

关于陆-海相互作用的若干问题

张经

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

E-mail: jzhang@sklec.ecnu.edu.cn

2011-03-17 收稿, 2011-07-01 接受

摘要 陆-海相互作用是一个宽泛的研究领域, 但其同海洋科学的基础研究与我们经济、社会的可持续发展均密切相关. 基于个人对本研究领域的理解, 在本文中提出了一些需要在陆-海相互作用研究中予以关注的问题, 包括陆架边缘的物质交换、流域盆地中的物质流失、近海的富营养化与有害水华、底层水缺氧与“死亡区”、沉积物的“源”与“汇”、对地球其他层圈的反馈、海平面上升及其对社会与经济可持续性的作用、沿海地区的人类活动及其影响, 等等. 本文中未能涉及的命题并非不重要, 仅仅系我个人的知识和能力所限.

关键词

生物地球化学
陆-海相互作用
可持续发展

1 问题的提出

“陆-海相互作用”可能贯穿于我们对海洋认知的整个过程, 并且从人类文化发展的早期阶段一直延续至今, 原因大约是同人类对海洋的探索(航海活动、渔业、由于耕作与制盐的需要进行的围垦等)有着密切的关系. 然而, 在不同的历史时期, 陆-海相互作用研究的内涵可能是不同的. 例如, 就针对河口的研究工作而言, 20世纪80年代及其以前的研究工作大多集中在针对河流入海通量的刻画, 以及认识影响“通量”变化的因素和不同体系之间的对比工作. 前期, 陆-海相互作用研究的区域也比较狭窄, 比较典型的研究工作大都集中在河口、海岸或者三角洲地区.

在20世纪的末期, 针对全球变化研究的地圈与生物圈计划(International Geosphere and Biosphere Programme, IGBP)中的陆-海相互作用研究计划(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ)开始较前期的研究工作更多地强调气候变化和人类活动相互叠加产生的后果(驱动作用)对河口与海岸地区的整体影响, 同时开始发掘自然科学领域中的基础研究同人文科学领域中所关注的社会与经济发

展的敏感性(例如: 陆-海相互作用体系对全球变化的响应程度)、脆弱性(例如: 所处区域的环境在外部驱动作用下的可恢复性特点)与可持续性(例如: 海岸带生态系统的健康与发展取向)之间的联系^[1]. 在一些场合下, 提出了针对海岸带的研究范围应是从“河流的源头到陆架边缘”的概念, 在学术界引起了歧义和争论. 不过, 笼统地讲, 关于陆-海相互作用研究的范围界定, 在目前应该包括一部分流域盆地和近海与之相关的区域(此处的近海泛指陆架与边缘海, 文中不再细分)并且作为一个整体来考虑.

其实, 由于以下的几个因素使得河口与海岸地区成为过去历史上和现今陆-海相互作用研究的重要区域. (1) 河口与海岸是承接来自陆地的风化产物和污染物质的重要场所, 其中的植物性与痕量营养素对维系近海的初级生产和食物网的结构与食物产出具有重要的作用; 一些污染物质则对生态系统的健康构成危害, 并沿着食物网被传递和积累. (2) 如果从物质通量的角度来看, 在河口与海岸发生的自然过程与人类活动会引起化学物质在宏观与微观界面附近的再分配, 在很大程度上改变了化学元素的赋存形式, 两者对物质在近海生态系统中的迁移具

有广泛的影响。(3) 自西方的工业化革命以来, 河口与海岸在人类文明演化中的作用愈加重要, 河口与海岸系统的演替直接地影响着社会与经济可持续发展的可持续性, 这一点在我国都市化快速发展的今天尤为突出。

从另外一个视野, 由于上述诸原因也使得河口与海岸地区的生态系统所承受的来自自然与人类活动的影响较之陆地与海洋本身更为特殊, 生态系统产生的变化或简言之“响应”与外部“驱动作用”的表现之间的关系更为复杂(图 1)。

在本文中, 我拟就个人的片面理解对我们在陆-海相互作用领域的研究进行一点粗浅的梳理, 并且对陆-海相互作用需要深入地进行研究的问题作一个回顾; 希望能够引起学术界同行们对这些研究问题更多地关注, 通过学术上的思辨与争鸣帮助认识今后针对陆-海相互作用进行研究的取向。

2 研究的材料和方法

本文中所讨论的问题, 材料与数据主要来自以下的几个方面: 国内外的学术期刊中发表的相关研究成果; 近 20 年以来重要的国际和国内学术项目的科学计划与实施的方案; 本人在国、内外的学术会议上听取其他学者的报告后的感悟; 在与学生、同事和老师之间的交谈、讨论过程中所学习到的内容, 以及我所在实验室的研究资料等等。然而, 就这些成果与资料的引用和对事例的分析仅代表我个人对问题的看法和理解, 并不代表数据和资料产生或所

有者的意见。如有不恰当地引用或曲解, 我个人在此表示歉意。

3 关于陆-海相互作用我们应该认识到的问题

听学术界的前辈们讲起, 近代开始出现以我国科学家为主导的陆-海相互作用方面的观测与研究大约是在 20 世纪 30~40 年代期间或更早; 例如, 在 1934 年针对海南岛、西沙群岛等地的生物调查, 1935 年在渤海、北黄海实施的海洋调查, 以及稍后的浙江沿海渔业调查等等^[2]。在 20 世纪 40~50 年代, 前辈们在胶州湾、舟山群岛与浙闽沿海、黄河口与莱州湾等地均开展了针对生源要素的来源、周转对生态系统的结构和功能影响方面的研究工作。那个时期所取得的成果至今仍对我们的学术研究工作具有影响。20 世纪 50 年代后期开始的我国第一次海岸带与近海大规模普查的报告是目前我们能够寻到的且比较系统的文献和资料。

追索发表于国内外的学术文献, 已故的李法西教授及其同事在 20 世纪 60~70 年代所做的研究工作大约属于解放后针对河口地区淡-海水混合过程对植物性营养盐(这里系指溶解态的氮、磷、硅)影响的比较早期的成果之一^[3]; 同期, 也有其他前辈们关于近海的研究成果见于学术期刊。也是在那一段时间, 国内关于植物性营养盐的分析技术也获得了长足的进步。基于 20 世纪 60 年代的观测和分析资料, 顾宏堪教授与其同事^[4,5]于 20 世纪 80 年代初期总结了长江口及其毗邻海域的植物性营养盐的分布特点和主要

