

范成新, 刘敏, 王圣瑞, 等. 近20年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(4): 346-374. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.038. [FAN Chengxin, LIU Min, WANG Shengrui, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 346-374. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.038.]

近20年来我国沉积物环境与污染控制 研究进展与展望*

范成新¹, 刘敏², 王圣瑞³, 方红卫⁴, 夏星辉⁵, 曹文志⁶, 丁士明¹, 侯立军⁷,
王沛芳⁸, 陈敬安⁹, 游静¹⁰, 王菊英¹¹, 盛彦清¹², 朱伟¹³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 地理信息科学教育部重点实验室, 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200240; 3. 北京师范大学 珠海校区水科学研究中心, 粤港水安全保障联合实验室, 广东 珠海 519087; 4. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 5. 北京师范大学 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 6. 厦门大学 环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 7. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200240; 8. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 9. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 10. 暨南大学 环境学院, 广东 广州 511443; 11. 国家海洋环境监测中心 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 266003; 12. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 13. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 内陆水体(湖泊、水库、沼泽、河流)和河口海洋等底部, 广泛且连续分布着沉积物质, 在其形成过程中受自然和人类活动影响, 具有与污染物有关的环境意义和特征。中国区域差异大, 环境问题较为突出, 经过近几十年来围绕沉积物环境和污染控制开展的研究, 我国相关成果不断涌现。首先介绍了国际上有关沉积物环境的若干里程碑性研究, 回顾了前70年我国沉积物研究的发展历程。然后侧重于与人为活动有关的环境污染, 分别从沉积物环境和污染控制修复两个方面, 总结和归纳了近20年来中国在沉积物水环境中的作用及效应、污染物在沉积物—水界面环境行为与影响因素、沉积物生态风险与质量基准、污染沉积物的原位修复、污染沉积物疏浚及异位处置利用等方面的主要研究进展, 评述了其中一些研究成果的联系和差异。最后对我国沉积物环境研究中存在的问题进行了分析, 提出关于多学科交叉、复合污染、新兴/非传统污染物、质量基准、治理技术创新等几个亟需和深入开展研究的科学和技术问题, 给出了解决的思路和途径, 并进行了展望。

关键词: 沉积物; 环境效应; 生态风险; 质量基准; 污染控制与修复; 处理利用; 中国

中图分类号: P951 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2021)04-0346-29

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-03-23.

* **基金项目:** 国家自然科学基金重点项目“长江三角洲城市群典型POPs环境过程、耦合机理与空间模拟”(编号: 41730646); 国家自然科学基金联合基金项目“洱海界面系统磷迁移转化特征及藻类水华影响机制”(编号: U1902207); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“径流变化条件下雅鲁藏布江生源物质迁移转化过程及微生物作用机制”(编号: 91647206)和“径流变化条件下雅鲁藏布江水沙变化及河床演变研究”(编号: 91647210)资助。

作者简介: 范成新(1954-), 男, 江苏南京人, 研究员, 主要从事湖河沉积物污染及其修复研究. E-mail: cxfan@niglas.ac.cn

1 引言

Sediment一词形成于16世纪中叶,源于拉丁文 *sedere* (sit) → *sedimentum* (setting) 和法文 *sédiment*。据维基百科(Wikipedia)词典,沉积物(sediment)为任何可以由流体流动所移动的微粒,并最终成为在水或其他液体底部的一层固体微粒。1750年Hales等^[1]为表述将井水蒸发后附着在烧瓶底部的析出物(盐类矿物),首次将“sediment”作为术语用于公开发表出版物。1820年,Bauer^[2]在巴芬湾(Baffin's Bay)进行真菌观察时,因带红色的原位沉积物(original sediment)为其特有的生长基质,从而将sediment带入了自然水体的专业用词中。虽然后来人们将人类尿液、血液中的“沉渣”和“沉淀物”也称之为sediment^[3],但200年来,sediment(沉积物)一词更多地被用于自然水体(河、湖和海洋等),其物理含义也被扩展至冲积物、泥沙、底泥、底质等地质学、水文学和化学等专业领域的特定表述。

沉积物位于水圈、土壤—岩石圈和生物圈的交汇区,沉积物环境是指垫覆于地表水体底部的连续沉积层。沉积物环境是自然界中沉积物的形成、分布和转化所处空间的环境,指围绕人群空间及可直接或间接影响人类生活和发展的沉积固体微粒,其正常功能的各种自然因素及相关社会因素的总体。虽然人类关注污染环境的时间较短,但对沉积物与自然环境和生物之间关系的研究却已有较长历史。在1870s,人类从地质学和水文学角度,首次观察到河流中存在含沥青的沉积物^[4],并记录到了土性沉积物的蚀变^[5]现象,其里程碑性意义在于,它们是最早将沉积物与岩石圈(地质环境)和水圈(水环境)建立关联的2项研究,为以后的沉积物环境研究做出了开拓性的工作。与生物圈(生物环境)产生联系的沉积物研究大致开始于20世纪中叶。Rittenberg等^[6]通过测定近岸沉积物中pH、氧化还原系统、有机质及氮含量,初步揭示了海洋沉积物营养物再生的物理化学和生物环境;Oliff等^[7]对海滩和近岸沉积物中化学参数和底栖动物密度开展了污染区和非污染区对比;Woodin^[8]分析了华盛顿州 Mitchell Bay 泥滩环境对软性沉积物(Soft-Sediment)中多毛类底栖动物丰富度的影响等,这些工作直接将沉积物环境的研究引入到了化学地理学和污染生态学领域。另外,将生理学观察的微电极法应用于沉积物,特别是Hesslein^[9]的膜渗析平衡技术(Peeper)和Davison等^[10]的薄膜扩散梯度技术(Diffusive Gradients in Thin-films, DGT)的面世及

应用,使人们直接和被动地精细获取沉积物—水界面附近环境样品和目标物信息成为了可能。

我国是一个湖泊众多、水系发达的沿海国家,面积超过1 km²的湖泊有2 800多个,总面积约8万 km²;流域面积在100 km²以上的河流有50 000多条,河流总长度43万 km;专属经济区和大陆架海域面积约300多万 km²(其中属于内海和领海总面积约28万 km²),海岸线长度18 000 km。多样的地貌形态、显著的气候和区域社会经济差异,使我国内陆水体和河口海洋沉积物蕴含着极其丰富的环境信息,同时也有着自身独特的环境问题。然而,我国的沉积物研究起步相对较晚,最早是由民国北洋时期全国水利局陪同美国陆军工程兵对淮河泥沙影响所做的堤防考察^[11]。实质性研究来自1931年翁文灏^[12]基于中国北方主要河流的淤积和黄河泥沙观测成果的总结^[12],这也是我国学者以sediment为主题的最早科技文献。1949年后,随着国家对大江大河的水患控制和水源调蓄的重视,特别是在改革开放以来与世界科技信息的交流,使我国在沉积物环境研究领域取得了突飞猛进的进步。

回顾20世纪我国沉积物环境的研究,大致可分为以下3个发展阶段:第一阶段(1930—1949年),主要研究的是泥沙淤积,代表性工作几乎都来自于对黄河的治理。自1931年翁文灏率先发表关于黄河泥沙研究后,人们在研究地质影响和土壤性质时,也涉及到一些与水体泥沙的相关部分^[13,14];任美镔^[15]在组织的战后黄河问题总结和治理计划中,重点加入了与泥沙有关的地理和水文方面的专项内容;就泥沙拦截的堤坝位置与治理目标是否一致等问题,其后还产生过较大争论^[16]。但受当时技术装备条件限制,此阶段的研究以定性描述为主。第二阶段(1950—1977年),主要研究运动和静止中的沉积物(泥沙)状态和性质,工作分两大部分:一是关于泥沙运动力学^[17,18]、河床演变^[19]、水利枢纽工程泥沙^[20]以及河口海岸泥沙问题^[21]的研究,主要应对国家迫切需求;二是关于第四纪沉积^[22]、海洋和湖泊底质调查^[23,24]及沉积物与矿藏^[25]的研究,涉及了沉积物中的元素分析。第三阶段(1978—2000年),实质性涉及沉积物环境演变与地球化学规律与理论的研究,主要开展了沉积物自然演变、环境记录、环境与生物地球化学等领域的工作。其中以陈吉余等^[26]为核心的长江口动力过程和地貌演变研究,以王苏民等^[27]为核心的湖泊沉积与环境演化研究,以万国江等^[28]为核心的沉积物地球化学和界面研究等,在各

自领域获得的成果相对系统并具有引领作用。这一时期国家还启动了多个与沉积物环境有关的河流、湖泊、海洋污染和生态系统等大型研究项目,特别是在湘江重金属污染、湖泊富营养化、厦门海域河口生物地球化学和渤海生态系统动力学等相关研究中,产出了一大批研究成果^[29-36],这一时期的传统泥沙环境研究水平也得到进一步提升^[37]。实际上,大约自 20 世纪 80 年代起,现代的沉积物环境研究已逐步转向与污染环境相关的研究方向,形成了几乎完全不同与泥沙和古沉积方向的另一研究领域。

进入 21 世纪,随着科研投入的增加和频繁的国内外学术交往,我国沉积物环境的研究获得迅猛发展。以英文文献统计,2000 年与“sediment environment”有关的国外期刊发表的文献 391 篇,其中中国学者贡献 14 篇(占 3.6%);2020 年的 1 654 篇中中国学者贡献了 505 篇(占 30.5%)。虽然总文献数只增加了 3.23 倍,但中国学者文献发表数量却增加了 35 倍。近 20 年来,与污染有关的沉积物环境研究成果大量涌现,本文依托已建立的全国性沉积物环境与污染控制研讨会等学术交流平台,对近 20 年来我国现代沉积物环境分支领域的研究现状和重要研究进展进行总结和分析,以进一步推动沉积物环境的基础和应用研究发展,促进沉积物作为一门学科的建立和逐步完善。

2 我国沉积物环境研究进展

2.1 沉积物在水环境中的作用、特征及效应

沉积物处于水圈、岩石圈、土壤圈和生物圈的自然交汇点,在关键带和水环境物质能量循环,以及环境质量的变化中,占据重要地位,因而有关沉积物及其环境效应的研究备受关注^[38,39]。自然和人类活动对沉积物来源、分布和污染物赋存等产生着重要影响,无论从可量化的陆域输入、内源负荷的宏观环境影响,还是从可再悬浮和移动颗粒载体的微观行为和环境效应而言,沉积物在水环境中都起到了极其重要的作用^[40]。

2.1.1 关键带中的作用与地位

关键带是集岩石—土壤—生物—水—大气相互作用、相互依赖的区域,调节着生命自然栖息地和地表资源的可持续供给,维持陆地生态和水生生态系统的运行,是人类生存和发展的基础。近 20 年来,我国在水环境和关键带沉积物的沉积特征、物质循环及生态效应方面开展了大量的研究,并取得了许多重要研究成果。

