

奠基海洋化学研究, 助推海洋科学发展 ——中国科学院海洋研究所海洋化学研究 70 年*

宋金明^{1, 2, 3, 4}

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 中国科学院海洋研究所 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237;

3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

摘要 本文系统总结了中国科学院海洋研究所建所 70 年来, 海洋化学研究的发展历程和主要科学贡献, 在此基础上, 提出了海洋化学的发展愿景。建国初期的中科院海洋研究所是我国海洋化学研究的主要奠基者和引领者, 70 年来一直是我国化学海洋学、海洋生物资源化学利用以及海洋腐蚀与防护等领域的中坚力量, 为中国海洋化学的发展做出了不可替代的重大贡献。1950—1990 年, 系统获得了渤海东海重要化学要素的分布特征, 发现了黄东海溶解氧存在最大值系冬季保持而来; 构建了大型海藻经济组分提取的系统化方案, 奠定了世界最大规模海藻化学工业的基础; 系统开拓了我国海洋腐蚀与防护领域的研究。1990—2020 年, 中科院海洋研究所的海洋化学研究全面与国际接轨, 系统研究了中国近海化学要素特别是微痕量无机/有机组分的分布迁移转化特征及机制, 提出了海洋生物地球化学研究的系统思路; 研制成功褐藻多糖硫酸酯治疗肾衰新海洋药物, 发现大量具有生物活性的海洋活性物质, 在应用海洋化学领域也有重要进展。

关键词 海洋化学; 中国科学院海洋研究所; 70 周年

中图分类号 P734 doi: 10.11693/hyhz20200200046

自 1950 年 8 月 1 日中国科学院水生生物研究所青岛海洋生物研究室成立, 到 1954 年 1 月更名为中国科学院海洋生物研究室, 再到 1957 年 8 月 22 日成立中国科学院海洋生物研究所, 1959 年 1 月 1 日更名为中国科学院海洋研究所(IOCAS), 70 年来从事其海洋化学研究从最初的几个人, 发展到目前的 100 余人, 从引领和起步中国的海洋化学研究, 到研究成果立足于国际水准, 几代海洋化学人走过了一条立足中国实际布局世界前瞻努力奋发的探索之路, 70 年 IOCAS 的海洋化学研究为我国海洋化学学科建立和发展做出了奠基性的贡献。70 年来, IOCAS 的海洋化学领域承担了国家自然科学基金项目 160 余项, 国家 973 项目课题、863 课题、重点研发计划课题以及部

省和中国科学院重大项目 70 余项, 获国家省部级重大科技成果奖 30 余项, 发表学术论文 2800 余篇, 专著 40 余部, 培养博士生 150 余名、硕士生 260 余名, 培养的博士硕士其中的很大比例已成为所在单位和系统的学术骨干和管理中坚, 这些实实在在的数字承载了 70 年来 IOCAS 海洋化学人的辛勤努力和汗水, 在很大程度上支撑和发展了我国的海洋化学学科。

1 前 40 年(1950—1990 年)奠定海洋化学之海水化学-海藻化学-海洋腐蚀与防护三大研究方向的深厚基础, 理论研究和应用研发各显身手

中国科学院海洋研究所的海洋化学研究自 1950

* 青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目“近海生态灾害发生机理与防控策略”, 2016ASKJ02-4 号; 山东省重大科技创新工程专项“近海富营养化及其生态灾害环境驱动作用”, 2018SDKJ0504-1 号。宋金明, 博士生导师, 研究员, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-02-21, 收修改稿日期: 2020-02-28

年8月中国科学院水生生物研究所青岛海洋生物研究室成立就已开始,海藻化学是其最早的研究方向之一,由纪明侯具体领导。1958年鉴于海洋普查的迫切需求,8月IOCAS成立了新中国第一个海洋水化学研究组,主要有顾宏堪、刁焕祥、熊孝先等近10人。1960年5月,由原海洋植物研究室纪明侯负责的海藻化学研究组与物理海洋研究室顾宏堪负责的海洋水化学组组建了我国第一个海洋化学专门研究组织单元——海洋化学研究室,纪明侯、顾宏堪、徐祖洪和宋金明先后任研究室主任(中国海洋学会,2015)。20世纪60年代末至70年代先后成立了海洋放射化学、海洋腐蚀与防护、海水淡化、海洋药物、海水化学资源综合利用、海洋有机化学等研究方向。这一时期,其代表性的成果是初步获取了中国近海一些化学要素的分布特征,且对于海藻化学的研究支撑了世界最大规模的海藻化学工业体系的建立以及创造的脂肪酸盐绷带腐蚀防护技术的应用,同时海洋药物、海洋放射化学、海洋有机化学、海水淡化、海水化学资源综合利用等的研究也在我国海洋化学上占有一席之地。

1.1 奠定独具特色的海藻化学工业体系和海洋药物化学研发基础

1950年8月,伴随着中国科学院水生生物研究所青岛海洋生物研究室的成立,其海洋化学的研究就已起步。最先开展的研究是与生物资源利用密切相关的水藻化学资源利用研究,早在1952年曾呈奎、纪明侯等就开展了马尾藻提取褐藻胶的条件试验,其研究结果在1953年4月《科学通报》上以《褐藻胶试制成功》为题进行了报道,其主要内容是利用马尾藻提取褐藻胶并经北京医学院在弹性牙印模中进行应用,这是中国科学院海洋研究所及其前身有关海洋化学研究的最早公开报道。1954年8月,成庆泰在《生物学通报》以《我国的河豚和它的毒素》为题,报道了河豚的种类、身体部位组成以及其毒素的应用,这篇报道的单位是中国科学院海洋生物研究室,是海洋天然活性物质的第一次公开报道(成庆泰,1954)。1959年5月,纪明侯在《化学世界》发表了《海藻综合利用研究》一文,总结了海带(IOCAS海带北移是在非养殖成功后)提取褐藻胶、褐藻淀粉(包括褐藻糖胶)甘露醇、氯化钾和碘的工艺条件(纪明侯等,1959)。1965年8月,纪明侯等(1965)发表了《海藻化学研究的进展》,除总结海藻化学利用以外,还重点阐述了红藻琼胶、卡拉胶以及绿

藻多糖和其他海藻碳水化合物等的提取,并提及了应重视海洋生物重要珍贵组分发掘利用的思路,为后来海洋天然产物与海洋新药创制指出了方向。至此,中国海藻综合利用的研究技术业已成熟,并开始工业化生产,IOCAS的海藻化学资源利用研究,在曾呈奎等的指导下,在纪明侯领导的团队努力下,中国海藻化学工业体系基本建立,并逐渐发展成为世界最大规模的海藻化学利用工业。所以,IOCAS是新中国海藻化学工业的主要技术支撑者。