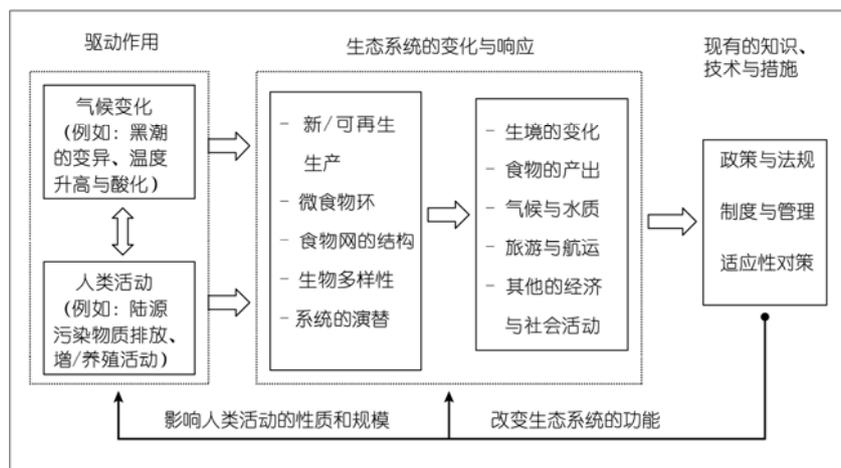


图 1 近海生态系统对外部驱动作用的响应以及由此引起的在结构和功能水平的变化和提供的服务差异后者在很大的程度上受到我们现今的认知能力与采取的措施的影响

影响因素. 回顾过去, 自 20 世纪 50 年代以来, 关于植物性营养盐和其他化学物质在中国的河口与近海的研究工作与时俱增, 研究工作本身也在不断地深入. 例如, 顾宏堪^[6]撰写的《渤海东海海洋化学》、韩舞鹰^[7]的《南海海洋化学》均系对前期研究成果的很透彻地总结.

20 世纪 70 年代后期的改革开放以来, 国内外在海洋科学领域的学术交流日益增多. 比较早期的国际合作活动包括中-美合作关于“长江口与东海陆架的沉积动力学过程”的研究计划(1979~1984)、中-法合作关于“黄河口与毗邻海域的生物地球化学”(1983~1988)和中-美合作关于“黄河口与渤海南部的沉积作用”(1984~1989)的研究计划等. 其中, 中-美关于“长江口与东海陆架的沉积动力学过程”的合作计划的成果中一部分于 1985 年在 *Continental Shelf Research* 杂志上以专辑形式发表^[8], 其中包括有中、美学者合作撰写且有代表性的 15 篇研究论文. 中-法之间关于“长江口与毗邻近海的生物地球化学过程”的合作研究计划(1985~1990)的成果中, 一部分由海洋出版社作为专著出版^[9].

在过去的 30~40 年中, 还有国内的许多其他前辈和学者在陆-海相互作用领域作出了重要的学术贡献, 由于篇幅所限, 不能一一枚举.

3.1 陆架边缘的物质交换

一直以来, 研究工作的相当部分集中在刻画陆地径流与海水之间的混合过程对化学物质入海通量的改造. 然而, 制约植物性营养盐在河口与毗邻近海的生物地球化学行为的因素不仅仅限于淡-海水混合过程对元素分配的影响. 诚然, 在河口口发生的淡-海水混合过程及其伴随的化学反应对于改造生源与痕量元素的入海通量具有重要的作用, 当研究的问题涉及在整个陆架或边缘海尺度上的生物地球化学循环及其与生态系统的相互作用(例如: 物质在食物网中的流动)时, 仅仅刻画河流入海通量的变化是远远不够的, 在有些时候甚至会引出对问题的曲解. 从观测的角度看问题, 近海的动力过程对河口与海岸带的地形/地貌演化的巨大作用是触目惊心的; 当一个人站在钱塘江口附近(例如: 浙江省海盐境内的盐官)那自宋代起便不断在修筑的海塘大堤上, 望着那如同万马奔腾一般自天际而来的涌潮, 便可感受自然的力量所带来的对心灵的强烈震撼. 举例来讲, 历

史上进入长江下游的沉积物为 450×10^6 t/a, 那时河口三角洲前缘的淤长速率为 125×10^6 m³/a; 进入 21 世纪后, 随着流域筑坝等因素导致的沉积物入海通量的显著减少, 三角洲的前缘转为 $50 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6$ m³/a 的蚀退状态, 淤长与蚀退之间转换的临界阈值所对应的河流输沙量是 250×10^6 t/a 左右^[10].

从能量和物质输运的角度, 潮汐和环流对化学物质在近海环境中的迁移具有控制作用, 它们对水体中的化学元素在时间和空间的分布格局(生物地球化学场)进行改造和重整. 例如, 长江多年平均入海径流是 3×10^4 m³/s, 而进入东海陆架的黑潮次表层水大约是 1~2 Sv(1 Sv= 10^6 m³/s); 后者对整个陆架的水交换和生源要素的收支可能较长江更为重要^[11]. 黑潮次表层水中一些植物性营养盐的含量甚至同入海地表径流的成分相当. 每年的秋、冬季节, 黑潮次表层水越过陆坡进入东海陆架, 并且通过混合对整个陆架的生物地球化学场进行调整; 特别地, 对水体中的生源要素进行补充; 此时受到东北季风的影响, 来自台湾海峡的水体大多局限于东海陆架的南侧^[12]. 长江的径流在冬季也大幅度地减小, 而且入海后沿着浙、闽地区的近岸向西南运动. 当春天到来时, 东海宽阔的陆架上浮游植物的水华所赖以生存的生源要素仰仗于冬季黑潮与近海之间通过在陆架边缘的物质交换对水层中植物性营养盐的补充, 在海盆的尺度上受到气候变化的制约.

同样地, 发生在陆架边缘的物质交换过程也制约着近海的物质向开阔海洋的输送及其变化. 针对物质收支的研究结果表明, 东海陆架向西北太平洋及其他的边缘海输送相当数量的生源要素, 并且这种物质的输运具有明显的时、空变化特点^[13]. 通过发生在陆架边缘的物质交换过程, 东海陆架的生源要素被输送到开阔海洋的寡营养水域并支持那里的初级生产力, 尽管目前针对此尚有许多的未知内容.