沉积物是有机质的主要存储库,有机质在经微生物分解成二氧化碳、氨和水等无机组分的过程中,驱动着包括江河湖海水体和关键带中碳、氮、磷、硫和重金属等元素以及持久性有机物的循环,维持生态系统健康和平衡^[41]。其中,河口关键带作为陆海相互作用的集中区域,其物理、化学和生物条件比湖泊、河流和海洋等复杂得多,沉积物在碳库平衡、消减陆源污染物以及维系海岸带地区生态安全方面,扮演着更为重要的角色(图 1)。计娜等^[42]基于水下沉积物与地貌实测数据,分析了河口岸滩沉积物和地貌形态变化特征,表明沉积物在岸滩稳定性防护中具有不可替代的作用。社会经济的快速发展,含有大量营养盐的水体进入河口地区,而沉积物能成为氮磷等营养物质的归宿地和蓄积库,削减其入海通量^[43]。但也有研究表明,蕴藏于沉积物的营养盐可重新释放至上覆水体,造成二次污染,进而影响生态环境^[35,39]。沉积物作为上覆水营养盐源汇的转变与营养盐含量、沉积物理化性质(粒径组成、温度、盐度、pH、溶氧和有机质等)以及水动力等具有密切的关系^[44]。河口关键带沉积物中的微生物,在氮转化过程中也发挥着重要的氮素平衡调节作用,其中反硝化和厌氧氨氧化过程通过去除部分活性氮,有效地缓解了一些区域的氮负荷^[45]。此外,沉积物还可通过化学或生物等过程降解和转化有害物质,但也有许多重金属和持久性有机污染物因难降解而累积于沉积物中,对关键带生态系统健康和带来一定的危害^[46,47]。

2.1.2 与人类活动关系

开垦耕种、水利工程建设及污染物排放等人类活动,对接纳水域沉积物和泥沙的量及其沉积特征产生很大影响。据 Yang 等^[48]和 Wang 等^[49]研究,由于土地利用变化和水土保持措施的改变等影响作用,近些年来,我国如长江、黄河和珠江等许多河流的输沙量或泥沙负荷都表现出显著的下降。据 Wu 等^[50]研究,世界上超过 70% 的河流被水坝截流,至少一半的河流沉积物可能被截流在人工水坝和水库中,显然人类活动正在逐步改变我国沉积物在内陆水体中的空间分布。据刘慰等^[51]研究,由于人类大量占用水域进行围海造田和修建水利工程等,导致海湾纳潮量减少、沉积动力变弱,悬浮泥沙增加落淤机会,增加了沉积速率,促进海湾的淤积。人为调节则会造成沉积地形的改变,王厚杰等^[52]结合卫星遥感图像研究发现,2005 年 6~7 月 20 余天的黄河调水调沙期间,大量泥沙快速入海,泥沙沉积形

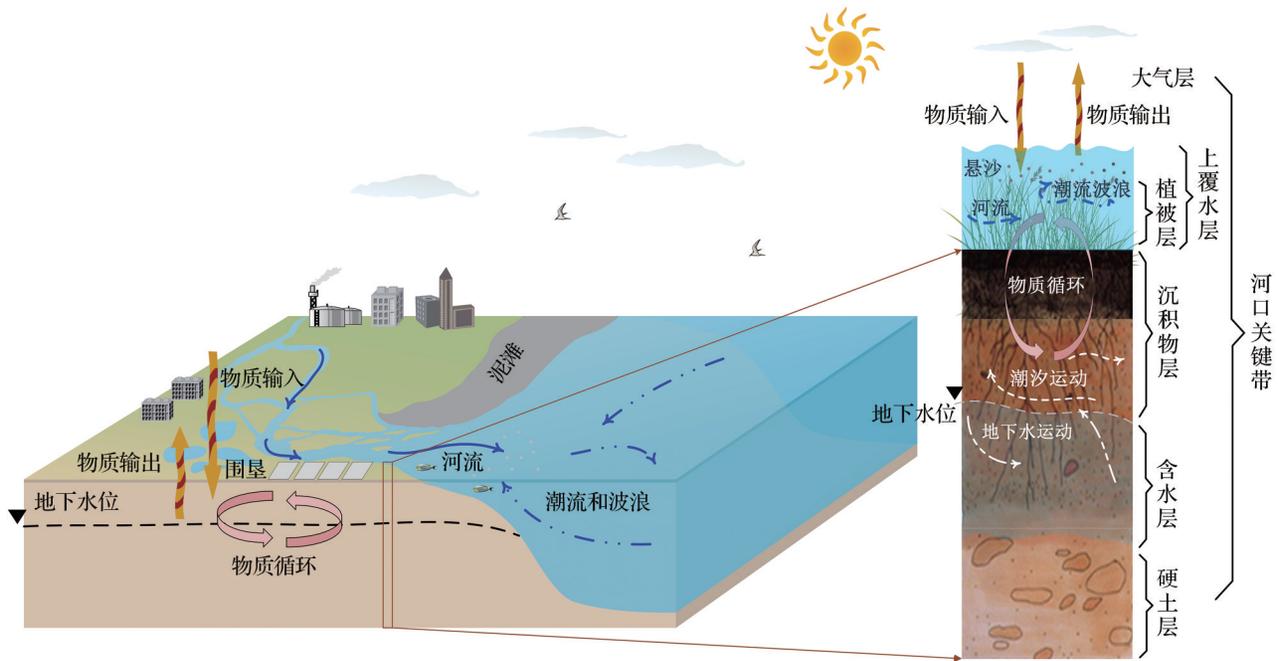


图1 沉积物在河口关键带物质循环中的作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of the role of sediments in the material cycle in the critical zone of the estuary

成拦门沙群。此外,杨云平等^[53]的研究反映,由于人类活动的扩张,河口沉积物粒径有增大的趋势。

重要的是人类活动还会引起沉积物和泥沙来源以及污染物来量的变化,这对内陆水体和海洋产生一系列生态环境的影响^[54]。张硕等^[55]的研究表明,泥沙来源等不仅可改变局部海底地形、沉积物空间分布格局及附近的水动力条件,还改变了沉积物组分和地球化学指标,甚至影响了底栖生物和微生物类群。中国主要河流的营养盐通量高于世界主要河流,Wu等^[56]研究了长江、黄河和九龙江等河流营养盐通量变化趋势,反映沉积物中生源要素的变化与过去几十年流域人类活动的增加关系密切。化肥施用与人口增长提升了输入河口的营养盐水平,使河流中溶解有机碳/溶解无机碳(DOC/DIC)及氮/磷(N/P)值增大,继而造成埋藏在沉积物中的叶绿素、有机碳和有机氮含量也存在一定程度的增加。同时,部分污染物经吸附、絮凝和生物累积等过程而转移到沉积物中。另外,沉积物中的重金属和有机污染物含量升高,几乎全部由于人为活动。徐亚岩等^[57]的分析表明,受人类活动影响较大的沉积物中,重金属含量及其活性形态含量在总量中所占比例均较高;早在2001年Mai等^[58]就结合测年技术对珠江口伶仃洋等水域柱样沉积物进行多环芳烃分析,研究表明燃烧热源集中的老工业区附近沉积物中以多环芳烃母体丰度为特征,石化厂和港口

附近的沉积物中则以石油及其衍生物的多环芳烃丰度较高。Shi等^[59]对河口沉积物的研究反映,不仅是持久性有机污染物,包含药物和纳米材料等在内的新兴污染物,在受人类活动影响较明显区域也会出现较高峰值。

人类活动造成的沉积物生态环境的改变也直接或间接导致了着生于沉积物中的底栖生物以及微生物类群的变化。黄洪辉等^[60]对黄河口和长江口的多年调查表明,由于沉积物环境的变化,底栖动物种类数均呈下降趋势。Sun等^[61]分析,微生物类群的变化与沉积物的物理化学条件以及污染水平呈现明显的相关性。沉积物的直接人工干预活动(如疏浚和疏浚物倾倒等)对生态系统的影响越来越受到人们的重视。Meng等^[62,63]对疏浚平均2.17 m深的鄱阳湖局部水域跟踪调查表明,疏浚的第1年大型无脊椎动物的物种丰富度和生物多样性指数(香农-辛普森指数)分别减少50%和99%。Li等^[64]对海南岛南部小东海礁的一次疏浚泥沙倾倒事故进行了珊瑚视频样带长期跟踪监测,发现6 m处的活珊瑚总覆盖率从54.3%下降到14.8%,6~9 m处的优势种发生了变化,事件发生后的11个月内小东海礁上的珊瑚群落仍没有恢复。显然,涉及沉积物环境的人类干扰活动,会通过影响沉积物中的生物类群使原有的生态系统发生结构改变和功能退化,进而损害生态系统服务功能和价值。

2.1.3 颗粒形貌与环境效应

沉积物颗粒与水体中污染物、微生物等的相互作用主要发生在颗粒表面,受颗粒表面特性的影响,如表面形貌和表面电荷分布等。正确认识沉积物颗粒的表面特性是研究沉积物环境特征的基础,需要从微观角度出发,进而分析其在理化生等过程中的重要作用。传统理论通常将沉积物颗粒概化为质点或具有特定形状的几何形体,一般采用粒径、形状系数和分形维数等描述颗粒的大小和几何特征^[65],但这些参数多为颗粒形状或者表面结构的综合表述,忽略了颗粒表面大量的微观信息,使得界面行为研究难以深入。

沉积物颗粒具有复杂的表面形貌。研究发现,沉积物颗粒表面起伏不平、细部特征丰富,存在凸起、凹地和鞍部等微结构以及各种尺度的孔隙。方红卫等^[66]基于对大量颗粒的显微观测和统计分析,构建了用数学方程表征沉积物颗粒形状和表面形貌的数学研究平台,再现了由表面梯度与孔隙共同决定的颗粒表面复杂形貌。沉积物颗粒还是多种成分的复合体,如石英、长石、铁/铝氧化物和有机质等^[65]。汤洪霄等^[67]论述了沉积物这些复杂的形貌和组分,导致颗粒表面电荷及活性位的非均匀分布和影响表面吸附概率和吸附分布的原因和机理。肖洋等^[68]研究了不同粒径清洗沙样的比表面积、孔体积变化及不同粒径下泥沙平衡吸附量,认为泥沙颗粒的表面特性是影响泥沙吸附污染物的重要因素之一。泥沙颗粒的表面性质还会引起沉积物颗粒与水体中污染物、微生物等相互作用的异质性,并对其迁移转化过程产生重要作用^[67]。陈明洪等^[69]利用扫描电子显微镜观测吸附磷在颗粒表面的分布,发现磷元素主要吸附在颗粒表面的鞍部、凸起和凹地部位,而在凹槽、凸脊和平坦部位分布较少。

沉积物颗粒的微生物载体在环境中的作用,近些年逐渐得到重视,特别关注颗粒与生物膜间的结构和效应关系。Fang等^[70]分析了微生物及代谢分泌物外聚合物在颗粒表面的吸附,评估和量化了生物因素(生物膜)对沉积物传输力学的影响,认为吸附的结果形成包含沉积物颗粒为主的微生物、胞外聚合物、腐殖质、孔隙水等的生物膜复杂结构。Chen等^[71]对生物膜的生长过程跟踪及作用分析,认为生物膜增加了沉积物颗粒间的粘连作用(增强床面的稳定性),影响沉积物搬运过程,改变其环境效应。沉积物表层的生物膜成分复杂,其存在使沉积物与污染物之间的相互作用关系发生显著变化,而