值得一提的是,在20世纪60—70年代,IOCAS还根据国家需求,开展了海水淡化、海水提铀、海水提溴、海藻药物研发、海藻利用新技术等的研究,其中,产出了一批如海水与处理技术及日产5吨反渗透苦咸水淡化装置、褐藻胶止血纱布、六硝酸甘露醇扩张血管药物、电渗析甘露醇生产新技术、海水提溴产业化等有重要影响的成果。特别是20世纪70年代研制成功并于1985年正式生产的降血脂血压新药——甘露醇烟酸酯最具有代表性,这是新中国第一个以药准字审批的海洋半合成新药(李延,1986)。

这一时期,IOCAS对海藻化学的主要研究结果被总结在《海藻化学》专著中。《海藻化学》由纪明侯编著,系统阐述了褐藻、红藻、绿藻等各种海藻中的化学成分组成、结构、含量变化、物理化学性质以及对其分析、分离、提纯原理(纪明侯,1997),对深入开展海藻化学成分的研究和利用有非常重要的参考价值,为海藻资源的开发利用提供了不可多得的基础资料和理论依据。

1.2 中国区域海水化学要素的检测与分布变化特征

1953年1月,中国科学院海洋生物研究室的建立促进了海洋生物相关学科的发展,特别是随着海洋调查的开始,1956年海水化学成为了支撑其发展的重要方向,而海洋环境分析自始至终一直是海洋化学的优先发展领域(孙玲玲等,2018)。1955年,姜康后翻译的苏联国立海洋研究所编著的《海水化学分析指导》一书出版,指导和促进了海洋调查海水化学要素分析发展,对IOCAS海水化学调查研究起了很大的作用。1957年5月,《化学学报》发表了郑时复、刁焕祥发表的《硝酸汞电位法测定氯离子》(郑时复等,1957),作为海洋化学发展的前提,海水化学要素的化学测定方法是IOCAS海洋化学最早发展的领域。1958年9月开始至1960年12月结束的全国海洋综合调查(也被称为海洋普查),极大促进了IOCAS海洋化学的发展,这可从当时海洋普查海洋组化学分组

的四位负责人李法西(厦门大学)、顾宏堪(中国科学院海洋研究所)、闵学颐(山东海洋学院)和林庆礼(农业部黄海水产研究所)的组成中就可看出。借鉴使用的海水分析方法在海洋普查的实践中得到了广泛验证, 第一次获得了系统的中国近海化学要素溶解氧、pH、盐度、磷酸盐、硅酸盐分布变化特征。全国海洋综合调查出版的《调查与计算资料》、《调查图集》和《研究报告》都有专门独立的化学分册, 特别是 150 万字的《研究报告》中的第六册专门阐述了中国近海若干化学要素的分布特征, 这也是新中国第一批海水化学系统调查的成果, 极大影响和带动了我国海洋化学学科的发展。全国海洋普查期间, 1959 年 3 月, 《科学通报》发表了中国科学院海洋研究所海洋化学小组撰写的《海洋化学及其发展》一文, 全面阐述了海水化学组分及其分布、海洋化学研究的领域等问题, 并在新中国成立后第一次把海洋化学分为了海水化学和应用海洋化学两大领域, 提出了海洋有机物很重要但还是空白, 研究水体化学须考虑底质, 要加强应用海洋化学如海水淡化、海水提取需要的微量元素资源等的研究一系列论点(中国科学院海洋研究所海洋化学小组, 1959), 拿到今天来看, 有的设想已经实现, 有的目前还仍有指导意义。在 1959 年 3 月《科学通报》同期, 熊孝先等报道了“胶州湾与氯度关系公式”, 这一时期, 是海水要素分析方法建立、完善和在海水调查应用的尝试阶段。1959 年 1 月, 中国科学院海洋生物研究所更名中国科学院海洋研究所, 标志着 IOCAS 由海洋生物学科为主转向了海洋科学全学科领域全面发展的新阶段。

可以明确的是, 全国海洋普查远没有解决海水化学要素分析方法的问题, 针对海洋普查中硝酸盐等测定的困难, 海水分析方法中的这些难题得以被关注, 所以, 需求导向一开始就是科学研究的动力, 稍后独立建立的海水分析方法以及改进方法的报道证明了这一点。1963 年 5 月, 李延在《海洋与湖沼》发表了《用二苯基联苯胺二磺酸钠测定海水中硝酸盐的研究》(李延, 1963)、熊孝先在 1965 年 5 月发表了《用二苯胺一二苯联苯胺混合试剂测定海水中硝酸盐》(熊孝先, 1965), 这些海水化学要素分析方法的建立和完善, 促进了 IOCAS 化学海洋学的发展, 也使海洋调查化学要素分析成为现实。顾宏堪等在 1973 年 1 月在《分析化学》发表了《单池示差反向极谱》一文, 并在 1974 年陆续在该期刊发表了这一系统在海水微量金属分析中的应用(顾宏堪等, 1973)。1979

年 3 月, 顾宏堪等在《环境科学研究》发表了《防吸附物理徐汞电极反向极谱系统》一文, 标志着这一分析系统比较成熟地在海水等中的应用, 之后以此为基础发表了许多海域微痕量金属的分布特征论文, 并提出了“天然水痕量金属离子均匀分布规律”这一假说(顾宏堪等, 1979)。至 1980 年, IOCAS 海洋化学无机组分、有机组分以及放射性核素等海洋化学之化学海洋学研究完整体系形成。

1950—1990 年, IOCAS 在海水化学要素分析方法构建、中国近海化学组分分布变化特征研究等方面奠基了中国化学海洋学发展的重要基础, 在近海化学组分变化过程及机制上也进行了一些探索, 在世界海洋化学研究史上留下了厚重浓彩的一笔。其中, 有关中国近海溶解氧最大值的发现与形成机制研究有重要影响。

1966 年 5 月, 顾宏堪在《海洋与湖沼》发表了《海水溶解氧夏季垂道分布中的最大值》一文, 系统分析了海水溶解氧最大值的多种形成因素, 在对中国近海溶解氧最大值分布及影响因素分析基础上, 分析了其主要成因, 提出了海水密跃层或温跃层的存在是形成氧最大值的必要条件, 其氧最大值是夏季以前保持下来的(顾宏堪, 1966), 由于次表层的氧最大值所处海水深度大于补偿深度, 在诸多的观测中氧最大值深度层也并未发现有异常大量的浮游植物, 所以氧最大值由该处的浮游植物光合作用直接产生不太可能。指出除在某些特定的小海域可能有浮游植物产生大量可足以形成溶解氧最大值外, 夏季密跃层附近的溶解氧最大值, 主要应是由冬季水团保持而来, 根本的原因来自于夏季溶解氧最大值以上密跃层以下的海水温度和密度大, 跃层附近垂直涡动导致的海水混合强度小。一般而言, 浮游植物光合作用随着不同海域浮游植物初级生产力及其他环境条件的不同而不同, 光合作用产生的氧不足以形成夏季氧的最大值, 仅能影响溶解氧最大值的强度。夏季溶解氧最大值的海水上层, 低的溶解氧主要源于其高的海水温度; 溶解氧最大值的下层, 其溶解氧减小的程度, 则受控于水体有机物降解而消耗氧的程度(顾宏堪, 1966)。