3.2 流域盆地中的物质流失

当一个人驻足在河边, 眼前所见“滚滚东逝水”, 心中回味着《论语》中的“子在川上曰: 逝者如斯夫, 不舍昼夜”的时候, 他/她将不会再怀疑化学物质从流域盆地中的流失对近海环境的演化将会产生怎样的影响.

最近, 文献中的许多研究成果都表明在过去的几十年中河流入海的泥沙输送在减少, 而诸如向植

物性营养盐的通量则显著地增加了^[14,15]。如果我们接受这样一个事实,那么随之而来所面临的问题包括究竟是什么样的因素导致上述的后果?

恐怕在文献中发表的许多结果都会将河流入海泥沙的减少归结于流域内水利工程(例如:筑坝)的拦截作用。的确,众多的研究数据都支持这样一种现象,即河流入海泥沙在近期内的减少同筑坝活动之间存在一种正相关的联系。而且,流域盆地内的水库等设施对河流运输的泥沙的截流在视觉乃至观测的角度都比较直观和容易被接受。然而,如果从河口或近海沉积动力学过程研究的角度出发,问题恐怕就不这么令人乐观。流域盆地中诸如退耕还林等水土保持措施同样会在一定的时间内引起单位面积的产沙量(率)或称侵蚀模数的下降。另一方面,已知在河口最大混浊带或近海观测到的悬浮颗粒物可能并非完全是直接来自于河流中的“新鲜的风化产物”,它们可以来自于对下游河床的冲刷乃至毗邻近海的侵蚀作用,例如“老”的海洋沉积物补充,尽管后者从终极物源的角度也是来自于陆地。在受季风气候影响的地区,往往会出现河流泥沙搬运的季节性变化特点;在近海,来自河流的沉积物可能在一段时间堆积在河口附近,在随后的风浪天气,这些沉积物可以被再悬浮和搬运至距岸更远的地方。

与化学肥料的应用相伴的是绿色农业革命,后果之一是文献中津津乐道的河流中植物性营养盐输送通量在近几年中的增加。似乎是,在有限的土地上为了养活日益增多的人口对食物的需求,一种直接的办法是在耕作中使用化肥。浮游生物所需求的植物性营养盐因其性质与赋存形式的差别,在流域盆地人类活动的影响下进入海洋后所产生的后果也不尽相同。氮是化肥使用中的重要成分,且可分为氧化(例如:硝酸盐)和还原(例如:氨)等不同的形式。尽管氮是大气中的主要组分,但在自然界中缺少氮的独立矿物;此外,含氮的化合物大都易溶于水。由于类似这样的原因,随着在耕作中大量使用化肥,河流中的溶解态无机氮(此处所指的溶解态无机氮包括硝酸盐、亚硝酸盐和氨盐的总和)通过地表和地下水从流域盆地中的流失也相应地增加。大多数的磷酸盐在天然水中的溶解度都比较小,而且磷酸根易于同钙、铁、铝等结合形成难溶的化合物,被截流在土壤的剖面之中不易流失或者流失比较缓慢。相比而言,在20世纪60~80年代许多的化学洗涤剂中都添

加有磷,所以,在西方国家的河流中来自生活废水的磷的含量历史上曾经一度增加,直到含磷的洗涤剂退出市场之后,情况才逐渐有所缓解。

相对于无机氮和磷,河流中溶解态硅酸盐的含量较少地受到化肥使用的影响,但是耕作本身促进了风化作用向地表的深部进行,也会加剧硅酸盐和硅铝酸盐以溶解态二氧化硅的形式流失。由于筑坝而在上游形成水库,淡水硅藻形成的水华会消耗溶解态的二氧化硅。在20世纪的后半期,欧洲和北美的一些河流中出现了溶解态二氧化硅的含量下降的现象。特别地,水库中的截流(植物的水华吸收和利用营养盐)所带来的无机氮和磷的亏损,可以在水库的下游得到补偿(例如:由于化肥的使用和通过生活污水的排放),河流中溶解态硅酸盐则主要来自于风化过程的补给,因而在河流的下游可以观测到当无机氮和磷的浓度逐渐增加时,溶解态的硅酸盐的含量出现下降的现象。需要指出的是,对于大的河流(例如:长江)水库大都修建于流域的上游,中、下游支流的补给可以缓解溶解硅酸盐的亏损。此外,在20世纪中期或以前关于河流样品的采集、分离(例如:水样采集后经过澄清或简单地用滤纸过滤后即进行测量)和分析的方法同我们今天所用的技术有很大的差别,这一点往往在数据的引用中不被重视。相比之下,随着技术的进步过去文献中报告的关于植物性营养盐的数据和结果可能会偏高(图2)。

若以长江为例,在图2中的数据 displays 在20世纪的50年代后期,溶解态硅酸盐的含量是70~80 μM (1 M=1 mol/L,余同),到20世纪60~70年代,曾经观测到溶解态硅酸盐的含量 $\geq 150 \mu\text{M}$ 。现在重新分析20世纪60年代中期长江中的溶解态硅酸盐的浓度出现峰值的具体原因比较困难,但是20世纪60~70年代它与悬浮泥沙含量之间的密切关系表明可能与那段时期流域盆地中的水土流失有关。在21世纪初,河流下游观测到的溶解态硅酸盐含量仍然较高,可达100~150 μM (图2)。

当从河流入海通量的变化趋势的角度出发认识流域盆地中的化学物质的收支及其影响因素时,大气沉降(在此包括干/湿沉降与气体形式)在其中的作用常常被忽视了。相对于风化作用甚至是化肥的使用,大气沉降对氮乃至磷的贡献可能是重要的,而且其所提供的化学成分可以具有较强的溶解度或者说植物的可利用性。例如,在欧洲的一些流域盆地(譬