微生物在生物地球化学过程中也扮演着重要角色,这些都带来新的环境生态效应^[72]。总体上,需要立足于沉积物的微观特征,关注沉积物表面的物理、化学和生物过程。

2.1.4 沉积物源—汇特征与效应

带有环境污染信息的颗粒物随水流向地表低洼内陆水体乃至海洋输运、汇聚、充填和埋藏,宏观上属于地表过程中的污染物消纳^[35,73]。其中因吸附、包裹于沉积物的污染物随沉积而离开水体系统的自然净化过程。储存污染物的沉积物在外在环境条件作用下,可呈现出污染源的征,在特定的时空范围还会出现源与汇的转化^[74-76]。为定量确定沉积物对环境的贡献,以通量或负荷来确定沉积物输移、埋藏或其中污染物在沉积物—水界面和介质间的迁移,是近20年来沉积物环境效应重点研究的内容之一。

王厚杰等^[77]对黄河神仙沟—钓口叶瓣区断面研究发现,1986—1996年上段继续受到侵蚀,下段形成堆积以及沉积物的粒度差异,指示了泥沙输送或物质埋藏方向和位置。董爱国^[78]的研究表明,在百年尺度上泥质区自北黄海—南黄海—长江口—闽浙沿岸,每年埋藏的有机碳总量递增,其中在东海至少有50%的有机碳以汇的形式被埋藏于泥质区。我国黄海和东海陆架区面积虽仅约占全球陆架区面积的3%,但沉积物中的有机碳埋藏量却占到约9%,显然黄海和东海的碳埋藏量效应在全球海洋碳汇过程中具有举足轻重的地位^[79]。与固态或粒态沉积物埋藏相似,污染物在沉积物—水界面的迁移行为即使在重污染水域也有可能存在“汇”的特征。宋金明^[35]研究了近海沉积物—海水界面氮磷的迁移,发现我国海洋沉积物的释放通量存在负值,得到的 NH_4^+ 和 HPO_4^{2-} 的扩散通量分别为 $-34.08\sim 14.16\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $-1.20\sim 1.94\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。范成新等^[74,75]用沉积物柱芯恒温模拟实验证实,太湖中多处存在着氮磷的汇区。在太湖湖心区和西部沿岸区, $15\ ^\circ\text{C}$ 以下磷的交换通量分别为 -1.76 和 $-2.83\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,即使在污染严重的梅梁湾和五里湖亦多次发现释放通量为负值的现象,其中在梅梁湾北部湖区沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的释放通量低至 $-3.250\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。Ding等^[80]分别采用高精度渗析技术(HR-Peeper)和梯度扩散薄膜技术(the technique of Diffusive Gradients in Thin-films, DGT)进行分析,也证实了梅梁湾界面磷交换中沉积物具有汇的行为。即使对于同一水域,不同季节下沉积物中污染物既可能是源又可能是汇,一年中至

少可出现一次源—汇的转换^[74,75]。

从水体污染治理而言,人们更加关心沉积物内源污染的问题。20年来的研究成果揭示,我国内陆水体沉积物绝大多数是污染物质的源。以静态负荷研究结果,我国污染湖库的底泥氮磷内源一般占总负荷量的10%~50%^[74,75,81,82]。杨智闯^[81]研究了台湾新山水库沉积物释放,发现其内磷负荷竟超过外源磷输入(即占磷总负荷量的50%以上);王敬富等^[82]分别用野外调查分析法、模拟实验法和扩散模型法等3种估算方法,给出红枫湖沉积物内源磷的静态输入对水体磷污染的贡献为25.7%~46.0%。

内源动态负荷是沉积物再悬浮所能定量估算的主要环境效应之一,这在确定水体污染内外源治理方向和投入时尤为重要。多年来人们利用实验室装备模拟或建立模型进行计算等方式,估算太湖沉积物氮、磷动态负荷量,然而不同研究结果之间出现了重大差异。以磷为例,范成新等^[83]在室内模拟现场实测悬浮颗粒物(Suspended Particulate Matter, SPM)含量与现场风速条件,对太湖各风速时段SPM增量累计,全年沉积物再悬浮量约为25.8万t,磷的动态负荷量为425.8t,约占太湖外源入湖量的15.0%;秦伯强等^[84,85]根据沉积物中含水率、容重、有机质含量及孔隙率等垂向变化,推测太湖表层5~10cm(相当于1亿~2亿t)沉积物参与了再悬浮^[85],辅以临界切应力估算最大再悬浮量甚至可达2.75亿t^[86],进而根据室内水槽试验对大、小风浪条件下的释放通量估算,太湖全年总磷的动态释放量为2.0万t,为外源输入的2~6倍^[85]。逢勇等^[87]通过现场实测沉积物再悬浮与风速,以及底泥起悬临界风速和太湖多年风速资料频率的统计等,估算进入水体的净沉积物量有19.03万t,动态释放的总磷仅约275.5t,约占入湖量的15.6%^[88],认为秦伯强等的计算结果偏大。河海大学朱伟课题组^①依据2016年太湖资料分析和实验研究结果(未发表)显示,在与风浪变化有关的入湖颗粒物沉降—悬浮—再沉降的循环中,无论是总磷(Total Phosphorus, TP)还是总溶解性磷(Dissolved Total Phosphorus, DTP),出现的主要是磷的沉降和吸附,认为太湖底泥总体上是磷的汇。同一水域沉积物磷负荷动态估算出现约2个数量级差异,甚至在源/汇上出现反转性结论,必将影响水污染治理领域的正确决策,也说明湖泊沉积物动态效应的量化问题仍需开展更深入的研究。

2.2 污染物在沉积物—水界面环境行为与影响因素

沉积物—水界面虽可抽象为一个平面,但实际中却是具有一定厚度与复杂结构的区层,它通过吸附、包夹、容纳和着生等作用,累积着水体中大部分种类和数量污染物,并在诸如动力再悬浮、好氧/缺氧和生物作用等环境影响下,在沉积物—水界面附近发生着物质迁移转化等环境行为和过程^[89]。富营养化、蓝藻和赤潮等环境灾害一直是我国内陆水体和海洋环境问题的主要问题,以氮、磷和碳为代表的生源要素在沉积物—水界面间迁移转化的环境行为及其影响因素,多年来一直为人们所重视^[79,84,90]。近些年来,关于重金属和有机污染在沉积物—水界面的环境行为也逐步受到关注^[91,92]。

2.2.1 稳态环境生物地球化学

沉积物生物地球化学重点研究生物圈中各种化学物质的来源、存在数量和状态,生物活动的特性,污染物的生物地球化学循环及迁移转化规律。沉积物—水界面多处于相对稳定的状态。界面沉积物的酸碱度(pH)、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)/氧化还原电位(Eh)和温度等处于稳定状态,水动力处于或接近于静态环境,沉积物被吸附、包夹和与矿物结合的物质将会与上覆水和间隙水中相应的(游离态)物质^[40],在热力学和生化动力学系统支配下处于一种动态平衡。对这样稳定状态下的活性态物质在沉积物内部和沉积物—水界面分布的精细表征、迁移转化规律的揭示尤为重要。

时丹等^[93]应用垂直分辨率达3mm的薄膜扩散平衡技术(Diffusive Equilibration in Thin Films, DET),对太湖沉积物溶解性活性磷(Soluble Reactive Phosphorus, SRP)进行了分析,发现草型湖区间隙水剖面SRP呈峰形分布,且横向空间分异明显;藻型湖区间隙水SRP随沉积深度的增加呈升高趋势,扩散梯度随水温升高而增强。出露/淹没(干湿)和咸淡水交替是滨岸和潮滩湿地常见的水文现象,在根据河口潮滩湿地独特的水文特征能调节沉积物碳的输入与输出,因此设计增加盐度和淹水频率,来促进碳代谢相关的微生物活性和有机碳的矿化分解,进而达到调控潮滩沉积物碳库水平的目的^[94]。

河口潮滩湿地是全球重要碳库,而碳循环是该生态系统物质和能量循环的核心。潘峰等^[95]为了解潮滩沉积物中磷、铁元素的分布特征及迁移转化规

①胡思远,2016年太湖磷反弹及磷平衡研究,河海大学,2021。

律,借助薄膜扩散梯度技术(ZrO-Chelex DGT)^[96,97]原位高分辨率获取了红树林潮滩孔隙水剖面的溶解活性磷(Dissolved Reactive Phosphorus, DRP)和 Fe^{2+} 浓度,结果表明:表层孔隙水中,DRP与 Fe^{2+} 浓度呈现显著的正相关性,证实了磷、铁元素的耦合关系以及沉积物铁氧化物对磷吸附/解吸的控制作用。在大多数的河口潮滩湿地中,沉积物有机碳库与植被生产力和生物量密切相关。互花米草(*Spartina alterniflora*)一直是我国滩涂研究人员的主要研究对象之一。近 10 年来的研究发现,作为入侵物种的互花米草,因具有较高的地上和地下生物量,显著增加了河口潮滩碳汇强度和固碳能力^[98]。但有学者研究指出,互花米草入侵促进了潮滩沉积物 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放,从而影响气候变化^[99],表明互花米草入侵的生态环境效应复杂,厘清湿地生态系统对外来互花米草入侵的响应,对互花米草的生态利用和治理具有重要的指导意义^[100]。

2.2.2 动力再悬浮影响

内陆水体及近海表层沉积物极少处于静止状态,自然因素和人为因素都能导致水动力条件发生变化,进而引发水下沉积物的再悬浮作用。水体流动和风力扰动是驱动沉积物发生再悬浮的常见现象^[101,102],沉积物中污染物可能会伴随过程释放,并在各介质中重新分配^[92-103]。You等^[101]研究发现,风力扰动对太湖沉积物—水界面无机态的磷酸盐和氨氮的释放仅有短暂的时效性;Dong等^[104]研究表明,再悬浮—沉积过程每次发生都会改变悬浮态沉积物粒径,增强絮体的形成,使疏水性有机污染物持续释放。由于再悬浮影响的孔隙水体积有限,Cheng等^[92]认为水力扰动促进了沉积物相和再悬浮颗粒相中污染物的解吸,是水相中溶解态污染物浓度明显增加的主要原因。另一方面,过高的悬浮颗粒浓度也会吸附水体中的污染物,从而限制污染物浓度的进一步增加^[105]。郑莎莎等^[103]在研究水动力强度影响差异时发现,水流切应力对沉积物—水界面扰动较小时,pH和溶解氧是影响水体中重金属行为的主要因子;而当扰动强度足够大时,影响重金属吸附与解吸附行为的关键因子则是水中悬浮物浓度。显然再悬浮浓度(或量)就成为动力再悬浮影响研究的关键切入点。

现场调查、室内模拟和临界剪切力计算被认为是定量研究沉积物动力再悬浮的主要途径。秦伯强等^[84,85]依据沉积物粒径计算和间隙水中营养物分布规律认为,太湖沉积物悬浮所需的临界切应力为