IOCAS 这一时期对中国区域海洋化学的研究主要结果被总结《渤黄东海海洋化学》专著中。该专著由顾宏堪主编, 1991 年出版, 聚集中国科学院海洋研究所 28 位海洋化学专家编著而成, 该成果获 1992 年中国科学院自然科学二等奖。专著主要阐述了渤黄东

海重要无机物、有机物、放射性核素的分布变化规律及界面转移特征,共二十章,约60万字(顾宏堪,1991)。该专著是我国第一部“区域海洋化学”研究巨著,内容丰富、新颖、系统,一些方法的建立,规律的发现,理论及概念的提出,富有创始性和突破性,具有重要的资料价值和理论意义。

这一时期 IOCAS 化学海洋学研究与我国的总体情况类似,有这样几个显著特点:(1)以全国海洋普查为代表的基于海上调查的海洋常规化学物质地球化学分布研究报道最多;(2)单学科的海洋化学研究特点明显,缺乏多学科多手段多思维的综合系统研究,对复杂海洋生物-化学-动力作用过程的解析则很少涉及;(3)获得了一些具有奠基性开拓性中国特色的中国近海化学海洋学新规律、新现象和新发现。我国在这一时期比较有代表性的研究结果包括提出并发现夏季黄东海溶解氧垂直分布最大值由冬季保持而来、南海次表层水存在亚硝酸盐的薄层及生物活性层以及河口区域硅酸盐的迁移机制主要是通过金属氧化物吸附而转移等(宋金明等,2000a,2019b)。

1.3 海洋腐蚀与防护研究日趋壮大

20世纪60年代初,面对海洋腐蚀重大危害,为研究海洋腐蚀的机制与发展防护技术,IOCAS在海洋化学学科开始了海洋腐蚀与防护研究。1966年2月,戴钟道、季明堂等在《海洋与湖沼》发表了《钢铁在海水中阴极保护时钙镁覆盖层的保护作用》一文,报道了钙镁覆盖膜的成分及其保护机制、效果以及对钢样品的极化性能的影响、金属的表面状态以及海水流速对膜的形成影响(戴钟道等,1966),这是IOCAS海洋腐蚀与防护研究的首次公开报道。并以此为基础,戴钟道研发了钢桩脂肪酸盐防护绷带技术方法,并在实际过程中进行了应用。此后,IOCAS的海洋腐蚀与防护研究领域日益拓展,研究队伍规模逐渐扩大,在中国腐蚀与防护领域占有重要一席。

2 近30年(1990—2020年)构建具有我国特色的海洋化学研究的理论体系和应用领域,实现了海洋化学过程机制和应用领域研究与国际衔接和同步

进入20世纪90年代,随着全球变化研究的兴起,一系列重大国际计划开始实施,海洋化学的基础研究由化学海洋学全面转向了海洋生物地球化学过程研究。海藻化学研究也进入了海洋天然活性物质发现

和新兴海洋药物研发的新阶段,海洋腐蚀与防护研究也更加关注腐蚀机制机理的研究。近30年来,IOCAS的海洋化学研究逐步而系统地全面与国际前沿接轨,研究成果进入了与国际同领域齐步的新时期。初步的统计数字表明,在20世纪80年代,IOCAS海洋化学发表于国际期刊的论文数量占其发表论文总数的3%,到2020年,已达到近70%。

2.1 中国近海化学要素的分布特征与规律

中国近海海水化学要素的分布尽管区域分布和季节变化明显,但其分布呈现了一些相似的特征,即在水平分布上,大多呈现近岸浓度高,远岸浓度低的特征,特别是在河口、海湾等人为影响严重的海域尤为明显(宋金明,1997,2000a),一般近海浓度高于远海;在垂直分布上,多呈现表层低,下层高,部分化学参数如溶解氧(Song *et al.*,1996)、亚硝酸氮等呈现次表层有最大值现象,底层表层沉积物的再悬浮对化学要素的再释放对底层水化学要素有重要影响(宋金明等,1997)。海洋沉积物及颗粒物中化学要素的分布要远比海水中的分布复杂,特别是其区域变化明显,其化学要素的分布受其成因影响巨大,这为用沉积物反演其过去生态环境变化提供了前提(Song,1992,1999; Song *et al.*,2002; 宋金明,2004)。海洋沉积物/颗粒物的化学海洋学研究近30年已成为海洋化学获取科学认知最活跃领域之一(宋金明,2000b; 宋金明等,2018)。

中国近海化学要素的检测随着现代高端分析仪器及技术的发展,已经可以从常量元素、微痕量元素、生源要素、常规同位素以及常规有机组分的定量检测发展到超痕量元素、稀有痕量有机物以及非常规同位素的分析(Song *et al.*,2005; 张倩等,2018),这对研究复杂的生物作用过程、大气-水-岩石圈相互作用机制以及探讨化学要素的生态学功能等意义重大。

2.2 海洋生物地球化学过程研究的兴起与发展

20世纪80年代聚焦于全球变化研究的多个重大国际计划的实施,对海洋的作用及其过程解析提出了更高层次的需求,使化学海洋学的研究基本全面转向了以研究海洋生源要素为核心的海洋生物地球化学过程研究,化学海洋学的研究全面与海洋生物生产过程、海洋沉积过程、海洋动力过程等交叉融合,助推了我国海洋生物地球化学的系统发生发展(宋金明,1990,1993,1997,2000c,2004; 宋金明等,2017a)。IOCAS首先系统提出了海洋生物地球化学的定义和研究范畴,即“海洋生物地球化学”是研究生物过程作用