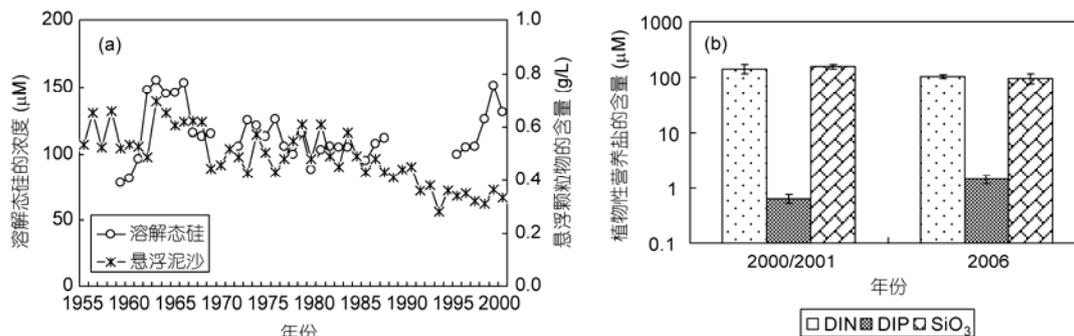
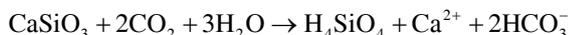


图2 长江下游溶解态硅酸盐浓度与悬浮泥沙含量的变化(a)以及近年来观测的植物性营养盐含量对比(b)

图中数据的来源: (a) 1995 年以前溶解态硅酸盐浓度的资料来自于长江水利委员会出版的水利年鉴以及文献[16], 1995 年之后的数据取自于长江下游南通、徐六泾等地的按月观测, 大通水文站悬浮泥沙的数据来自于长江水利委员会出版的水利年鉴, 此图根据 Ittekkot 等人^[17]的结果重新绘制; (b) 徐六泾按月观测并加权平均后的植物性营养盐浓度的成分特点, 此图根据文献[18]的结果重新绘制

如: 莱茵河与易北河)中, 当化肥的使用和工业/生活污水对河流水质的影响被有效地控制之后, 大气干/湿沉降对流域中无机氮和磷的收支的贡献相对地增加了^[19].

在目前的全球变化背景之下, 大气中二氧化碳与其他的温室气体的含量将会持续地增加. 由此, 也会影响到地壳表层的风化作用与化学物质通过地表与地下水从流域盆地的流失. 例如, 对于如下的风化过程:



当大气中的二氧化碳含量增加时, 地表的温度也会相应地升高, 两者都会加速硅酸盐和铝酸盐矿物的风化过程, 引起水体中溶解态硅酸盐的浓度增加. 后者在某种程度上会补偿因筑坝对硅酸盐的截流所导致的亏损.

3.3 近海的富营养化与有害水华

近几十年来, 近海的富营养化成为发达乃至发展中国家与地区重要的水质与环境问题, 而且问题并不仅仅在于此, 与此相伴的通常是在毗邻海域中出现某一些种类的浮游生物(通常是植物细胞)在比较短的时间内大量地萌发与快速地生长, 被称为有害水华或称“赤潮”. 关于近海的富营养化的含义通常有不同的理解, 但一种比较为大家接受的诠释是指近海地区有机物质的含量在近期不断增加以及由此引起的负面后果^[20]. 在我国的毗邻近海, 关于有害水华的报道在过去的 10 多年中一直是学术界的研究热点问题之一, 同时也引起了公众社会的普遍关注. 例如, 2009 年我国大陆的近海记录到的“赤

潮”(即: 有害水华)爆发达到 68 次, 累计面积为 $14.1 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[21]. 周明江等人^[22]曾指出, 在 1952~1998 年期间我国大陆近海共计有 300 多次关于“赤潮”的记录, 其中渤海占 8.3%, 黄海占 10%, 东海占 36.3%, 南海占 45%.

虽然, 在关于近海富营养化与有害水华的界定中并未明确地强调导致出现这种现象的驱动作用和机制, 文献中众多的研究结果却倾向于将上述问题同流域盆地(例如: 植物性营养盐的流失)或者海岸地区(例如: 海水养殖)的人类活动联系起来. 的确, 在很多的场合下, 我们所感受到的近海富营养化与有害水华以及由此产生的后果同人类活动的特点和影响程度之间存在着一种正相关的联系, 但是也应该注意到引起近海富营养化与有害水华发生的驱动作用和机制是复杂的, 亦包括在气候变化与海盆尺度的事件(图 3).

例如, 每年的秋冬季节, 黑潮次表层水(注: 相对于黑潮表层水而言, 次表层水和中层水中植物性营养盐的含量比较高)向东海陆架的涌升对那里的化学要素(譬如: 植物性营养盐)的分布格局和现存量的影响是重要的, 并且其影响一直可持续到春季; 此时, 由于东北季风的作用, 来自陆地径流的冲淡水在冬季沿着浙、闽海岸向南输运, 一直可达台湾海峡乃至南海的北部^[11]. 对于观测数据和卫星资料(例如: 温度场)的分析都支持这一点. 此外, 引起近海(例如: 长江口附近)在春季发生有害水华的细胞可能在东海陆架的深水区且温度相对较高处越冬, 待东北季风减弱或季风转向之后, 随着环流结构的变化开始到达近岸地区^[23]. 由此, 我们观测到的长江口外与毗