0.03~0.04 N/m²,动力作用可使太湖表层的数厘米至 10 cm 底泥发生悬浮;罗激葱等^[86,106]根据波浪槽实验计算,太湖沉积物悬浮所需的临界切应力约为 0.019 N/m²,风速达到 20.0 m/s 时,能引起太湖上部 30 cm 深度约 2.75 亿 m³沉积物悬浮;郑莎莎等^[103]应用声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)和波浪记录仪结合现场悬浮物调查,认为太湖的临界切应力仅需 0.011 N/m²就可产生再悬浮,暗示会产生全湖更大的沉积物再悬浮量。但另一些野外现场调查和模拟研究结果却与上述结论出现了数量级的差异。胡春华等^[107]在太湖 5 个不同湖区垂向高精度调查了风速 1.0~8.7 m/s 悬浮物含量,计算风浪仅能使得太湖 0.040~0.383 cm 厚度的沉积物进入水体产生再悬浮;逢勇研究组分别进行野外沉降调查和矩形槽模拟实验,估算可进入太湖水体的沉积物再悬浮量仅分别为 19.03 万 t^[87]和 47.81 万 t^[108]。考虑到室内试验难以保证底泥的原状性,数值模拟的假设条件及参数取值会与实际值存在差异,李一平等^[109]在新近的研究中,将流速仪探头放在距湖底仅 5 cm 处,将监测频率提高到 10 Hz,获得的底泥起悬临界切应力在 0.015 N/m²左右。临界切应力属于沉积物动力再悬浮研究中最基础性问题,现场调查和室内模拟是人们能直接观察再悬浮现象的基本实验手段,再悬浮估算量上出现的巨大差异必将吸引更多的研究者继续进行深入研究。

水力扰动通过引起水环境中光强度、pH、DO 和 Eh 的变化,来影响污染物在水环境中的转化。沉积物—水界面受水力扰动发生再悬浮后,上覆水中悬浮颗粒大量增加,水体透明度减小,光照衰减加剧^[110],污染物还会随着水力扰动迁入沉积物的更深处,因而污染物的光降解过程会受到抑制^[111]。水动力的复氧作用会增强沉积物—水界面的硝化过程,由氮的低价向高价转化,抑制了氨氮的游离,增加了硝态氮和亚硝态氮的释放^[112]。水力扰动还会显著地增加上覆水和沉积物中污染物的生物可利用性,使得污染物和水生生物之间物质交换的频率加快,从而增加了污染物在植物、底栖生物和鱼体内的富集^[112,113]。水力造成沉积物—水界面的颗粒物再悬浮中,因有大量有机胶体和无机胶体的释放,使得污染物迁移转化过程极其复杂,目前的研究方法手段并不成熟,污染物多介质分配的机理研究尚未完善,还需关注参与污染物转化的生物影响,以及水动力和其他因素的耦合作用。

2.2.3 氧环境影响

沉积物的氧环境一直是沉积物中生源要素环境行为必须要考虑的影响因素,特别是对价态变化的生源要素(如氮等)生物地球化学作用更为重要。为揭示厌氧氨氧化在河口潮滩湿地脱氮过程中的作用,Hou等^[114]应用分子和同位素示踪技术系统弄清了我国滨海湿地厌氧氨氧化及其与功能微生物菌群动态变化的偶联关系。Deng等^[115]研究了湿地反硝化和硝酸盐异化还原成铵(Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium, DNRA)对电子受体产生的竞争,研究认为反硝化是长江口河口湿地硝酸盐还原过程的主导途径。但Cao等^[116]研究发现,九龙江河口湿地DNRA的贡献可占总硝酸盐还原的75.7%~85.9%,这可能是由于较高的有机碳含量有利于DNRA对反硝化过程的竞争,从而促进活性氮滞留于河口生态系统。不过Hou等^[114]研究证实,厌氧氨氧化具有实质性的脱氮作用,再考虑反硝化作用的贡献,每年我国滨海湿地生态系统约可去除外源无机氮输入量的20.7%。然而河口潮滩缺氧沉积物中,抗生素等毒性物质的赋存与累积会严重抑制反硝化过程的进行,使得其速率显著降低、氧化亚氮释放增加,表明毒性物质进入河口潮滩环境会加剧水体富营养化和大气温室效应^[90]。

对沉积物内部和表层氧含量的精细性表达可提高对可变价态元素转化机理的研究水平。Han等^[117]以平面光电极技术(Planar Optode, PO)精细表征并揭示了沉积物—水界面苦草根系泌氧和小分子有机酸的分泌过程;Ren等^[118]则考虑PO与DGT在信息获取上的互补性,将两技术联用同步获取了沉积物—水界面不同 O_2 含量影响下的 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的空间分布,见证了 NO_3^- -N和 O_2 同步变化,揭示了 PO_4^{3-} -P和 NO_3^- -N转化受 O_2 驱动控制的动力学机制。

沉积物发生再悬浮不仅可使系统中厌氧或缺氧状态转变为好氧状态,导致沉积物中污染物由还原态转化为氧化态或者发生氧化反应,污染物也将在悬浮泥沙相和上覆水相间重新分配。Dong等^[119]实地观测分析了黄河小浪底调水调沙过程,引起的沉积物再悬浮作用对下游多环芳烃生物有效性的影响,揭示了沉积物多次再悬浮过程中疏水性有机污染物(多环芳烃)的释放机理,认为再悬浮作用下通过沉积物孔隙水释放污染物占很小的比例,多环芳烃的释放主要来自悬浮泥沙相。俞慎等^[120]发现氧环境变化下的沉积物中往往发生有机质和金属

硫化物的氧化,促使重金属从沉积物上解吸、释放。范成新等^[83]在研究风浪引起的太湖悬浮态颗粒物磷的内源动态变化时发现,物化转化的活性磷几乎可忽略,主要来自沉积物再悬浮形成的氧化条件对有机磷的生物矿化。Peng等^[121]研究发现,由于沉积物再悬浮的氧化作用使得间隙水中 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 转化为铁锰(氢)氧化物后,又对溶解性活性磷产生了强吸附,降低了水体的磷负荷。因此,由于多种物质间的相互作用使沉积物发生的再悬浮对污染物迁移转化的影响变得更为复杂。

沉积物再悬浮对物质迁移转化的另一个重要影响是导致好氧微生物活性升高,影响其在悬浮颗粒物上的转化作用。夏星辉等^[122,123]研究发现,沉积物的再悬浮作用能促进有机氮的氨化和氨氮的硝化作用,并因悬浮颗粒附近存在低氧区,含沙河流上覆水体存在反硝化作用和厌氧氨氧化作用^[124,125],而且反硝化和厌氧氨氧化速率以及脱氮速率随悬浮泥沙含量增加而增加、随泥沙粒径增加而减小,与悬浮颗粒物上有机碳含量呈正相关^[126,127]。基于上述系统研究成果,继而首次提出悬浮颗粒以及沉积物的再悬浮作用,具有显著影响含氮化合物的转化和温室气体 N_2O 的排放等环境效应。

2.2.4 生物影响

沉积物—水界面物质行为受生物(如微生物、藻类和底栖生物等)的影响很大,甚至会主导性的,其界面的碳氮硫磷等生源要素行为与藻类水华等水环境灾害现象有直接联系^[128,129],因此其影响也更受到关注。生物体对沉积物—水界面的影响主要是通过通过对表层沉积物中物质的分解转化和吸收等内部活动等作用的^[38-40]。周易勇等^[130]和Song等^[131]对湖泊沉积物细菌及胞外酶的研究表明,微生物中的功能细菌可直接参与营养物的转化,这类细菌包括解磷细菌、硝化细菌、反硝化细菌、氨化细菌与介导其他营养循环的细菌等,它们在沉积物—水界面的营养转化过程中发挥主要作用。功能细菌的作用往往不是独立的,培养实验结果表明,藻类暴发时控制氮磷代谢的功能基因是相互促进的,说明共同减少氮磷含量对控制湖泊藻类暴发的重要性^[132]。

藻类等生物体对沉积物表层的覆盖对沉积物物理和物质行为产生的影响也不可忽视。吴庆龙等^[133]对太湖水底沉积物表层的微囊藻覆盖影响研究反映,藻体覆盖显著增加了沉积物中 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的含量,其影响可达到沉积物内部近16 cm深度。Wu等^[134]研究了藻席长时间附着沉积物上形

成的生物膜,使得沉积物由好氧向缺氧和厌氧转化,这种外来因素形成的膜会影响物质在沉积物—水界面的常态扩散。Liu等^[135]探讨了人工湿地系统中被PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons,菲和芘)污染的表层沉积物受生物膜作用影响机制,研究表明表层生物膜对PAHs的降解有促进作用,但其中的固氮菌可间接导致沉积物中总氮(Total Nitrogen, TN)的增加。

生物进入沉积物内部可能会产生物理性破坏作用。底栖生物扰动的物理改造作用(如掘穴、钻孔和觅食等)可破坏到10多cm深处的沉积物结构^[38],从而影响沉积物—水界面附近物质的迁移转化。Zhang等^[136]选择了2种机械扰动方式的模式底栖生物(水丝蚓和摇蚊幼虫),研究了它们对沉积物—水界面磷释放的影响,摇蚊幼虫在沉积物中形成了直径约2 mm、长度约6 cm的氧化管,使得下层间隙水与上覆水的物质在沉积物—水界面间的交换形成了类似“短路”效应。商景阁等^[137]运用稳定同位素示踪技术研究底栖生物对氮的影响表明,长足摇蚊幼虫(*Tanytus chinensis*)对太湖梅梁湾沉积物扰动的影 响,可使得溶解氧侵蚀深度达到10 mm,显著加强了水体硝酸盐向沉积物迁移的速率,提高沉积物总反硝化速率。

2.2.5 对藻类灾害的影响

除藻体的覆盖作用外,藻类水华灾害与沉积物—水界面营养盐(氮磷)的变化关系一直受到学者的关注。Smith^[138]通过对17个湖泊统计分析,总结TN:TP<29是造成藻类暴发的原因。然而相反观点认为是磷含量增加导致而非氮磷比下降造成的^[139]。基于这种争论,Xie等^[140]通过模拟实验发现,藻类暴发促进浮游植物“泵吸”沉积物中的磷,造成水体氮磷比降低。同时,氮磷的计量关系与蓝藻生物量存在显著季节变化,冬春季TN/TP(30:1~80:1)远大于夏季(<20:1),说明限制因子由磷转变为氮,两者均影响藻类水华发生,同样应该得到控制^[141]。

早期研究认为外源氮磷负荷持续输入是造成湖泊藻类水华暴发的关键因素,近20年来中国湖泊氮磷浓度降低表明外源控制效果取得成效^[142],而湖泊藻类水华并没有得到明显改善^[129],说明沉积物内源也能维持湖泊富营养化几十年^[143]。沉积物—水界面营养盐“多重循环”被认为是引起富营养化湖泊藻类水华的关键机制^[144,145]。首先,藻类和其他浮游生物依靠“泵吸作用”摄取沉积物氮磷等营养,而衰亡水华颗粒降解累积于沉积物,实现沉积物—藻

华颗粒氮磷循环^[146]。其次,藻类聚集氮磷经自身衰亡代谢供给新一轮藻类生长,形成藻—藻循环而维持藻类持续暴发^[147]。最后,在微生物和胞外酶等共同分解作用下,被藻类吸收利用成为临时氮磷储库。湖泊水体氮磷浓度升高引起藻类水华暴发,反之藻类水华暴发,微生物促进反硝化等作用,而可能造成水体氮、磷浓度的(短期)下降或偏低^[148]。伴随好氧—厌氧条件变化和微生物等作用,沉积物—水界面发生着复杂的磷生物地球化学过程,在藻类光合利用等生物作用下会形成含磷化合物,参与湖泊磷生物地球化学循环(图2)。由此可见,沉积物—水界面营养盐与藻类水华之间存在复杂的互馈关系使得湖泊富营养化问题长期存在且改善效果甚微。