下海洋环境中生源要素或生物有关化学物质的分布、富集、分散、迁移、转化的规律, 探明海洋生态系统对这些化学物质变化反馈机制的一门综合交叉学科, 侧重于海洋环境中碳、氮、磷、硅、氧、硫等生源要素的研究(宋金明, 2004)。并在其后的研究中明确了海洋生源要素的定义, 即“海洋生源要素”系指控制海洋有机生产的水平, 决定海洋基础生物生存生长所必须的一类关键化学要素或化学物质, 其范围包括营养盐在内的碳、氮、磷、硅、氧、硫等(宋金明等, 2019a)。30 年来, IOCAS 在海洋化学要素的分布迁移转化过程、海洋生态环境变化特别是生态灾害发生过程化学要素的作用机制、海洋沉积物/颗粒物的生态学功能等领域富有特色和引领性(宋金明, 2004; Song, 2010; 宋金明等, 2019b)。这一时期首次确切定义了海洋“生源要素”和“海洋生物地球化学”的内涵和外延, 提出海洋沉积物/颗粒物具有重要生态学功能的系统论断; 对热带“沙漠绿洲”珊瑚礁生态系高生产力的形成机制提出了全新的“拟流网理论”, 发现了珊瑚虫海藻可“奢侈消费”营养盐的新规律, 提出了南沙珊瑚礁生态系的高生产力主要是依靠其系统内部快速而高效的再生循环过程维持, 营养盐的原位快速再生是珊瑚礁营养盐的主要来源, 化学物质的垂直转移主要靠生物过程来完成(Song, 1997; Song *et al.*, 1998; 宋金明, 1999a, 1999b, 2004; 宋金明等, 2003); 在提出沉积物自然粒度下形态研究的新思路下, 发现了近海沉积物中含有的氮、磷、硅的量虽然巨大, 但仅有少部分可参与水体的生物地球化学循环的新规律, 首次定量揭示了中国近海典型海域沉积物中碳、氮、磷、硅的形态及其在生物地球化学循环中的作用(宋金明, 2004; Song, 2010); 首次给出了我国东中国近海作为大气二氧化碳汇的强度及季节变化, 初步阐明了中国近海碳循环的关键控制过程(Song, 2010; Song *et al.*, 2018)。通过多学科的综合探究, 出版系列渤黄东海生物地球化学过程研究专著, 系统揭示了渤黄东海的关键生物地球化学过程, IOCAS 为我国海洋生物地球化学学科的成熟和发展做出了突出贡献[《渤黄东海生源要素的生物地球化学》(2019)、《渤黄东海微/痕量元素的环境生物地球化学》(2017)、《胶州湾的化学环境演变》(2016)、《Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas》(2010)、《中国近海与湖泊碳的生物地球化学》(2008)、《中国近海生物地球化学》(2004)、《中国近海沉积物-海水界面化学》(1997)]。

2.2.1 渤黄东海海洋化学要素的分布迁移转化过程

碳化学在生源要素生物地球化学研究中占据极为重要的地位(Song *et al.*, 2020)。如果仅考虑海-气界面的 CO_2 交换, 渤海向大气中释放约 0.22Tg C/年 , 黄海吸收大气 CO_2 约 1.15Tg C/年 , 东海吸收 $6.92\text{—}23.30\text{Tg C/年}$, 渤黄东海显然是大气二氧化碳的汇。黄海在冬、春季表现为大气 CO_2 的汇, 在夏、秋季表现为源, 表层海水温度与浮游生物活动控制着黄海 CO_2 源汇的变化, 两者分别主导了黄海外部海域与近岸海域的海气 CO_2 交换。东海全年则表现大气 CO_2 的汇, 年均通量约为 $-3.16\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 其中冬、春、夏季吸收大气 CO_2 , 秋季释放 CO_2 。黄海和东海水体中分别储有 $425\times 10^6\text{t}$ 、 $1364\times 10^6\text{t}$ 的溶解无机碳(DIC)和 $28.2\times 10^6\text{t}$ 、 $54.1\times 10^6\text{t}$ 的溶解有机碳(DOC), 南黄海近年 DOC 浓度有减小趋势, 其水体溶存实际碳汇量在减小。黄东海颗粒有机碳(POC)的总量约为 $10.6\times 10^6\text{t}$, 与海-气面 CO_2 交换通量基本处于同一量级(Song *et al.*, 2018)。黄海浮游生物年固碳量约为 $60.42\times 10^6\text{t}$, 东海为 $153.41\times 10^6\text{t}$, 其中近海大型经济藻类的年固碳量为 $0.36\text{—}0.45\times 10^6\text{t}$ 。黄海大陆架沉积物中有机碳的埋藏通量每年约为 $4.75\times 10^6\text{t}$, 其中海源有机碳的埋藏量为 $3.03\times 10^6\text{t}$, 占黄海浮游生物固碳量的 5.0%, 而东海陆架沉积物中有机碳的埋藏通量为每年 $7.4\times 10^6\text{t}$, 其中海源有机碳的埋藏量为 $5.5\times 10^6\text{t}$, 占东海浮游生物固碳量的 5.4% (宋金明等, 2008a)。

输入到渤海的氮、磷主要受控于陆源河流、排污口和非点源, 在总体分布上, 呈现为近岸高、远岸低的特征, 由于浮游生物过程作用, 海水中的氮磷呈现显著的季节变化。在渤海, 海水中的有机氮占总溶解氮的 59%, 无机氮占 41%。在其有机氮中尿素占 6.8%; 溶解无机氮中硝酸盐占 82.9%, 亚硝酸盐所占比例最低, 氨氮居中也占有一定比例; 海水中溶解无机磷(DIP)春、冬季含量较高, 夏季最低, 但全年均表现为底层 DIP 浓度要高于表层。渤海表层沉积物中有机氮占总氮约 65.2%, 固定态氮约占 29.6%; 表层沉积物中总磷含量的变化范围为 $10.83\text{—}20.27\mu\text{mol/g}$, 无机磷(IP)是表层沉积物中磷的主要存在形式, 平均占总磷(TP)的 81% (Song *et al.*, 2002; 宋金明等, 2004)。渤海溶解营养盐的高值区主要分布在受人类活动影响的区域, 尤其是在海湾和河口区域, 陆源输入是影响渤海溶解营养盐的主要因素。浮游植物的季节性生长是影响渤海营养盐分布发生季节变化的另一重要因素, 浮游植物生长旺季会因为消耗营养盐而使海水中营养盐含量降低。

此外,水动力条件也会影响营养盐的分布。在冬季,因冬季季风而造成的上下层水体的混合会使冬季表、底层营养的含量差别不大;夏季温跃层的存在会阻碍底层海水中营养盐向表层输送,使底层营养盐含量明显高于表层。渤海 DIN 和 DIP 是控制浮游植物群落结构变化的最重要的物质供应因素,易受磷限制的浮游植物种类(嗜磷浮游植物)的优势地位逐步下降,易受氮限制的浮游植物种类(嗜氮浮游植物)的优势地位逐步升高,总体而言,渤海的浮游植物磷限制整体格局已经形成。