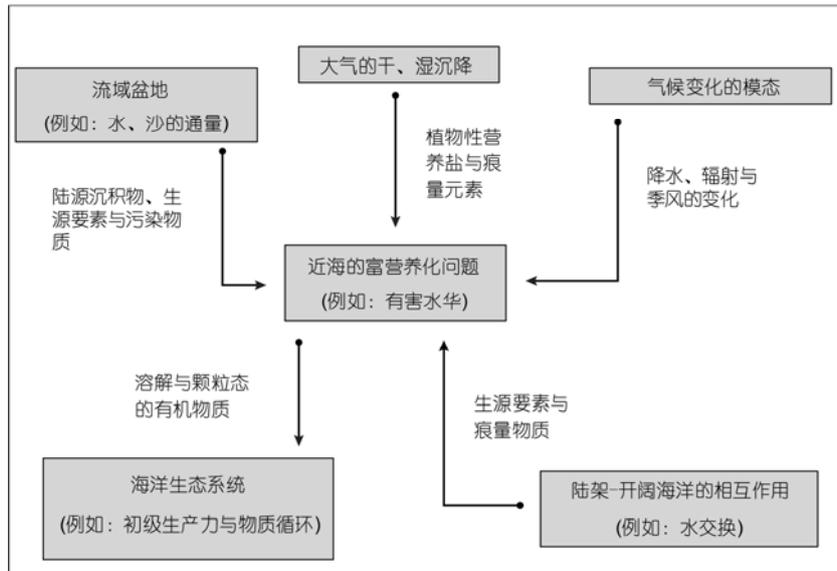


图3 影响近海富营养化与有害水华的发生和演化的主要因素

图中所涉及的机制是复杂的, 不仅仅只是受到人类活动的影响, 自然因素的变化所产生的“驱动”作用也是重要的

邻近海的有害水华其发生的时间、地点和影响规模等则不单单地受到来自长江的径流的变化影响, 更多地可能是受到气候(例如: 季风的强弱和转向时间)、环流的结构变化以及黑潮同陆架之间的相互作用(例如: 黑潮次表层水的涌升)的叠加产生的驱动作用控制(尽管黑潮同陆架之间的相互作用也受到季风的影响), 而后者在我们有限的观测能力范围不易被识别。

3.4 底层水缺氧与“死亡区”

在近海地区, 底层水中溶解氧的亏损是另外一个困扰学术界的命题, 并且在公共社会产生了广泛的影响。这种现象可以发生在河口、峡湾、半封闭的海域以及上升流地区。当水体中的溶解氧的含量降低到一定的程度, 会导致生物的死亡, 因而在学术界也有“死亡区”一说。在一些地方, 底层水中的缺氧同表层水中的富营养化同时存在, 因为富营养化产生的大量有机物质在随后的降解过程中首先会消耗水体中的溶解氧。从对生态系统作用的角度, 底层或近底层水的缺氧会直接导致生境的压缩乃至丧失, 并影响到食物网的结构和生物多样性。

虽然, 引起近海地区缺氧的作用机制包括自然变化与人类活动的诸方面因素, 近期的研究结果显示在过去的半个世纪以来文献中报道的缺氧事件与发生的地区明显地增多了, 而且出现在发展中国家

与地区缺氧事件的危害有迅速增加的态势。例如, 自20世纪50年代以来, 世界近海地区的缺氧事件在文献中的记录增加了十几倍, 从1950年以前的25处增长到21世纪初的400多处^[24]。特别地, 自1980年以后, 来自发展中国家与地区的相关报道的数量和相对比例都增多了(图4)。应该注意到, 在开阔海洋的真光层或者混合层以下的中层水体中也出现了溶解氧减少的现象, 但其更多地系与气候或全球变化尺度上的驱动作用相关联^[25]。

近海地区的缺氧问题同人类社会的可持续发展(例如: 渔业)之间具有密切的联系, 因为缺氧通过引起生境的丧失和生源要素之间的相互关系的变化等

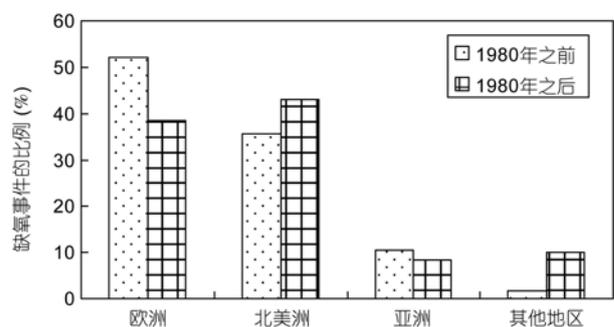


图4 世界范围近海缺氧事件的分布格局变化

显示自20世纪80年代以来, 发展中国家和地区的近海发生的缺氧问题更为严重; 图中的数据来自Diaz等人^[24], 根据Zhang等人^[20]的结果重新绘制

(例如: 体系中新生产力与可再生生产力之间的比率) 导致原有食物网的组成与结构发生了改变. 伴随着缺氧, 生态系统可以发生从自养向异养体系的转变, 导致痕量温室气体(例如: 二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等)向大气的释放增加, 对气候的变化具有反馈作用. SCOR#128 工作组(http://www.scor-int.org/Working_Groups/wg128.htm)在对全球近海缺氧问题的系统分析和对研究历史的回顾基础上, 提出下列的科学内容需要给予重视^[26]: (1) 近海环境中生源与痕量元素的相互关系与循环速率的差异对缺氧在生态系统水平上产生的负面效果(系一种上行效应)具有重要影响, 并引起食物网结构的改变乃至向其他层圈(例如: 大气与开阔海洋)的强烈反馈; (2) 尽管在许多情况下, 陆源物质的输入对近海地区的缺氧的发展和演化是重要的, 体系内部的生物地球化学过程或者说体系对于外部驱动作用的响应程度和在时、空尺度上的表现形式具有主导作用, 就这一点河口、峡湾、上升流地区和半封闭的海湾是不同的.

近海的缺氧问题不仅仅是自然科学研究的内容, 同时对人类社会的发展具有深远的影响, 研究工作不仅需要注意多学科交叉, 同时也需要强调新的观测和实验方法的植入和在技术层面的提升.

3.5 沉积物的“源”与“汇”

在我们所生活的地区, 气候特点与近海的环流结构的变化调整着陆源沉积物以及与其相结合的化学物质在近岸地区的分布格局与宿命. 在季风气候的控制下, 河流在夏季携带大量的淡水和悬浮泥沙入海; 特别是流经北方干旱地区的一些水系, 那里在枯季由于筑坝的拦截与调水河流的下游常常发生断流的现象. 伴随着近海水域的层化与相对较弱的动力环境, 河流在夏季对其所搬运的沉积物的卸载大都发生在近岸地区, 或者河口浊度锋区所影响的范围. 那些新近被搬运到河口与毗邻近海的沉积物通常可因颜色和沉积结构方面的差异(例如: 新近的沉积物通常出现在氧化状态的环境中, 呈黄褐色且比较松软)同“老”的沉积物予以区分. 此外, 在一些地区于固结程度比较高的海床之表面存在一层经常地参与沉降和再悬浮的松软沉积物, 称之为浮泥.