沉积物—水界面生源要素(碳氮磷硫)的形态及生物有效性高低也可能造成不同程度的藻类水华风险。大量研究藻类水华发生时沉积物中无机氮磷(尤其是氨氮、铁磷)向上覆水释放是主要的过程,伴随着藻类降解和界面氧化还原条件的变化,亚铁易与硫形成硫化亚铁沉淀,形成富营养型湖泊常出现的黑臭水体^[149-151]。此外,近年新技术手段研究揭示溶解态有机物(碳氮磷)由于其复杂的形态,其在维持藻类暴发的作用易被忽略。其中核磁共振和酶水解方法揭示的磷脂、焦磷酸盐和聚磷酸盐等易被生物、化学降解而被有机体利用^[152-154]。藻类悬浮残体容易释放更多活性的溶解态氮(蛋白质和氨基酸),供给藻类及持续暴发^[155]。在藻类水华暴发时期,沉积物—水界面有机碳氮的释放也促进了磷的释放过程,三者的循环过程是耦合存在的^[156]。因此,对沉积物—水界面物质行为从简单的无机态向有机生物有效态认知的转变,极大地丰富了人们对藻类水华灾害发生中物质迁移转化过程的认识。

近10多年来,在太湖的一些藻类(或水草)聚集区频繁出现一种称之为湖泛(black bloom)的水体黑臭现象,其主要致黑物质是铁的金属硫化物(FeS)^[157]。为追踪藻源性湖泛致黑物硫的来源,卢信^[158]用不含硫的葡萄糖或淀粉放入太湖沉积物—水体系中模拟培养,结果水体都形成湖泛;蔡萍等^[159]模拟研究了太湖水体沉积物、蓝藻和沉积物+蓝藻3种处理中湖泛特征物(黑度、亚铁及硫形态)形成的难易程度,确认了沉积物是Fe²⁺和ΣS²⁻的主要供给源。Feng等^[160]研究了湖泛形成中的微生物过程,认为藻类等有机质在湖泛形成中主要通过微生物降解活动提供了缺氧环境。这些研究确定了沉积物在藻源性湖泛形成中不可或缺的作用。

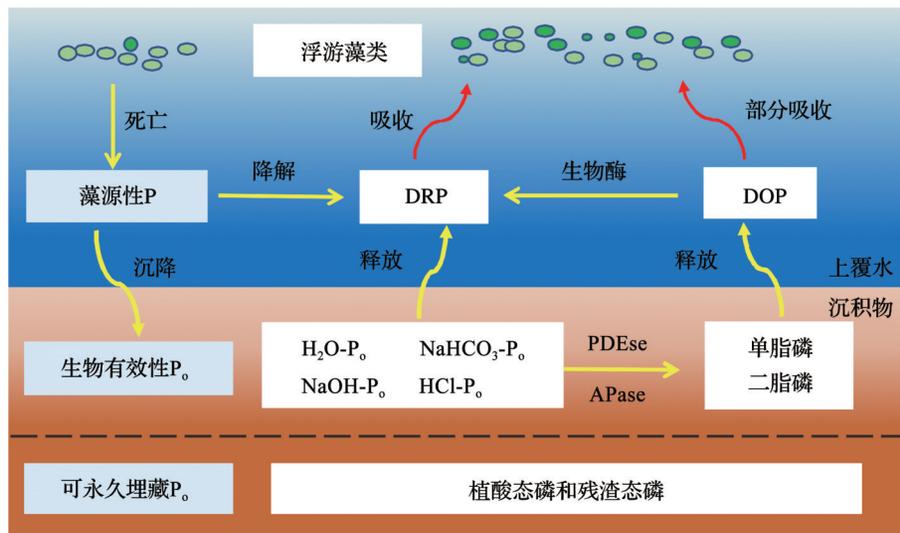


图 2 藻类水华与磷的生物地球化学过程

Fig.2 Algal blooms and biogeochemical processes of phosphorus

DRP: 溶解性活性磷; DOP: 溶解性有机磷

DRP: Dissolved Reactive Phosphorus; DOP: Dissolved Organic Phosphorus

湖泊沉积物的生物地球化学与藻类灾害的研究方面虽取得了重要进展,由于沉积物中物质结构(如有机氮磷硫分子)的复杂性和研究方法的局限性等原因,多手段联用技术可更为深入细致地认识沉积物有机氮磷硫结构及代谢机制,将是未来湖泊沉积物生物有效性及藻类水华发生机制等灾害研究的重要方向。另外,还需深入认识和发展沉积物—水界面氮磷硫快速补给和周转等方面的生物地球化学过程研究,进一步丰富和完善湖泊氮磷硫循环相关理论及技术方法等。

2.3 沉积物生态风险与质量基准

重金属和有机污染物是形成沉积物生态风险最主要的两大类污染物,沉积物质量基准也主要以这两类污染物含量和生物毒性效应作为主要依据。重金属和许多有机毒性物质都具有高毒性、难降解、易富集和食物链放大等生态环境效应,一直是广受关注的持久性或高风险污染物^[161,162],近些年新兴污染的出现更加大了沉积物环境风险研究的紧迫性^[163]。重金属和有机污染物不仅对底栖生物具有直接的毒害效应,而且还可能因环境条件改变,通过沉积物释放间接对上覆水产生二次污染。生物毒性效应是环境质量基准建立的主要依据,但同一毒性污染物及其不同含量,在不同水域(流域)往往呈现程度不同的生态风险,给沉积物质量基准的建立提出了挑战。我国水体沉积物质量基准的研究还处于起步阶段,尚未建立起我国的沉积物质量标准。但近来在海洋沉积物质量基准和标准研究

方面已取得一些重要研究进展^[164],为内陆水体沉积物质量基准的建立打下了坚实基础。

2.3.1 重金属污染特征与生态风险

近 20 多年来,我国科研人员围绕沉积物重金属释放机制和水系沉积物重金属污染风险评价等开展了深入研究,取得了重要理论和应用研究成果。在沉积物重金属释放机理研究方面,万国江等^[161]通过大量实验,系统论证了湖泊有机质生物氧化和硫酸盐还原作用导致的界面亚扩散层屏蔽效应,揭示重金属受沉积物—水地质界面和氧化还原化学界面的双重控制,阐明了深水湖泊铁、锰等重金属自沉积物向上覆水体扩散而形成季节性二次污染的过程与机制,发现沉积物铁—锰二次污染具有显著差异,沉积物锰的扩散通量可达其沉降通量的 80% 以上,远高于沉积物铁^[161]。沉积物—水界面铁锰地球化学循环不仅导致沉积物铁锰的溶出和上覆水体重金属超标,还间接控制着沉积物磷向上覆水体的释放^[161,165]。

有关水系沉积物重金属污染的研究关注的重金属主要包括 Cu、Pb、Zn、Fe、Mn、As、Ni、Cr、Cd 和 Hg 等。大量研究揭示,我国湖泊和水库沉积物中 Cd 污染最为严重,很多都达到了中度—重度污染水平^[166-168],其次是 Hg、As、Mn 和 Pb。由于水系沉积物中含有易迁移和生物可利用态的重金属,以重金属形态表征重金属生态风险成为研究趋势。赵艳民等^[169]通过对我国湖库沉积物重金属形态的分析,发现大多数重金属的活性态占比较小,生态风险

低,但一些研究发现弱酸提取态Cd所占比例可达30%以上,表明沉积物中的Cd具有很强的潜在迁移风险^[168,169]。近10年来关于沉积物汞的危害风险研究取得了令人瞩目的成果,研究发现沉积物汞的地球化学行为明显受水体富营养化过程的影响。在浅水湖泊,风浪的扰动作用对沉积物中重金属行为影响较大。郑莎莎^[110]对太湖的研究发现,由于pH和溶解氧的变化,水力扰动使得沉积物中碳酸盐结合态重金属易于溶解,沉积物—水界面附近的结合态金属硫化物会因氧化而释放重金属。在深水富营养化湖库,沉积物和下层水体形成的缺氧、富含有机质等环境条件显著促进了沉积物汞的甲基化,增强了沉积物汞的迁移性,放大了汞的生态危害风险^[170,171]。Wang等^[172]用相关性和冗余度分析了渭河流域沉积物不同层中大型无脊椎动物群落结构与其生境(重金属污染程度)的关系,发现在0~10 cm沉积物层,腹足类和家族生物指数可作为生物指标;而在10~20 cm层,适宜的生物指标为寡毛类和Margalef丰富度指数,并提示镉影响的重要性。随着重金属有效性研究要求的提高,近些年在消化吸收基础上,针对特定性能的要求,也开发了一些新技术,Ren等^[173]建立了一种同时测定 CH_3Hg^+ 和 Hg^{2+} 的薄膜扩散梯度法(TCH-DGT),为研究 CH_3Hg^+ 和 Hg^{2+} 在同深度沉积物的活化机制引入了新手段。

沉积物重金属主要来源于工业排放、农业活动、大气沉降和岩石风化等,其中,工业排放和农业活动逐渐成为最主要的来源。受日益增强的人类活动影响,近30年来我国水系沉积物重金属污染状况发生了显著改变^[174],并呈现出明显的区域性特征,总体上表现为东部高于中部强于西部,受人类活动影响强烈的地区其沉积物重金属污染大于人口稀少的地区。中国七大水系中,珠江水系沉积物重金属浓度最高,海河水系和黄河水系次之,而长江水系、辽河水系、松花江水系和淮河水系沉积物中重金属浓度较低^[175]。已有研究表明,太湖流域人为活动对沉积物重金属污染的贡献已超过75%^[176]。

2.3.2 有机物污染特征与生态风险

除重金属之外,沉积物中有机污染物的生态风险同样不可忽视。Yi等^[177]对珠江广州段沉积物的毒性鉴别评价显示,虽然沉积物中50%的重金属对底栖动物表现显著毒性效应,但全部沉积物样品中的有机物对毒性均有贡献,且种类更加繁多,显现出典型复合污染特征。

20世纪90年代到21世纪初,我国关于沉积物

有机物的研究主要集中在发展痕量分析方法,以及利用这些方法监测不同区域沉积物中典型传统持久性有毒有机污染物的浓度水平和分布特征。最近对中国5个地理区域52个湖泊沉积物中的半挥发性有机物(SVOCs)的调查^[178]显示,其中3类SVOCs(\sum PAHs、 \sum OCPs和 \sum PCBs)的污染水平从高到低依次为:东部平原、云贵高原、东北地区、青藏高原、蒙新高原,不同区域湖泊沉积物在污染水平和异构体组成上具有明显的差异特征。但总体而言主要研究区域是在东部相对发达地区,多数结果显示PAHs和PCBs呈中等污染,且OCPs一般以HCHs和DDTs为主。2000年下半年开始,越来越多新兴污染物逐步进入我国沉积物污染调查清单^[179],例如溴代阻燃剂[多溴联苯醚(PBDEs)和四溴双酚A(TBBPA)等]、磷系阻燃剂(OPEs)、增塑剂邻苯二甲酸酯(PAEs)、全氟化合物(PFCs)、氯化石蜡(CPs)、多环麝香、抗生素、药物、个人护理品以及现用农药等。由于化学品的大量生产使用,新兴污染物在我国部分区域(特别是东部地区)的沉积物中富集度较高,已造成严重污染。沉积柱样品分析也有效体现了传统污染物和新兴污染物的使用和形成的时代变迁史^[179,180]。Zhou等^[163]最近对南海北部沉积物中具二恶英样毒性的多卤代呋啉类化合物(PHCs)调查分析,表明南海北部沉积物中的PHCs来源于陆源和天然海洋,在整个19世纪90年代和20世纪10年代,PHCs的同系物分布和含量基本保持稳定。