黄海海水中营养盐的高值区主要分布在南黄海西南、长江口东北部等海域,全年均存在营养盐高值区,其主要来源于长江冲淡水的径向向东部外海的输送,同时营养盐也受到次表层水-中层水高营养黑潮水的入侵影响。但在南黄海冬季,黄海槽区中部海域的营养盐浓度明显高于近岸海域,主要缘于存在的黄海冷水团,其上层水中营养盐几乎被浮游植物所吸收耗尽,但在密跃层以下,有机质的降解再生而出的营养盐一直在累积,在以黄海槽为中心海盆中形成相对“封闭”的高营养盐区。在秋末冬初,处于季风区域的南黄海发生强烈的垂直涡动混合,将积聚在黄海冷水团底部的高浓度营养盐带至上层海水。同时,黄海暖流在向北过程中将部分向南的西朝鲜沿岸流富营养盐冷水夹携至南黄海中央海域,也会使冬季中央海域的营养盐含量增加。对黄海冷水团而言,其真光层下的水体中,营养盐浓度从 2 月到次年 11 月呈线性增加的情形,硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐之间及其与 DO 均存在良好的线性相关性,表明黄海冷水团中的营养盐主要来源于有机物的降解。在一年中的大部分时间段,黄海以氮氮利用为主的新生产力占总初级生产的 60%以上,在新生产力的空间分布表现为近岸海域的高生产力和高新生产力、中央海域的为低生产力和低新生产力特征,黄海无机氮磷硅的停留时间分别约为半年、两年半和 2—4 年,比较分析表明黄海以营养盐为代表的生源元素的物地球化学循环速率较世界其他海域高。黄海沉积物中的氮、磷、硅与邻近海域的水平差异不大,其特征为北黄海更接近渤海,南黄海更接近东海。沉积物-海水界面扩散是黄海水体中硅的主要来源,占总输入的 48%(地表径流占 3.0%,渤海供给占 1.5%,大气仅占 0.5%)。黄海水体硅的支出主要是生源硅(BSi)的沉积埋藏和向东海的输出,其比例分别为 72%和 27%,黄海向渤海输出比例仅为 1% (宋金明等, 2006a, 2019a)。黄海

胶州湾的环境生物地球化学研究也获得了系统的认识,胶州湾近百年来经历了三个阶段的演变,20 世纪 70 年代以前,胶州湾受人为影响很小,其化学要素水平基本呈现“背景值”且比较稳定,从 20 世纪 80 年代起,胶州湾明显受到人为活动的影响,其沉积物中的化学组分持续增加,直到 20 世纪 90 年代中到 2000 年达到高峰,2000 年后,由于环保治理措施的加强,沉积物中的化学组分呈现明显降低,基本稳定在较低的水平(宋金明等, 2016)。

东海海水中氮、磷、硅在分布上呈现从表层到底层营养盐含量逐渐增加、从西向东营养盐含量逐渐降低的基本特征。春夏季海水 DIN、 $PO_4\text{-P}$ 、 $SiO_3\text{-Si}$ 的高值区均出现在 123°E 以西的长江口邻近海域,此处营养盐浓度变化剧烈,形成明显的营养盐锋面,向外海迅速降低。春夏季东海中部混合水区域 DIN 和 $PO_4\text{-P}$ 几乎被消耗殆尽,秋冬季则南迁至 123°E 以西、 28°N 附近的浙南沿岸海域, $PO_4\text{-P}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 还在 $124^\circ\text{—}125^\circ\text{E}$ 、 $30^\circ\text{—}31^\circ\text{N}$ 附近的东海北部区域存在部分高浓度区域,秋冬季黄海沿岸流的南下入侵是影响其分布格局的重要因素。一般来说,东海秋冬季营养盐的含量要高于春夏两季,且高值特别是 $PO_4\text{-P}$ 和 $SiO_3\text{-Si}$ 高浓度区的向东扩展特点非常清晰 (Song, 1992, 1999)。近年,东海沉积物中生源要素研究大量涌现,主要研究聚焦在生源要素分布、来源及生态环境演变(石鑫等, 2019)等。

黑潮与东海生源要素的交换对东海的生态环境有重大影响,黑潮由东海陆架向外海的输出交换通道主要有经台湾东北部海域输送至东海陆架和通过日本九州西南海域输出两个通道。对黑潮与邻近东海生源要素的交换特征进行对季节、多年度系统的调查和研究表明:(1) 在台湾的东北部区域,碳主要通过表层水-次表层水输入,一般秋季的输入量高于夏季;黑潮输入东海的营养盐以溶解营养盐的占据绝对主导地位,以黑潮次表层水-中层水的输入为主,春季输入通量高于夏秋季,这就可能为东海春季水华提供一定的营养物质基础,值得欣慰的是输入到东海的黑潮水其 N/P 值与 Redfield 比值 16 比较接近,黑潮这些“正常水”的输入显然可对东海异常高的 N/P 海水有重要的“调和”作用,使显著高 N/P 东海水向正常 N/P 海水过渡,从而对东海的生态环境起到稳定和缓冲作用。所以,黑潮水对东海的输入不仅一定程度补充了东海生态系统运转所需的生源要素,更为重要的是降低了受人为影响强烈的东海海水的

高 N/P 值, 使东海水原本已失常的营养盐结构向合理的氮磷比方向转变, 所以, 黑潮与东海生源要素的交换在一定程度上起着稳定和缓和东海生态环境的作用。(2) 通过新构建海水 Ba-S 指标体系, 可定量细致地刻画黑潮对东海生源要素输入的范围和程度, 即黑潮次表层水从台湾东北陆架坡折处沿底部向北偏西方向入侵东海, 其近岸分支可以入侵到浙江近岸, 其黑潮次表层水占比仍可达到 65% 左右。在垂直方向上, 陆架外侧水体受黑潮次表层水的影响更大, 50% 黑潮水的范围可延伸至 122.59°E, 25.49°N 邻近区域的表层, 而内侧靠近大陆的站位则只限于陆架中部区域的底层(宋金明等, 2017b)。黑潮对东海的影响也体现在在了 DO 等其他化学要素的变化特征上(Zuo *et al.*, 2019)。

2.2.2 海洋生态环境变化特别是生态灾害发生过程化学要素的作用机制 IOCAS 近年来针对化学要素对黄东海发生的浒苔、水母以及赤潮等生态灾害发生消亡中的作用进行了研究, 发现并证实了营养盐结构及水平变化在其中起重要而关键的作用(宋金明等, 2012)。高浓度的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有利于浒苔对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收, 过高的 N/P 值及过高的氮浓度均会加重磷的限制。在磷酸盐含量适中时, 高浓度的硝酸盐更能促进浒苔的生长, 证明浒苔更适合高 N/P 的环境, 同时能看出浒苔的生长更容易受到 N 的限制, 充足、连续的营养盐补充是浒苔绿潮暴发的物质基础。浒苔的腐烂分解会造成水体的缺氧、酸化和加重水体营养盐水平, 对环境有非常重要的影响。有研究估算, 自 2007 年持续发生的黄海大规模浒苔, 可从海水中吸收固定 36 万吨的碳、2.3 万吨的氮、400 吨的磷和 1.6 万吨的硫, 并随绿潮的漂移将大量的营养物质从江苏北部近岸海域输送至山东半岛南部海域。