在冬季风控制的环境中, 近海的水体常常出现垂向均匀的水文要素(例如: 温度与盐度)剖面结构, 显示水层中发生了强烈的垂向混合. 在冬季风浪的

作用下, 近海的沉积物被再悬浮, 或者更为确切地讲, 出现了底沉积物经历频繁的再悬浮-搬运-沉降-再悬浮-再搬运-再沉降这样的事件. 从年际或更长的时间尺度来看问题, 陆源沉积物的主要堆积区域与汛期河口外面的混浊水的锋区范围并不一致. 以长江口为例, 尽管夏季冲淡水的外缘在大的洪水年份可达到朝鲜海峡附近, 但陆源沉积物的主要堆积地区却出现在长江口以南的浙、闽沿岸水深 $\leq 50\sim 75$ m 所限的范围. 在上述沉积动力学过程的主导之下, 三角洲前缘的沉积速率具有明显的时、空不均一性的特点; 河口附近的沉积速率在日-月(例如: 汛期)的尺度范围可达 5~10 cm 或更多, 而在年际尺度上则仅为 1~2 cm 或更低. 由此, 也给利用沉积物的记录来诠释过去历史的变化带来许多歧义和产生多解性.

3.6 对地球其他层圈的反馈

从生态系统功能的角度, 当体系具有自养控制的特点时, $p-r > 0$ (注: 这里 p 代表光合作用或泛指合成代谢; r 代表分解代谢, 例如呼吸作用), 并且在一定的时间尺度具有净的物质积累和对外部的物质输出. 相反, 在 $p-r < 0$ 的情况下, 体系为异养作用所主导. 在前一种状况下, 体系相对于大气而言是二氧化碳的汇, 在后一种情况之下, 体系成为大气中二氧化碳的源. 例如, 将牛、羊在草地上放牧, 这时由生产者(草地)和消费者(牛、羊)构成的体系对大气来讲应该是二氧化碳的汇; 但是, 若将牛、羊圈到圈里利用收割的牧草喂养, 则体系转变为对大气来讲成为二氧化碳的源. 只是在海洋中, 研究体系的边界和空间的尺度比较不确定, 生产者和消费者之间的相互关系、食物网的结构也比较复杂, 在时间尺度上的变化迅速(例如: 非稳态的特点), 均使得研究的问题变得扑朔迷离.

对于其他的一些痕量温室气体(例如: 甲烷与氧化亚氮), 情况会更为复杂一些. 在分子水平上, 甲烷和氧化亚氮引起的温室效应分别是二氧化碳的 300 和 25 倍, 而且两者在大气中的含量自西方工业化革命以来均快速地积累. 在海洋中, 不同的机制(例如: 硝化与反硝化作用)都会导致氧化亚氮的产生, 甲烷既可以在氧化又可以在还原的环境中被检出; 相对于 CO_2 而言, 影响甲烷与氧化亚氮的产生和海-气界面通量变化的机制更为复杂一些.

尽管总体上海洋向全球的大气释放甲烷与氧化

亚氮,但对大气中两种温室气体的贡献程度具有很大的差别.根据近期的估计,海洋向大气释放的甲烷仅占全球通量的百分之几(例如: $<5\%$),但海洋释放的氧化亚氮占整个自然界进入大气通量的三分之一以上^[27].此外,伴随着近海水域的缺氧问题,使得海洋对大气中温室气体的贡献在一些地方显著地增加.

另外一个研究的困惑是近海的生物地球化学过程的产物(例如:生源要素、有机碳、痕量气体等)如何影响开阔的海洋,亦即所谓的“陆架泵”(Continental Pump)的问题.通过陆架/边缘海同开阔海洋之间的水交换(例如:环流结构)、颗粒物的沉降或者近底边界层的物质输送(例如:浊流与Nephiloid层),来自陆源或者近海的有机物质与生源要素等可以进入深海.有研究报道,开阔海洋中的有机碳剖面显示,在受到陆源物质运输影响显著的地区,用C-14标识的有机物质的年龄比其他地方更“老”一些^[28].事实上,当近海的表层水同开阔海洋的交换与混合受到诸如锋区的限制时,物质随近底层水的运输就显得很重要,只是因为观测技术上的困难这一点过去常常不为人所重视.

3.7 海平面上升及其对社会与经济可持续性的影响

同其他类型的灾害性事件(例如:洪水与台风)相比,缓慢但持续的海平面上升通常不为人所注意,在有限的时、空观测范围似乎也看不到其具有哪些显著的负面效果.如此,我们所讨论的问题系在年或际年的时间尺度上认识平均海平面在毫米量级的改变,同那些洪峰流量与风暴潮增水在每小时或每天发生的变化相比,似乎微不足道.在谈到海平面的变化时,有两种不同的机制:一种是在海盆的尺度上的海平面的整体上升,与气候的变化相关;另外一种系由于观测地区的地面下沉所致,可以是自然的(例如:三角洲地区发生的压实作用)或者由于人类活动引起(例如:对地下水资源的过量利用导致的沉降).根据观测资料,在过去的30多年(1978~2008年)中,我国沿海地区的海平面上升的速率为 $2\sim 3\text{ mm/a}$ ^[29].相对于世界上的平均海平面变化趋势,我国近海的海平面上升的表现特点是不同的海域之间差别明显、年际之间的变化比较大,以及整体上的速率比较快(图5).

无论怎样,若从长期的效果来看,海平面的上升将会引起海岸带地区相对水深的增加,导致波浪传播的速度改变和对海岸工程设施的破坏能力加强.

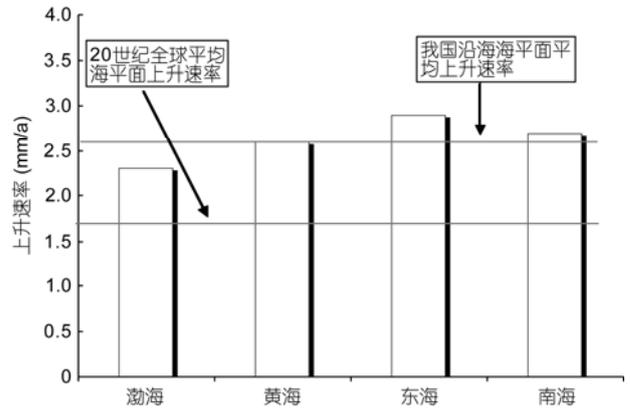


图5 2009年我国不同海域的沿海/近海地区的海平面上升速率对比

图中的横线分别代表20世纪全球平均海平面的上升速率(1.7 mm/a)和我国沿海地区在过去30年中的海平面平均上升速率(2.6 mm/a).数据引自文献^[30]

由此引起的后果尚包括:(1)海岸带地区的侵蚀作用将会加剧,海岸地形的剖面将会不断被改造,自然灾害(例如:风暴潮)引起的破坏作用将会更大;(2)伴随着海平面的上升,海水入侵作用增强,将导致沿海地区土壤盐渍化加剧;(3)在河口地区,海平面的上升将会引起海水的倒灌在今后更为严重,直接威胁到水资源的安全问题;(4)同样地,海岸带地区的生境也会伴随着海面的上升发生改变,并且将影响赖以生存的生态系统的结构、功能和它所提供的服务.