沉积物中往往多有机毒物共存,含量为微量甚至痕量级,因此对沉积物中有机毒物的精确采集、测试和评估等要求都很高。为有效地确定沉积物毒性,Li等^[181]分析了毒性鉴定评价(Toxicity Identification Evaluation, TIE)和效应导向分析(Effect-Directed Analysis, EDA)方法的优缺点,提出在两种方法综合的基础上加入生物可利用性,从而为有效确定沉积物毒性因果关系提供一种环境相关和毒物特异性的综合评估方法。与此同时,沉积物中有机污染物所引起的生态风险也越来越受到关注,在获取污染物浓度基础上,大量研究采用风险商的方法,评价目标污染物可能引起的生态风险。对沉积物中有机毒物的精准取样技术的进步,也推进着沉积物有机毒性和风险研究的发展。Li等^[182]利用基质固相微萃取(matrix SPME)技术,得到了更好的生物利用度与毒性的相关性,提高了对沉积物毒性的预测。Bao等^[183]设计了一种模拟底栖生物对颗粒吞食情景下的LAECAM采样器,成

功对疏水性有机化合物 (Hydrophobic Organic Contaminants, HOCs) 在沉积物—水界面进行了原位被动采样。鉴于沉积物中有机污染物的生物有效性和毒性直接受沉积物的理化性质(如有机碳种类和含量和粒径等)影响,在吸附解吸和生物富集过程及机制研究基础上,新近也发展了多种测量沉积物中有机污染物的生物有效性的方法,并将其用于沉积物生态风险评价^[184]。

尽管有机污染物的分析清单不断扩大,但相对复合污染沉积物中可能存在的化合物种类仍然只是冰山一角。近几年,以生物效应为导向的沉积物中有机污染物筛查研究方兴未艾。Li等^[181]以摇蚊幼虫为模式生物,通过大体积吸附剂提取和被动加标,在效应导向分析中充分考虑沉积物中有机污染物的生物有效性,并通过有害结局路径合理选择效应终点,结合离体细胞测试与活体生物测试,筛查了城市水体沉积物中关键致毒物,揭示了现用农药和多环麝香等污染物的毒性贡献。该方法结合生物测试、化学分析和统计建模,可同时筛查目标及非目标化合物,为精准识别沉积物中关键致毒有机物提供了有效技术手段。

2.3.3 中国沉积物质量基准

沉积物质量基准 (Sediment Quality Criteria, SQC) 是指特定的化学物质在沉积物中不对底栖生物或其他有关水体功能产生危害的实际允许值。SQC 是底栖生物免受特定化学物质致害的保护性临界值,是底栖生物剂量—效应关系的反映。SQC 本身不具管理职能,但在 SQC 基础上建立的沉积物

质量标准,则具法律辩护力,可客观进行沉积物和水环境质量评价,并为污染控制和沉积物疏浚等治理及立法措施提供依据^[165]。发达国家对沉积物质量基准的研究始于20世纪80年代,美国、加拿大、澳大利亚与新西兰、荷兰、英国等相继开展该领域的研究工作,并取得了一定的进展。目前,关于沉积物质量基准的研究,有基于化学物和生物学耦合数据的经验(相关)法,如生物毒性试验法、筛分水平浓度法、表观效应阈值法和沉积物质量三元法等,以及基于平衡分配技术的机理法。

我国沉积物质量基准的研究起于20世纪90年代,张曙光等^[185]初步讨论了长江和黄河的重金属沉积物质量标准;王立新等^[186]利用生物效应数据库法建立渤海锦州湾重金属的沉积物质量基准;祝凌燕等^[187]采用相平衡分配法,在天津水库提出了4种金属、2种有机污染物的沉积物质量基准值;张婷等^[188]采用生物效应数据库法建立了淡水沉积物重金属质量基准。马德毅等^[164]以表观效应阈值法、平衡分配法和生物效应数据库法为基础,结合慢性和急性生物毒性试验、沉积物加标毒性试验和沉积物溶出试验等技术途径,采用综合生态效应数据库法,求算并确定了我国的海洋沉积物质量基准值^[189](表1)。所定的基准值下限为:阈值效应浓度 $TEL = \sqrt{C_{N50} \cdot C_{y15}}$, 基准值上限为:可能效应浓度 $PEL = \sqrt{C_{N85} \cdot C_{y50}}$ 。

我国沉积物标准的研究主要来自海洋^[165,189]。在海洋沉积物质量基准研究基础上,结合我国的经济水平发展和海洋沉积物污染现状,并参考了国内

表1 海洋沉积物质量基准的求算结果^[189]

Table 1 Calculation results of marine sediment quality criteria^[189]

污染物	无效数据列		有效数据列		TEL	PEL
	C_{N50}	C_{N85}	C_{y15}	C_{y50}		
As/(mg/kg)	14.20	27.1	29.20	156.60	20.40	65.14
Cd/(mg/kg)	2.02	2.60	5.44	28.14	3.31	8.55
Cr/(mg/kg)	40.60	50.50	56.40	594.90	47.80	128.60
Cu/(mg/kg)	26.00	32.30	49.50	225.10	35.90	85.30
Hg/(mg/kg)	0.88	1.45	3.19	28.20	1.67	6.39
Pb/(mg/kg)	46.90	60.80	56.10	265.40	51.30	127.03
Zn/(mg/kg)	147.00	21.20	239.70	723.40	187.70	391.60
硫化物/(mg/kg)	169.80	316.00	496.00	1 090.00	290.20	586.90
有机质/%	1.44	2.35	2.92	3.35	2.05	2.81
油类/(mg/kg)	250.41	660.90	780.60	1 445.80	442.10	977.50
DDT/(mg/kg)	0.021	0.037	0.034	0.058	0.028	0.047
六六六/(mg/kg)	0.02	0.028	0.033	0.17	0.026	0.069

注: C_{N50} 、 C_{N85} : 无效数据列中值及高值; C_{y15} 、 C_{y50} : 效应数据列低值及中值; $TEL = \sqrt{C_{N50} \cdot C_{y15}}$; $PEL = \sqrt{C_{N85} \cdot C_{y50}}$

外相应的基准值与标准值,考虑与我国海水水质标准的呼应,制订了我国的《海洋沉积物质量》国家标准(GB 18668-2002)^[190]。该标准的颁布,一定程度上也标志着我国在沉积物质量研究领域的能力,已达到国际同类研究水平。

3 中国沉积物污染控制与修复研究进展

3.1 污染沉积物原位修复

污染沉积物的原位控制与修复是指不移动受污染沉积物,直接对沉积物进行就地处理,基本不改变沉积物的原始赋存状态,通过物理、化学和生物等技术手段,使污染物受到路径隔离、结构降解和活性钝化等治理效果。经过近20年的研究,我国在氮磷阻隔、有机物去除、重金属钝化和脱氮固磷等沉积物污染控制与修复方面,取得了一些重要进展。

3.1.1 物理修复

沉积物覆盖是在污染沉积物上投放1层或多层覆盖物,使其与水体产生物理性隔离,以阻止或控制沉积物中污染物向水体中扩散或迁移。针对氮磷等内源污染控制是我国沉积物覆盖研究的主要目的之一,范成新等^[191]对太湖梅梁湾污染沉积物采用洁净的土壤(黄土)、细沙和湖泥进行了覆盖实验,结果反映黄土覆盖具有最好的控制效果,其对氮释放的控制率达到57.6%~83.4%,将磷的释放控制在-1.4 mg/(m²·d)以下,推荐黄土最小覆盖厚度为2.0 cm。赵斌等^[192]在滇池1.5 m×1.5 m围隔内投加方解石粉粒,试验同样也表明,2 cm厚度的覆盖能够有效且可长期对沉积物磷释放形成抑制作用;陈春梅^[193]通过对沉积物有机磷释放的原位覆盖控制实验,反映将红土与河沙材料搭配一起使用有更好效果。采用廉价易得材料用于水环境灾害的预控是实用性较高的一类研究。商景阁等^[194]将黄土和细沙用于太湖湖泛黑臭易发区控制,结果表明0.5 cm黄土和1.0 cm细沙对沉积物的覆盖,即可将沉积物间隙水中的主要致黑物(Fe²⁺)浓度控制到仅为对照组的1/3和主要致臭物(DMS和DMTS)的50%,并可阻止湖泛发生。

黏土(或改性黏土)是我国沉积物覆盖修复研究中最常选用的材料之一。Lin等^[195]将合成的锆改性膨润土(ZrMBs)作为磷污染沉积物覆盖材料,发现上覆水中SRP含量显著降低,这是因为ZrMB覆盖后使表层沉积物中的磷(DGT-P)形成了静止和活

动分层现象,使磷形态由易释放态向相对稳定态或极稳定态转变。最近Kong等^[196]分析镧改性膨润土(Lanthanum Modified Bentonite, LMB)作为覆盖材料为何有极好的控磷效果,是因为LMB对有机磷(葡萄糖-6-磷酸酯)具有良好的吸附性外,还对溶磷菌有很好的抑制作用。覆盖技术对重金属和有机毒性物质的控制近些年已开展研究。喻阳华等^[197]针对深水湖沉积物重金属污染问题,研发了以脱碱赤泥为主料,黏土、粉煤灰和CaCO₃为辅料的覆盖材料,推荐赤泥38.9%、黏土14.4%、粉煤灰38.9%和CaCO₃7.8%的配料比例,对沉积物重金属污染有很好的控制效果。

3.1.2 化学修复

污染沉积物的异位化学修复多是通过淋洗、增溶、乳化等,对环境的破坏性较强、费用较高,而以钝化或氧化为主的原位化学修复,则因其低成本和易操作等优势,近年来受到广泛青睐^[198]。对沉积物中污染重金属的钝化和固定是原位化学修复的主要应用方式。Liu等^[199]采用赤泥、沸石、海泡石和生物炭负载纳米零价铁(nZVI),将沉积物中不稳定态Cd部分转化为稳定态,酸溶态Cd减少11%~47%,实现了对沉积物中Cd的原位固化稳定化。Ma等^[200]在山东某河道现场对受重金属污染的沉积物采用就地一体化的筛分淋洗技术处理,然后将粗颗粒回填河道,不但实现了重金属的原位削减,还对深层潜在的重金属污染沉积物进行了原位覆盖,同时开展了14万t规模的工程化应用。

Zhao等^[201]合成了一种含有腐植酸(Humic Acid, HA)和La(OH)₃的纳米棒复合物(Zeolite Loaded with Humic acid and La(OH)₃ Nanorod Composite, ZHLA)载体的沸石,利用La³⁺和HA对OP和PP的保护作用,通过投加改性沸石实现对沉积物中磷的固定化作用,形成的改性沸石成本仅约为市场同类产品价格的1/3。而氧化则是通过投加化学氧化剂,将沉积物中的污染物进行就地氧化,破坏污染物的分子结构而使其失去毒性。Yin等^[202,203]研究发现,天然富钙的海泡石和凹凸棒石可有效钝化沉积物中的活性磷,并降低包括Cd和Pb在内的大部分金属在沉积物中的移动性。对活性磷钝化材料,与国外同类产品相比,不仅固磷能力和抗风浪性更强,成本也可节约50%以上。Hung等^[204]应用沉淀法合成了Fe₃O₄-炭黑(Fe₃O₄-Carbon Black, FCB)纳米复合材料,利用其活化过硫酸盐(Persulfate, PS)来氧化降解受污染海洋沉积物中的多环芳烃。