水母生长乃至暴发时, 需要摄食巨量的浮游生物, 这时水母充当的是营养元素的“汇”, 而水母死亡后的降解则会释放出大量的营养物质, 为浮游生物提供营养, 增加海域的初级生产能力, 此时水母在水体中的角色由营养元素的“汇”就转化为了“源”。模拟实验显示, 水母消亡过程中溶解态氮的释放多以无机的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主, 可占总溶解态氮的 69.6%—91.6%(平均为 $81.2\% \pm 7.7\%$), 其次为 DON, 占总溶解态氮的 7%—30.1%。水母消亡释放大量的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 显著改变了水体中溶解态氮的比例。水母从暴发到死亡仅仅需几周或 2—3 月的时间, 在这么短的时间内水母将大量营养物质汇聚在体内, 死亡后又在 5—9 天

内将这些营养物质释放到水体中, 无疑地加速了营养物质的循环并改变营养物质的结构, 水母消亡还可引起水体溶解氧的显著降低, 造成海洋生态系统的失衡(宋金明等, 2019a)。

2.2.3 海洋沉积物/颗粒物的生态学功能 IOCAS 在这一时期提出了海洋沉积物/颗粒物生态学功能新的研究方向, 取得了系列新的认识。海洋沉积物/颗粒物在物质循环中起着异常重要的作用, 是生源要素生物地球化学循环过程中关键源与汇, 一方面沉积物/颗粒物是海水生源要素的主要最终归宿, 生源要素从溶解态经复杂的生物-化学过程转变为颗粒态, 颗粒物再沉降形成沉积物; 另一方面, 海洋沉积物/颗粒物经过微生物-浮游动物-底栖生物作用分解形成溶解态的生源要素, 并释放到海水中再次被浮游植物群落利用, 进入下一轮循环, 所以, 海洋沉积物/颗粒物具有异常重要的生态学功能。众所周知, 浮游植物是海水溶解态生源要素的利用者和海源颗粒态生源要素的初始形成者, 浮游动物通过摄食浮游植物或其他有机颗粒物释放出溶解态生源要素或形成更大的颗粒物, 颗粒物沉降后形成的沉积物又通过底栖生物摄食-扰动-破碎等过程将颗粒生源要素释放进入水体中参与再循环。生态系统不同类群的生物在颗粒生源要素的释放-沉降中所起的作用不同而又相互关联, 这其中浮游动物-底栖生物的摄食与代谢、微生物参与的分解过程起着非常重要的作用(宋金明等, 2018)。

在海洋生物泵作用过程中, 海洋浮游植物在生源要素从溶解态变为颗粒态中起决定性作用, 颗粒态沉降和沉积物中的生源物质循环微生物过程作用巨大, 大部分有机质被需氧或厌氧过程转化为 CO_2 和氨氮、硝酸盐和磷营养盐, 所释放出的生源物质进入水体后又参加新一轮的初级生产。在温带近海沉积物中, 有氧呼吸和厌氧硫酸盐还原作用对总碳矿化的贡献大致为 50%, 而在包括潮间带和富营养化沿海泻湖等有机质丰富的区域, O_2 仅能被输送到沉积物中几毫米的深度, 硫酸盐还原可能占到总碳矿化的 80%(宋金明, 2000b)。

海洋中 POC 主要来源于海洋浮游植物、浮游动物及其残骸、粪便以及微生物等。在溶解物质向颗粒物转化的过程中, 溶解态的生源要素可以通过颗粒物吸附或被一些难降解物质包裹等物理过程形成颗粒物, 也可以通过凝聚、聚合等化学过程形成颗粒物, 还可以通过浮游生物吸收或摄食等生命过程形成颗粒物。所形成的颗粒物在重力作用下向下沉降过程中

一部分(通常是大部分)通过矿化和生物摄食转换成溶解态物质重新进入水体,一小部分不被降解的残留颗粒物将被输送到海底形成沉积物,通常这部分颗粒物仅占总颗粒物的一小部分,有报道称海洋中产生的碳酸盐中的 10%和有机碳中的 1%可以进入沉积物并保存下来。浮游动物在生源要素转移过程中也起着重要的作用,主要是通过生物泵和碳酸盐泵实现对生源要素的传递。浮游动物通过摄食浮游植物或低一级的浮游动物同化吸收大量的生源要素,然后通过呼吸、排泄和死亡壳体等再将不同形式的碳返回海水中。其中,能形成碳酸盐壳体的浮游动物将有机碳转化碳酸盐,在其死亡后碳酸盐壳体可进入沉积物,这是碳酸盐泵的重要组成部分。呼吸作用产生的 CO_2 和大部分的排泄物重新进入水体形成 DIC 或 DOC,重新参与碳循环。浮游植物通过食物链,逐级转化为浮游动物、鱼等更大的颗粒。浮游植物和粪便物质可能最终会积累于沉积物中,也可能被摄食悬浮物的生物如某些浮游动物及低营养级的鱼等将其从水体中移走。在一些海域,摄食悬浮物的生物大大地影响着水体的清澈度,这是底栖动物所提供的一种生态系统功能。沉降的物质可能直接被摄食沉降物者吞食或成为颗粒态有机物的一个来源,而后者最终被大型动物、小型动物或原生动物所吞食。当然,更多的有机颗粒可以被细菌和/或真菌所分解,尤其对于很稳定的难降解颗粒,大型动物难于利用时,一些物质可以部分地被细菌和真菌所分解,作为可溶性有机物的一个来源而被其它细菌利用(宋金明, 2000b)。

2.3 海洋天然活性物质发现与海洋新药研发

近 30 年来, IOCAS 海洋天然活性物质的研发从大型经济海藻转向了非常规大型藻和极端环境微生物活性物质的研究,发现了大量新结构的化合物,并对部分新化合物进行了若干活性功能的研究,研制成功新海洋药物褐藻多糖硫酸酯抗肾衰新药并产业化生产(徐祖洪等, 1998),产生了巨大的社会效益, IOCAS 是我国海洋天然活性物质研究和海洋新药研发的重要力量(宋金明, 2001, 2006)。自 20 世纪 90 年代后, IOCAS 还对甲壳素和壳聚糖及其衍生物从提取、合成、表征到生物活性以及在农业等方面应用进行了系列研究(李鹏程等, 1994, 1998),并对水母毒素进行研究和应用(于华华等, 2005),这些研发成果都有重要的影响。