在可以预见的未来,我们现有的海岸工程设施抵御灾害的设计标准不得不提高,由此也将引起资金投入的增加、技术要求水准的改变,并且对沿海地区的社会可持续发展带来更大的困难.在今后的气候变化和人类活动的多重作用下,海岸地区以及毗邻海域的生态系统的演变受到海平面上升的影响将会具有更大的不确定性.

3.8 沿海地区的人类活动及其影响

在过去的30~40年中,我国沿海地区的经济活动与社会的发展格局产生了前所未有的变化.其中,渔业活动实现了从单纯的捕捞到它与增、养殖并举的转化,并且在21世纪初出现了养殖产量大于捕捞收获的局面.沿海地区的养殖活动在很大程度上改造了近海湿地生态系统的结构和功能,并且对我们的社会与经济的可持续发展产生了负面的影响.据统计,在“十五”期间我国围、填海的速率约为 $300\text{ km}^2/\text{a}$,

“十一五”期间,沿海省、市已完成和计划实施的围、填海的面积达 5000 km² [31]。现代化的围、填海工程,已经不再仅仅如我们的祖先一样系出于对农业耕作和制盐的需求,工业化与都市化成为重要的利益驱动因素。

近海的湿地是一个复杂且内部不同部分之间相互交错的体系。我们通常注意到湿地具有诸如像交通与航运、旅游、土地资源、水产养殖等方面的功能;但除此之外,湿地还是许多重要经济资源的栖息地和产卵场、孵化场等。在我们强调由于过度捕捞使得海洋经济资源衰退的同时,也应该想到还有其他的原因,譬如伴随着湿地的被破坏而导致的生境的永久性丧失,也会从资源补充的角度导致海域日益贫瘠的局面。就我们目前技术所达到的水平(例如:修筑港口与堤坝),在局域的范围可以很大程度上地改变湿地的结构和功能,甚至永久性的丧失。当通过围垦苛求湿地为人类社会提供土地资源方面的服务时,我们失去了它在另外一些方面具有的功能。例如,在我们现在所面临的“气候变化”背景下和受到的“低碳经济”约束中,湿地生态系统所具有的重要“碳汇”作用需要被仔细地认识,其在全球尺度上的贡献需要重新被评估。

4 关于陆-海相互作用我们还有许多东西未知

其实,尽管在过去的 20~30 年里中国的海洋科学发展迅速,在陆-海相互作用的研究领域我们的工作积累还是很不够。部分的原因系由于中国在近代海洋学的起步比较晚,中间因为战争或其他因素而又多次中断或被干扰,以至于文献中的数据比较零散且缺乏系统性。从全球的气候变化产生的驱动作用与近海生态系统的响应关系的角度出发,我们在过去 50~60 年中断断续续地工作积累在很多情况下尚不足以拿出令人信服的证据。特别地,在近海地区由于人类活动的影响所产生的后果是如此地明显,以至于在很多情况下同气候变化所产生的驱动作用混杂一道,甚至“淹没”了后者在生态系统的水平上产生的“信号”。

故而,在全球范围的“陆-海相互作用”的研究热潮中,我们需要冷静地思考:在我们所生活的环境中,陆-海相互作用研究的内涵其核心究竟是什么?譬如,伴随着 20 世纪中期以后世界性的流域筑坝风波,研究发现一些中、小河流中溶解态硅酸盐的含量在下降

(例如:多瑙河),并对毗邻近海的浮游植物的群落成分和结构带来了负面的影响(例如:硅藻与甲藻的组成),并且通过食物网关系作用于整个生态系统。对于大的河流而言,在流域的上游或中游修筑水坝对溶解态硅的截流,通常会由于来自下游的支流或地下水的贡献所补偿。因而,在河口地区并不一定就观测到显著地改变,或者变化的趋势不同(例如:存在时间上的滞后与空间尺度上的不均一性)。同样地,在弄清流域筑坝引起的河流化学物质入海通量的改变对近海生态系统的影响之前,需要分析与气候变化相关的自然变动的韵律特点,不是仅仅根据某一次或在有限时、空域中的观测结果就做结论。

此外,在陆架或边缘海,通过开边界的物质交换对于体系内部的生物地球化学循环乃至化学物质收支的贡献比我们此前所想象的更为重要,但是它的作用并不如我们所目睹的河流中的物质奔腾下泻入海一般直观和了然。在东海陆架,秋、冬季节黑潮水跨越陆坡的涌升对生源要素的收支具有重要的贡献,到夏季,来自台湾海峡水的影响变得显著一些;两者的作用就海盆的物质收支而言都可能比来自陆地的淡水径流的输入更为重要。

就上述以及其他的陆-海相互作用领域的一些基本科学问题,我们尚处于大致的了解阶段,还不能够依据已有的资料进行深入与细致地刻画;已经取得的认知也需要利用今后的观测事实进行检验。

5 小结

尽管在过去的年代中,中国海洋学的研究活动主要集中在近海,而且陆-海相互作用一直是研究的热点之一,部分的原因个人猜测系因为它同我们的社会和经济活动密切相关,同时也包含技术的限制和国家经济实力的不足,但仔细回想起来在一些基本的科学问题上我仍不得其解。在陆-海相互作用的领域,自然作用驱动下的“体系变化”常常在很大程度上受到人类活动的干预,后者产生的后果常常会“淹没”了所谓的“自然过程”。如果我们不能够很好地“剥离”由于人类活动带来的“局域性”的变化,则会限制我们对自然因素产生的结果的理解,也会影响我们在全球变化的框架范围认识陆-海相互作用的真谛。