虽然原位化学修复普遍具有操作方便,处理效率高的特点,但在水底复杂环境下是否仍能长效,以及是否会伴生潜在二次污染以及生态风险等,涉及到实际应用仍有不少障碍需要克服。

3.1.3 生物修复

污染沉积物的生物控制与修复,多是利用植物修复及微生物对污染物的氧化代谢、吸收和富集作用,进而达到对沉积物污染净化的目的。植物修复是最常见的沉积物生物修复技术,借助大型水生植物(主要是沉水和挺水植物)在沉积物上的着生,通过生物体的根茎叶对污染物的吸收等实现对沉积物中氮磷的利用及重金属的富集。包先明等^[205]研究了6种沉水植物在污染沉积物基质上的生长及间隙水中氮含量变化情况,结果发现沉水植物生物量增加时期,底泥氮释放速率与沉水植物生物量呈负相关,反映了沉积物内源受植物生长的抑制。实际上以植物方式修复沉积物的应用中,往往与物理修复(如覆盖)和疏浚等手段相结合^[191]。陈开宁等^[206]在五里湖南岸10 hm²的底质退化和污染区,覆盖了约30 cm厚度的当地洁淨土壤,并在该覆盖区成功建立了15科22属32种挺水、浮叶和沉水植物,覆盖度达到40%~55%,既控制了沉积物内源负荷,又修复了水生植被。

微生物修复则多是通过向污染沉积物投放特定微生物菌剂,以促进污染物的降解或形态转变。海岸溢油事故是造成滨海沉积物有机污染的主要来源之一,作为常用的微生物原位修复技术,功能菌的选择、投放及其长效性和高效性往往是该技术的核心经济指标。Zhao等^[207]将溢油功能降解菌负载在粉状/粒状沸石表面,用聚谷氨酸进行团聚包裹以防止投放过程被水冲刷菌株逸散,制成复合功能菌剂。Wang等^[208]应用该菌剂对受溢油污染的渤海海域近百公顷沉积物进行了原位修复,70天后,沉积物中正构烷烃(C12~C27)和多环芳烃等有机污染物的去除率均超过50%。且2年后跟踪调查发现,沉积物中的重金属也明显减少。

总体而言,虽然生物修复具有经济、环保的优势,但由于植物生长及微生物繁育缓慢等原因,生物控制与修复目前仍存在周期长、见效慢的劣势。

3.2 污染沉积物疏浚及异位处置利用

与土壤不同,污染沉积物异位治理或处理后不再放回原处,主要是将沉积物从发生污染的位置疏挖出来,在岸上或经运输后对其进行异地处置以及利用,这一过程采用环保和资源化的方式尤

为重要。采用环保方式将污染性沉积物(又称底泥)清除、控制其污染物释放,已成为我国湖泊、河流和河口等水域改善水环境的最主要措施之一^[209]。经过20年来国家多个重大专项的实施和数十个地方重点项目的研发投入^[210],我国在环保疏浚范围和深度的确定、疏浚挖深的自动监控,以及疏浚效果的评估及界面过程机制等基础性和应用性研究方面,取得了重要进展^[211],形成了相关技术指南^[212]。与市政污泥处理处置同步发展,我国疏浚沉积物的脱水干化和无害化资源化处理处置也取得了多方面的突破性进展^[213,214]。湖库沉积物环保疏浚及异位处理处置是迄今我国在沉积物环境治理中应用最广泛的2项内容,建立起的环保疏浚理论与决策体系和方法,以及疏浚淤泥的异位处理处置工艺与技术,已在太湖、滇池和巢湖等湖库得到了工程化应用。

3.2.1 沉积物环保疏浚

疏浚范围和深度的确定是环保疏浚研究中两个最主要的问题。针对国内外无标准可依,范成新等^[215]提出了一种简称“网格层次法”的疏浚范围确定方法。它以沉积物—水界面氮磷静态释放为主,结合重金属生态危害风险(Risk Index, RI)评估,应用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)和决策支持技术,划分出沉积物疏浚范围。姜霞等^[216]运用多介质化学热力学原理,将氮、磷对固态底质的吸附/解吸行为与上覆水中相应含量以及与营养程度阈值相关联,确定出湖泊沉积物总氮的阈值效应含量^[217]。疏浚深度是环保疏浚的关键性参数之一,确定合适与否直接关系到环保疏浚效果的好坏及工程投入的高低。国际上关于疏浚深度的研究成果基本来自我国,基于不同的原理和依据,近20年来我国先后推出了近10种环保疏浚深度确定方法(图3)^[216,218,211]。从早期主要针对富营养化、发展到现在已扩展到涵盖水体黑臭(湖泛)、重金属和持久性有机物积累等污染现象和生态风险的控制,为环保疏浚决策的研究和我国环保疏浚工程的实施,起到了极大的推动和引领性作用。虽然研发的这些方法部分还存在一定的主观性,或技术性不高,但因其简便或与污染直接产生联系的特点,将会使其在继续完善中发挥作用。

环保疏浚与一般疏浚相比,其最大的不同是对一个不规则的清淤断面以可控方式、对所设计的沉积物疏浚厚度进行精准性疏挖^[219]。在风浪影响显著的开阔水域,绞刀下放深度的波动和船体的横移都将会造成欠挖、超挖、漏挖和细颗粒扩散等问题

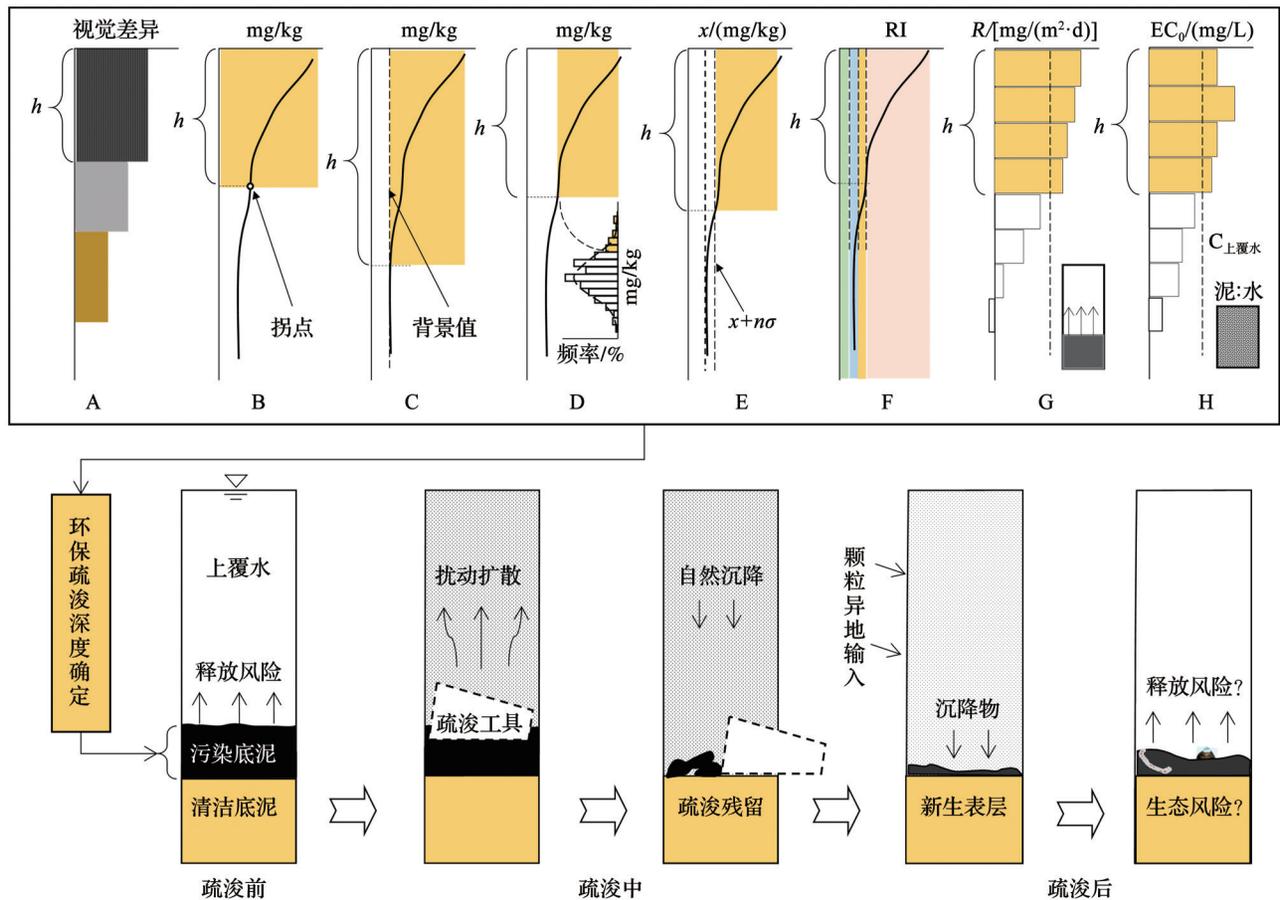


图3 我国研发的环保疏浚深度确定方法及疏浚后新生表层的形成过程意图

Fig.3 Determination methods of environmental dredging depth developed in China and formation process of newborn surface after dredging

x : 含量; RI: 风险指数; R : 释放速率; EC_0 : Critical Equilibrium Concentration; $\bar{x}+n\sigma$: 含量的平均值加 n 个标准偏差 σ , 其中 n 为自然数; h : 污染深度;
 A: 视觉分层法; B: 拐点法; C: 背景值法; D: 频率控制法; E: 标准偏差倍数法; F: 生态风险指数法; G: 分层释放法; H: 吸附解析法
 x : Content; RI: Risk Index; R : Release rate; EC_0 : Critical Equilibrium Concentration; $\bar{x}+n\sigma$: The average value of the content plus n standard deviations σ , n : natural number, σ : Standard deviations; h : Pollution depth; A: Visual stratification; B: Inflection point; C: Background value; D: Frequency control; E: Standard deviation multiple; F: Ecological risk index; G: Layered release; H: Adsorption-desorption

(图3)。结合我国河湖底泥物性和近岸底部复杂性,采用系统集成与自主研发相结合,技术人员研制出“绞吸挖泥船挖深自动监控装置”^[220],设计出各种适用性强的绞吸挖泥船环保绞刀^[219]。其中绞刀控制传感装置,可将平面位置精确定位于绞刀头挖深点,并可对绞刀头姿态进行可视化监控,达到对沉积物的高精度(± 10 cm)疏挖效果,使我国在环保疏挖技术上产生了质的变化。

疏浚是一类大型环保工程项目,由于水底隐蔽施工的不可见性,多年来对疏浚后效果的变化原因缺乏基本认识,存有很大的疏浚决策风险。早在2001年濮培民等^[221]根据系统论和控制论,分析了从底泥到水体再到藻体之间磷的数量级关系,以及各部件间的间接联系,提出疏浚底泥不是控制湖泊