众所周知,具有特殊结构和生物活性的海洋天然产物,如多糖及寡糖类、肽类、多酚类、卤代萜类、

神经毒素等,具有抗肿瘤、抗病毒、治疗心血管疾病、抗菌、抗炎、抗氧化以及免疫调节功能等药理作用(王斌贵, 2010)。至今,发现的新化合物超过 30000 个,这其中特极少部分仅有十几个被开发为海洋新药。1990 年至今,海洋药物研发发文量位居前 15 位的研究机构中,中国科学院发文 120 篇,被引 2187 次,篇均被引 18.23 次,占全球前 20 研究机构发文总量的 13.63%。这其中, IOCAS 占有相当比例。

3 海洋化学研究发展展望

IOCAS 时光跨过 70 年,面对海洋强国战略和海洋经济发展的强力需求,化学海洋学与应用海洋化学的发展面临难得的发展机遇,需要站在国际学科发展前沿,围绕国家需求,解决重大科学问题,创新重大海洋化学技术,为国际和我国海洋化学的发展做出应有的贡献。纵观国内外海洋化学的发展状况,海洋化学有三大发展趋势,一是化学海洋学研究将更加深层次地与全球变化特别是人类活动影响下的海洋学过程相结合,其明显的趋势是与海洋动力过程以及海洋生物生产过程的有机结合,通过长期准确的调查和监测,采用多学科、多手段的综合研究,探明近海与大洋化学物质的迁移转化规律,探明全球气候变化和海洋生态环境变化对地球环境和世界社会经济发展的影响,为构建应对这些变化的措施提供科学基础。二是化学海洋学研究在体现指导海洋资源环境可持续利用的作用方面将更为明显,化学海洋学的监测和分析将为探明海洋环境化学物质在驱动和支撑海洋生态系统运转和海洋资源利用程度、方式等方面提供科学基础。三是在应用海洋化学领域,研发海洋资源环境可持续利用的新技术体系和方法,包括海水利用和海水淡化、海洋矿产资源利用、海洋新药与生物制品创制、海洋材料腐蚀与防腐等,服务国民经济发展和民生需求,同时对应用海洋化学新技术的基础理论以及应用的机理与机制研究在应用海洋化学领域也必须给予重视。需要特别指出的是,从近海走向深海大洋是海洋化学正在和将来大力发展的领域,对于从深层次认识海洋、经略海洋意义特别重大。在基础研究上,聚焦深海极端环境生命过程与极端环境适应机制的探究,对“暗生命”物质和能量收支过程与机制进行解析,探明深海区域如冷泉热液区、海山区等深部生物圈的能量转运-代谢模式、深海适应机制以及深部生物圈随环境演变的进化特征,特别应重点研究深海微生物驱

动的生源要素生物地球化学循环过程和机制、能量产生消耗过程及其耦合、微生物自养固碳及惰性有机碳矿化过程对深海物质和能量来源、深海(渊)异养微生物的能量来源、有机碳利用能力及分解和合成代谢途径等; 在应用研发上, 聚焦深层水生生物资源化学利用(特别是极端环境下海洋新药创制、活性物质发现等)、深层海水开发利用以及深海矿产资源利用的化学技术研发等。

参 考 文 献

- 于华华, 刘希光, 邢荣娥等, 2005. 水母毒素蛋白凝聚现象的初步研究. 海洋与湖沼, 36(5): 413—417
- 王斌贵, 2010. 海藻及其共生微生物化学成分与生物活性研究. 见: 中国化学会第八届天然有机化学学术研讨会论文集. 济南: 中国化学会, 51
- 中国科学院海洋研究所海洋化学小组, 1959. 海洋化学及其发展. 科学通报, (4): 116—117
- 中国海洋学会, 2015. 中国海洋学学科史. 北京: 中国科学技术出版社, 183—218
- 石 鑫, 宋金明, 李学刚等, 2019. 长江口邻近海域海水 pH 的季节变化及其影响因素. 海洋与湖沼, 50(5): 1033—1042
- 成庆泰, 1954. 我国的河鲀和它的毒素. 生物学通报, (8): 17—19
- 孙玲玲, 宋金明, 于 颖等, 2018. 荣成湾 14 种海洋经济生物体中的重金属水平与食用风险初步评价. 海洋与湖沼, 49(1): 52—61
- 纪明侯, 1997. 海藻化学. 北京: 科学出版社, 1—777
- 纪明侯, Chi M H, 1965. 海藻化学研究的进展. 海洋与湖沼, 7(3): 306—328
- 纪明侯, 张燕霞, 蒲淑珠等, 1959. 海带综合利用研究. 化学世界, (6): 273—276
- 李 延, 1963. 用二苯基联苯胺二磺酸钠测定海水中硝酸盐的研究. 海洋与湖沼, 5(2): 115—123
- 李 延, 1986. 新降血脂药——甘露醇烟酸酯的研制. 海洋科学, 10(2): 59
- 李鹏程, 宋金明, 1994. “农乐一号”农作物浸种剂. 见: 中国实用科技成果大辞典. 成都: 西南交通大学出版社, 181
- 李鹏程, 宋金明, 1998. 甲壳质/壳聚糖及其衍生物的应用化学. 海洋科学, (5): 25—29
- 宋金明, 1990. 天然环境中元素的存在形式和形态. 海洋环境科学, 9(2): 46—55
- 宋金明, 1993. 全球变化研究中化学海洋学的几个新领域. 海洋科学, (4): 26—31
- 宋金明, 1997. 中国近海沉积物-海水界面化学. 北京: 海洋出版社, 1—222
- 宋金明, 1999a. 维持南沙珊瑚礁生态系统高生产力的新观点——拟流网理论. 海洋科学集刊, (41): 79—85
- 宋金明, 1999b. 南沙珊瑚礁生态系中元素的垂直转移的途径. 海洋与湖沼, 30(1): 1—5
- 宋金明, 2000a. 中国的海洋化学. 北京: 海洋出版社, 1—210
- 宋金明, 2000b. 海洋沉积物中的生物种群在生源物质循环中的功能. 海洋科学, 24(4): 22—26
- 宋金明, 2000c. 海洋生物地球化学的产生与发展. 世界科技研究与发展, 22(3): 72—74
- 宋金明, 2001. 中国海洋天然活性物质开发新技术 21 世纪发展战略. 海洋科学, 25(4): 50—52
- 宋金明, 2004. 中国近海生物地球化学. 济南: 山东科技出版社, 1—591
- 宋金明, 2006. 中国海洋化学研发的主要进展及展望. 海洋开发与管理, 23(5): 47—50
- 宋金明, 马红波, 李学刚等, 2004. 渤海南部海域沉积物中吸附态无机氮的地球化学特征. 海洋与湖沼, 35(4): 315—322
- 宋金明, 马清霞, 李 宁等, 2012. 沙海蜃(*Nemopilema nomurai*)消亡过程中海水溶解氧变化的模拟研究. 海洋与湖沼, 43(3): 502—506
- 宋金明, 王启栋, 张 润等, 2019b. 70 年来中国化学海洋学研究的主要进展. 海洋学报, 41(10): 65—80
- 宋金明, 李学刚, 2018. 海洋沉积物/颗粒物在生源要素循环中的作用及生态学功能. 海洋学报, 40(10): 1—13
- 宋金明, 李学刚, 邵君波等, 2006b. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为. 海洋与湖沼, 37(4): 370—376
- 宋金明, 李学刚, 袁华茂等, 2008a. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 28(2): 551—558
- 宋金明, 李学刚, 袁华茂等, 2019a. 渤海东海生源要素的生物地球化学. 北京: 科学出版社, 1—870
- 宋金明, 李鹏程, 1997. 南沙珊瑚礁生态系中稀有元素的垂直通量. 中国科学(D 辑), 27(4): 354—359
- 宋金明, 赵卫东, 李鹏程等, 2003. 南沙珊瑚礁生态系的碳循环. 海洋与湖沼, 34(6): 586—592
- 宋金明, 段丽琴, 2017a. 渤海东海微/痕量元素的环境生物地球化学. 北京: 科学出版社, 1—463
- 宋金明, 段丽琴, 袁华茂, 2016. 胶州湾的化学环境演变. 北京: 科学出版社, 1—400
- 宋金明, 袁华茂, 2017b. 黑潮与邻近东海生源要素的交换及其生态环境效应. 海洋与湖沼, 48(6): 1169—1177
- 宋金明, 徐永福, 胡维平等, 2008b. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学. 北京: 科学出版社, 1—533
- 宋金明, 徐亚岩, 张 英等, 2006a. 中国海洋生物地球化学过程研究的最新进展. 海洋科学, 30(2): 69—77
- 张 倩, 宋金明, 李学刚等, 2018. pH 对 SPE-HPLC-ESI-Q-TOF-MS 检测海水中小分子活性物质的影响研究. 海洋与湖沼, 49(6): 1230—1242
- 郑时复, 刁焕祥, 1957. 硝酸汞电位法测定氯离子. 化学学报, (4): 241—245
- 顾宏堪, 1966. 海水溶解氧夏季垂直分布中的最大值. 海洋与湖沼, 8(2): 85—91
- 顾宏堪, 1991. 渤海东海海洋化学. 北京: 科学出版社, 1—500
- 顾宏堪, 刘明星, 1973. 单池示差反向极谱. 分析化学, 1(1): 15—22
- 顾宏堪, 刘明星, 包万友, 1979. 防吸附物理涂汞电极反向极谱系统. 环境科学研究, (S1): 112—119
- 徐祖洪, 李智恩, 毕爱芳, 等, 1998. 治疗慢性肾衰的海洋新药 FPS 的研究. 中国海洋药物, (4): 41—45
- 熊孝先, 1965. 用二苯胺-二苯联苯胺混合试剂测定海水中硝酸盐. 海洋与湖沼, 7(2): 113—121
- 戴钟道, 季明堂, 顾锦城, 1966. 钢铁在海水中阴极保护时钙镁覆盖层的保护作用. 海洋与湖沼, 8(1): 51—59
- Song J M, 1992. Thermodynamic behaviour and enrichment characteristic of iron and manganese in sediment interstitial waters of the East China Sea. In: Proceeding of the 2nd International Symposium on Marine Science of the Yellow Sea. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 103—113
- Song J M, 1997. Biogeochemical process of major elements in sinking particulate of Nansha coral reef lagoons, South