尽管我们所生活的环境在世界范围的陆-海相互作用体系中具有非常明显的特点(例如:高强度且全方位的人类活动影响下的河口与海岸体系),但是我

们的研究成果仍难以突破国际上相关研究的框架。就我自己而言,当有幸置身于国际上研究的“热点”领域中时,是否能够仔细地反思应该刻意去研究的基本问题是什么?特别地,早期因为受制于技术进步和经济发展的因素,我们的观测能力比较薄弱,实验和分析的技术装备比较落后,对基本海洋观测数

据的积累也很欠缺;这些在现今国内外的学术交流相当活跃,研究的设备水平获得大幅度的提升之后得到了相当程度的改善。相应地,我们的学术研究活动从内涵来讲,应该更多地集中于对基本科学问题的探索和分析方面,从外延的角度宜着眼于陆-海相互作用在世界范围的不同表现形式。

致谢 本文所讨论的问题只代表我个人对事物的肤浅认识。陆-海相互作用是一个广泛的研究领域,它的涵盖范围从基础科学的命题一直到我们所处的社会与经济活动。在文中没有提到或涉及的问题决非并不重要,仅仅是因为我自己的知识十分地有限而已。在过去的近30年中,我自己是在向老师、前辈、周围的同事乃至同学生交往的过程中,学习做陆-海相互作用方面的研究,在此,我深深地感谢他(她)们。

参考文献

- 1 LOICZ. Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report 51/IHDP Report 18, Stockholm. 2005. 60
- 2 陈宗庸,王景明. 纪念唐世凤先生诞辰一百周年. 海洋湖沼通报, 2004, 4: i-vi
- 3 李法西,吴瑜端,王隆发,等. 河口硅酸盐物理化学过程研究, I. 活性硅含量分布变化及其影响因素的初步探讨. 海洋与湖沼, 1964, 6: 311-322
- 4 顾宏堪,熊孝先,刘明星,等. 长江口附近氮的地球化学 I. 长江口附近海水中的硝酸盐. 山东海洋学院学报, 1981, 11: 37-46
- 5 顾宏堪,马锡年,沈万仁,等. 长江口附近氮的地球化学 II. 长江口附近海水中的亚硝酸盐和氨. 山东海洋学院学报, 1982, 12: 31-38
- 6 顾宏堪. 渤海东海海洋化学. 北京: 科学出版社, 1991. 1-500
- 7 韩舞鹰. 南海海洋化学. 北京: 科学出版社, 1998. 1-287
- 8 Milliman J D, Jin Q M. Sediment dynamics of the Changjiang Estuary and the adjacent East China Sea. Cont Shelf Res, 1985, 4: 1-251
- 9 Yu G H, Martin J M, Zhou J Y. Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 1990. 898
- 10 Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. Glob Planet Change, 2011, 75: 14-20
- 11 Su J L. Circulation dynamics of the China Seas north of 18°N. In: Robinson A R, Brink K H, eds. The Sea. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. 483-505
- 12 Guo X Y, Miyazawa Y, Yamagata T. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current. J Phys Oceanogr, 2006, 36: 2205-2231
- 13 Zhang J, Liu S M, Ren J L, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. Progr Oceanogr, 2007, 74: 449-478
- 14 IMBER. Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 52, IGBP Secretariat, Stockholm. 2005. 76
- 15 Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. Geomorphology, 2006, 79: 192-216
- 16 李茂田,程和琴. 近50年来长江入海溶解硅通量变化及其影响. 中国环境科学, 2001, 21: 193-197
- 17 Ittekkot V, Unger D, Humborg C, et al. The Silicon Cycle: Human Perturbations and Impacts on Aquatic Systems. Washington: SCOPE 66, Island Press, 2006. 275
- 18 陈吉余. 21世纪的长江河口初探. 北京: 海洋出版社, 2009. 236
- 19 Behrendt H, Kornmilch M, Opitz D, et al. Estimation of the nutrient inputs into river systems-Experiences from German rivers. Reg Envir Chang, 2002, 3: 107-117
- 20 Glibert P, Pitcher G. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, Science Plan. Baltimore and Paris: SCOR and IOC, 2001. 87
- 21 国家海洋局. 2009年中国海洋环境质量公报. 2010. 1-62
- 22 周明江,朱明远,张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学, 2001, 13: 54-60
- 23 朱德第,陆斗定,王云峰,等. 2005年春初浙江近海的低温特征及其对大规模东海原甲藻赤潮发生的影响. 海洋学报, 2009, 31: 31-39
- 24 Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science, 2008, 321: 926-929

- 25 Stramma L, Johnson G C, Sprintall J, et al. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science*, 2008, 320: 655–658
- 26 Zhang J, Gilbert D, Gooday A J, et al. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: Synthesis and future development. *Biogeosciences*, 2010, 7: 1443–1467
- 27 Naqvi S W A, Bange H W, Farias L, et al. Marine hypoxia/anoxia as a source of CH₄ and N₂O. *Biogeosciences*, 2010, 7: 2159–2190
- 28 Bauer J, Druffel E R M. Ocean margins as a significant source of organic matter to the deep open ocean. *Nature*, 1998, 392: 482–485
- 29 国家海洋局. 2008年中国海平面公报. 2009. 1–11
- 30 国家海洋局. 2009年中国海平面公报. 2010. 1–15
- 31 苏纪兰. 我国围填海工程中的若干科学问题及对策建议. *中国科学院院刊*, 2011, 2: 21
-

On the critical issues of land-ocean interactions in coastal zones

ZHANG Jing

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Land-ocean interactions in coastal zones comprise a broad research topic in global change science that links the fundamental questions of marine sciences to the sustainability of socio-economics. In the present study, critical issues in land–ocean interactions were addressed based on recent research progress and a literature review. Specifically, the exchange between open boundary and coastal systems, loss of chemical elements from watersheds, coastal eutrophication and harmful algal blooms, hypoxia and dead zones, source vs sink of sediments in coastal environments, feedback to other compartments of the Earth system, sea level rise and its impact on economics and human society, and human activities in the coastal region were investigated. Although there are other critical issues of land–ocean interactions in the coastal zone, they were not dealt with in this study because of limited knowledge and research experience by the author.

biogeochemistry, land-sea interactions in coastal zone, sustainability

doi: 10.1360/972011-465