteristics. Extending from continental shelf to the continental slope, from tropic to temperate seas, with the input from the world-famous rivers, and with many developing and developed cities located in the coastal regions, China seas contain nearly all kinds of typical ecosystems, such as estuarine ecosystem, continental shelf ecosystem, upwelling ecosystem, coral reef ecosystem and mangrove ecosystem. They are typical regions to study marine biogeochemical processes. The biogeochemistry processes of China seas have been studied continuously with great efforts of Chinese scientists and great achievement has been made in the field. Some of the research projects, however, were too limited and without systematic results. The writing of this monograph was thus stimulated.

The monograph is made up of four sections, twelve chapters.

Section one reviewed the historical development of biogeochemistry, and the main progresses

that have been made in this field. Special emphasis was placed on the biogeochemical process of important biogenic elements (C, N, P, Si, etc.) in seawaters. The most recent development in the marine biogeochemistry of our country was summarized in this section.

Cycling of the nitrogen, phosphorus and silicon in the Bohai Sea sediments are presented in section two. Marine sediments are the main source and sink of biogenic elements (nitrogen, phosphorus and silicon), and play an important role in the cycling of nitrogen, phosphorus and silicon. The quantitative understanding concerning this role, however, has not been well-known. Focusing on this project, we systematically carried out studies using a quite new method. The new concept, "the natural grain size sediments research" is raised in this book, whose central theory is that the materials in cycling comes mainly from the outer layer of coarse grain-size and authigenic fine grain-size in seas. The differences in the grain size (coarse or fine), layer location (outer or inner), and complexing intensity (strong or weak) result in the different roles the particles play in biogeochemical cycling. In detail, the outer layer plays an important role, while the inner layer which is called "inert form" or "untransferable form", plays a negligible function in the material cycle of sediments. The following three new conclusions were obtained by studying the nitrogen, phosphorus and silicon in the Bohai Sea: ① in the surface sediments, the concentration of transferable nitrogen, phosphorus and silicon was 551.7×10^{-6} , 56.3×10^{-6} and 349.7×10^{-6} , respectively, and cover only 30.8%, 19.2% and 0.05% of its total contents in sediments, respectively. ② the transferable nitrogen (in organic compound), phosphorus (in organic compound) and silicon (in carbonate) were 26.5%, 10.7% and 0.12%, respectively, of the total contents of the three elements. ③ it was first quantitatively reported that the sediment-water interface provides 26.1%, 86.4% and 31.7%, respectively, of the total nitrogen, phosphorus and silicon cycled in the Bohai Sea.

The biological environment of southern Yellow Sea, the roles played by the nitrogen in sediments in this element biogeochemical cycling, the inorganic carbon and oxygen isotopes in the Yellow Sea and East China Sea, and the contribution of carbon source and sink in eastern China seas were presented in the third section. Several years' continuous investigation indicated that there was no obvious change in the environment of the Yellow Sea in recent years. Also the characteristics of nitrogen forms in different grain size sediments and their functions in biogeochemical cycling of the Yellow Sea have been studied for the first time. The researches lay emphasis on the grain-size related on the contents and forms of nitrogen in sediments, the mechanisms of different forms of nitrogen forming and releasing in different grain-size sediments, the early diagenesis of organic nitrogen in sediments, the ecological functions of various forms of nitrogen and the contributions of sedimentary nitrogen to nitrogen cycling. The main results include: The relationship between sediment grain size and the distributions of different forms of nitrogen were obtained for the first time in this region. In the surface sediment of southern Yellow Sea the IEF - N decreased from west to east, WAEF - N increased from west to east, SAEF - N decreased from south to north, and SOEF - N and TN, however, decreased from west to east. The nitrogen speciation and distribution in sediment were greatly influenced by the fine particle composition of the particles. The distributions of IEF - N,

SOEF - N and TN were significantly related with sedimentary speciation and distribution of this element, with the relation coefficient of 0.68, 0.58, and 0.71, respectively. In the southern Yellow Sea surface sediments, the ratios of the different forms of nitrogen contents in different grain size sediments (from coarse to fine) were 1:1.76:2.52 (IEF - N), 1:1.35:1.93 (WAEF - N), 1:1.42:2.19 (SAEF - N), 1:4.42:9.23 (SOEF - N), 1:2.40:3.44 (TN), respectively. The ratios of the contents of different forms of nitrogen between medium size and fine sediments were 1:1.28 (IEF - N), 1:1.60 (WAEF - N), 1:3.99 (SAEF - N), 1:1.38 (SOEF - N), 1:1.28 (TN), respectively, in the northern Yellow Sea. The contents of all the forms of nitrogen were highest in fine sediments, lowest in coarse sediments (with the exception of the biological detritus). Therefore, fine sediments contain more different forms of nitrogen, i. e. the nitrogen was enriched in fine sediments. In the southern Yellow Sea surface sediments, the inorganic nitrogen contents decreased (40% $\rightarrow$ 20% $\rightarrow$ 14%), while organic nitrogen increased gradually (60% $\rightarrow$ 80% $\rightarrow$ 86%), with sediment grain-size finer.

The biogeochemical characteristics of different forms of nitrogen in the Yellow Sea sediments were explored. In different grain-size sediments of the southern Yellow Sea, the SOEF - N contents were the highest among the four forms of nitrogen; and the contents of IEF - N were lower than those of SOEF - N, while they were the highest among the inorganic nitrogen; the contents of SAEF - N were lower than those of IEF - N and higher than those of WAEF - N. In natural sediments, the transferable nitrogen contents ranged from 25.33% to 59.87% of total nitrogen and averaged 38.57%. In transferable nitrogen, the proportions of each form were 10% (IEF - N), 3% (WAEF - N), 6% (SAEF - N) and 81% (SOEF - N), respectively. In the northern Yellow Sea, in the upper or deeper sediments and for all the fine or coarse sediments, SOEF - N contents were still the highest of all the transferable nitrogen forms, and were averagely 16.85% of total nitrogen content. SAEF - N contents were the highest in inorganic nitrogen and averaged 63.61% of total inorganic nitrogen. The content of IEF - N was lower than that of SAEF - N and higher than that of WAEF - N, and the content of WAEF - N was still the lowest among all the forms. The forming of different forms of nitrogen was coupled with the environmental condition.

The early diagenesis processes of organic matters were also studied. The early diagenesis of organic matters in the northern Yellow Sea sediments was usually taken place in the upper layer. The mineralization rate of organic matters was the quickest in the coarse sediments. The constants of organic matters decomposing rate in different grain size sediments were 42.28×10^{-3} (coarse sediments), 20.48×10^{-3} (medium size sediments) and 5.37×10^{-3} (fine sediments), respectively, which showed that the decomposing rate constant in coarse sediments was about 10 times of that in fine sediments, and 2 times of that in medium size sediments. This may be the reason that the contents of different forms of nitrogen in coarse sediments are lower than these in fine sediments. The study made a progress in ecological functions of nitrogen in sediments and in the biogeochemical cycling.

The forming and releasing of various forms of nitrogen in different grain-size sediments were