- China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(4): 557—562
- Song J M, 1999. Progress in the studies of marine biogeochemical process in China. In: 1995—1998 China National Report on Physical Sciences of the Oceans and on Hydrologic Science for the 10th General Assembly of IUGG (Birmingham, UK. July 1999). Beijing: China Meteorological Press, 73—84
- Song J M, 2010. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. Berlin Heidelberg: Springer, 1—662
- Song J M, Li P C, 1998. Vertical transferring process of rare elements in coral reef lagoons of Nansha Islands, South China Sea. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(1): 42—48
- Song J M, Luo Y X, Lü X X *et al*, 2002. Biogeochemical processes of phosphorus and silicon in southern Bohai Sea surface sediments. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 20(4): 378—383
- Song J M, Pedersen T F, 2005. Application of transition metal isotope tracers in global change research. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 23(2): 218—225
- Song J M, Qu B X, Li X G *et al*, 2018. Carbon sinks/sources in the Yellow and East China Seas—Air-sea interface exchange, dissolution in seawater, and burial in sediments. *Science China Earth Sciences*, 61(11): 1583—1593
- Song J M, Wang Q D, 2020. A new mechanism of atmospheric CO₂ absorption promoted by iron-nitrogen coupling in low-latitude oceans during ice age. *Science China Earth Sciences*, 63(1): 167—168
- Song J M, Zhan B Q, Li P C, 1996. Dissolved oxygen distribution and O₂ fluxes across the sea-air interface in East China Sea waters. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 14(4): 297—302
- Zuo J L, Song J M, Yuan H M *et al*, 2019. Impact of Kuroshio on the dissolved oxygen in the East China Sea region. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(2): 513—524

LAY A FOUNDATION FOR MARINE CHEMISTRY RESEARCH AND BOOST THE DEVELOPMENT OF MARINE SCIENCE: MARINE CHEMISTRY RESEARCH FOR 70 YEARS IN THE INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES (IOCAS)

SONG Jin-Ming^{1, 2, 3, 4}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract The author systematically summarized the development history and main scientific contributions of the marine chemistry research in 70 years since the establishment of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS). And on this basis, the development prospect of the marine chemistry research is put forward. IOCAS in the early days of the founding of the People's Republic of China was the main founder and leader of China's marine chemistry research. Over the past 70 years, IOCAS, which make an irreplaceable and significant contribution to the development of China's marine chemistry, has been the backbone of China's chemical oceanography, chemical utilization of marine biological resources, and marine corrosion and protection studies. From 1950 to 1990, the distribution characteristics of important chemical elements in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea were obtained comprehensively; meanwhile, it was found that the dissolved oxygen contents exist maximum values in the Yellow Sea and the East China Sea, which have been found maintained since winter. A systematic scheme for extracting the economic components of macroalgae was established, which laid the foundation for the world's largest chemical industry of algae. The research on marine corrosion and protection in China has been systematically explored and developed. From 1990 to 2020, the marine chemistry research in the IOCAS was fully in line with the international standards. The distribution, migration and transformation characteristics and mechanism of chemical elements, especially micro-trace inorganic/organic components, were systematically studied in the China marginal seas. A systematic approach to the study of marine biogeochemistry was proposed. In addition, there have also been important advances in the applied marine chemistry. For example, a new marine drug for the treatment of renal failure was successfully developed, and a large number of bioactive marine substances were discovered.

Key words marine chemistry; Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS); 70-year anniversary