富营养化的充要条件,从理论上给人们提出了疏浚的风险问题。为揭示疏浚效果的变化机制,范成新等^[222]模拟研究后总结,疏浚后沉积物新表层上的物质组成,主要来自几十乃至上千年的沉积物、疏浚中残留污泥或回淤物,以及随时间逐步累积的悬浮颗粒沉降物。对疏浚效果的研究,实际上就是对底泥新生界面上,3类来源混杂物中污染物迁移转化过程的研究,继而提出疏浚后新生表层(newborn surface)的概念(图3),为疏浚效果的研究奠定了理论基础^[223]。短效(年内)模拟和长效(年际)现场跟踪,已成为我国学者在环保疏浚效果预测和评估中采用的主要方法。Zhong等^[224]和Liu等^[225]分别模拟疏浚后年内逐月控制条件下,以及实际疏浚施工后连续15年的原位跟踪观测,研究了新生表层沉积物

和间隙水环境特征、水底边界层物质形态和迁移转化行为,揭示了疏浚效果变化发生的原因。

3.2.2 污染底泥无害化处理

疏浚沉积物(底泥)大多数是以泥浆形态产生,含固率仅为8%~10%,自然干化的淤泥利用性能差,难以处置和利用。面对急速增加的河湖疏浚底泥,近20年来,我国在疏浚泥浆的脱水和污染物的稳定化(处理)、堆场存储(处置)和固化土或土壤化利用(资源化)方面有了长足发展。已使得把疏浚泥浆经坑洼堆存后,将地基处理为土地,或用作园林绿化土壤基质、非农用种植层等,作为我国疏浚泥浆的主要处置和利用方式^[226],其中在太湖环保疏浚中形成的系列技术和方法得到了较广泛的应用和推广。

使用堆场经自然沉降—固结—蒸发疏浚泥浆进行脱水是早期常用方法。2002年五里湖环保疏浚的淤泥吹填到长广溪0.533 km²堆场,经自然沉降—排水—固结—蒸发,泥浆变为含水率仅为50%左右的淤泥^[214,226]。为促进固结过程,研发了对淤泥实施真空预压,工程脱水后再作为场地利用^[227]。2010年之前场地化工程脱水虽使用广泛,但无法解决堆场土地的弊端,使得周转型堆场和机械脱水等方法应运而生。在太湖的孔湾和白鹿所设置的周转型堆场,不仅可使吹入的泥浆转化为淤泥且处理成土材料转出,还将堆场的容量重复多次利用^[228]。机械脱水技术发展迅速,最新进展是先将疏浚泥浆过筛去掉大颗粒的物质,然后进行絮凝—调理,最后通过板框压滤机脱水为含水率为30%~40%的泥饼^[229]。也有使用离心机和带式压滤机进行脱水的实例,但机械脱水普遍存在功效与疏浚施工匹配困难的问题。吴思麟等^[230]采用真空抽滤减量和固化技术结合,基本解决了这一问题。针对污染物的处理措施中稳定化的研究和应用比较多,由于淤泥体量庞大,所含污染物的浓度相对较低,因此,在工程实施上,将其分离、提取的成本过高,大多数还是考虑改变污染物的形态,使其难以溶出,并采用稳定化、钝化和内封闭的技术,控制其二次污染的发生^[231]。

3.2.3 疏浚底泥资源化利用

对疏浚淤泥固化处理后转化为土材料是资源化利用具有重要应用意义的创新技术^[213],并在我国实际填土工程中已得到普遍应用。太湖一期疏浚中约2 000万 m³的淤泥通过固化后作为土材料应用,一部分经过土壤化改良后成为贡湖湿地公园的表土,或将疏浚淤泥真空预压后作为土地资源中的层土使用。新技术若能结合地方实际需求往往是推

动疏浚淤泥资源化的最佳方式之一。在国家水专项巢湖课题中,将疏浚淤泥与秸秆或湖中打捞的藻体混合制成喷播土壤基质,在巢湖市废弃矿山修复和肥东县坡面绿化中得到示范推广^[232]。另外将天目湖的疏浚泥脱水成泥饼后形成土材料,直接用作湖周矿坑的修复。近来疏浚淤泥资源化利用的新方法和新构想在我国不断涌现,如经初步干化的疏浚淤泥增加泥中有机质含量做成花卉土壤,烧制成建筑用砖块或陶粒,甚至有学者将烧制的陶粒直接作为水体污染沉积物的覆盖材料控制其污染^[233]。为规模化应用,最近有研究将淤泥制作成流动化浇筑,填土于水下填筑人工岛^[234]、市政管网的回填,或将其直接用于湖滨带修复等。总之,底泥疏浚物的最大问题是最终的出路,技术的关键在于简单、快速(脱水),以及因地制宜多途径和规模化利用。

4 问题及展望

沉积物环境与沉积物污染控制是从环境污染角度研究沉积物的两个最主要方面,相应的需要环境学、环境工程学,以及环境地学、环境物理学、环境化学、环境生物学、环境毒理学和自然环境保护学等二、三级基础学科作为支撑。纵观20年来中国沉积物环境的研究进展,多是由国家需求带动了沉积物环境相关基础学科的整体发展,并且在沉积物界面过程与环境地球化学、沉积物中污染物及危害风险、污染沉积物治理与修复等领域,取得了丰硕成果,促成了中国沉积物环境研究整体进入国际研究的第一方阵。

但也应看到,我国沉积物环境研究目前还存在以下3个主要问题:一是重复性研究多,独创性研究少。由于缺乏对国内外同行在沉积物环境领域动态的了解,不能在所要研究问题上对前人已有成果进行归纳和总结,结果存在不同的人对同一个研究对象或影响因素,做数次甚至十多次重复性和结论性相同的工作,浪费了大量的宝贵资源。比如对太湖沉积物污染先后有10多家单位开展过全湖性调查,以及早已有规律可循的沉积物氮磷释放与影响因素(pH、氧含量和温度等)的关系实验等。二是低层次工作多,前沿性研究少。目前在我国公开发表的文献中,仍有相当大比例的成果创新性不足,主要是不了解该领域的科学和前沿问题,缺乏新思路引领或缺少新技术、新方法支持,模仿和跟风特征明显。沉积物是一类特殊的环境介质,对其中基础性和应用性强的实际问题的研究,仍需要有高起点

和大视野的前沿思维切入。三是理论性研究偏多,应用性研究偏少。沉积物处于水圈、岩石圈(土壤圈)、人类圈和生物圈的交汇区,其环境问题也是地球表层系统中的重要问题之一,与人类的生产和生活关联密切。虽然近 10 多年来在理论和应用基础性研究方面的成果大量涌现,但从形成环境标准、治理技术和及进入实际推广应用的要求而言,还有很大差距。中国自然环境要素的多样性丰富、格局的差异性显著、区域和地貌单元的特色性差别大,具有强烈且连续的人与环境相互作用历程^[235],坚持国际合作和国内同行高层次交流、坚持前沿学科引领和问题导向、坚持新技术和新方法的引入和消化吸收,必然会加快我国沉积物环境与污染控制研究达到国际先进水平的步伐。我们根据现今国内外相关的学科和技术发展状况,结合沉积物环境研究的深入和前瞻性要求,基于已有成果罗列出几个未来需要重点考虑和迫切需要重视的新问题,提出研究思路、技术途径和作出展望。

4.1 沉积物综合环境效应研究的多学科交叉

目前已有的模拟研究工作,特别是单一污染物(如碳氮磷)的迁移转化影响^[42,115,154],很大程度上仅有助于认识沉积物在水环境和关键带中的作用和地位,还无法全面揭示人类活动和自然因素作用下沉积物的综合环境效应。因此,未来需多关注大型水利工程和其他人类活动引起的沉积物再悬浮作用对水环境质量的影响,重视野外观测研究,加强应用水文学、沉积学、生物地球化学、生态学和生物工程等多学科交叉研究手段,系统刻画关键带沉积物物质迁移和污染本底与人为活动叠加^[232],综合研究营养盐、重金属和持久性有机污染物在沉积物及其他介质的生物地球化学过程和机理^[40]。在沉积物综合环境效应研究基础上,提出水环境及关键带生态系统服务对策和综合调控模式,为协调环境保护与区域社会经济可持续发展提供科学支撑。

4.2 污染物复合下的沉积物环境与生态效应

近 30 年来,湖泊富营养化(藻华和湖泛)、海洋赤潮和河流黑臭等污染问题较为突出,使得我国沉积物环境研究多偏向于氮、磷等生源性污染物。实际上,重金属和持久性有机污染物在我国沉积物中的存在已十分广泛,不仅重金属污染、有机污染、营养性污染状态呈多年叠加态势,而且多种有害重金属、浩繁的有毒有机污染物在沉积物内共存,有可能呈现出效应异常、风险放大的复合污染问题。以重金属 Hg、Pb、Zn、As、Tl 等富集和以重金属 Cd、

Hg、Zn 等高背景值现象,在我国西南低温成矿区和东部平原区较为普遍。此外,我国化学品的生产量和使用量在全球占比越来越高,污染物及其降解产物进入水体,再加上水动力因素的耦合作用等,给生态影响带来更多的不确定性,增强了这些地区水体沉积物的复合污染风险。为有效管控因沉积物复合污染带来的新问题,在未来研究中,还需特别关注沉积物中重金属、持久性有机污染物,以及新兴污染物的形态、降解产物等非靶标污染物及其引起的生态风险。

4.3 沉积物中新兴和非传统污染物的行为与风险

随着在我国江河湖海部分沉积物中新兴污染物(如 PFCs、极性和离子型化合物)和非传统污染物(纳米材料、微塑料等)被检出,沉积物新兴污染和非传统污染的环境问题已经来临或逐步显现^[236]。在经济发达和人口稠密地区水域,沉积物中污染物的种类数或含量更高。新兴污染物在沉积物和生物体中的富集特征与传统疏水类持久性污染物不同,亟需在微观机制上和实际动态环境(如再悬浮过程)中了解其污染特征,构建针对新兴污染物特征的预测模型,提高风险评价准确性;另一方面,纳米材料和微塑料极易吸附重金属和/或有机污染物,通过在沉积物中的长时间共存而对生态环境构成长期风险。由于沉积物是新兴和非传统污染物的最主要接纳场所,应加强其在沉积物中污染物的分布、迁移和风险特征的研究。

4.4 沉积物质量基准标准化数据库的构建

沉积物质量基准(Sediment Quality Criteria, SGC)是建立沉积物质量标准的基本前提,SGC 又需要标准化数据库的支撑。虽然已对我国海洋沉积物中的部分污染物建立起了质量基准,但仍有很大一部分海洋污染物以及绝大多数内陆水体(湖泊、河流)沉积物,还没有我国自己的 SGC。鉴于不同污染物对沉积物毒性的贡献程度不同,应就摄食暴露、复合污染毒性、新兴污染物毒性、组学毒性筛选甚至气候变化的影响等进行深入研究,构建标准化的国际数据库,使研发的 SQC 更具有包容性。我国地貌单元和生物类型差异大,需要考虑沉积物在不同流域或水域的生物可利用性、吸附动力学、关键物化参数(如粒度和有机质含量)、水力稳定性等差异,以及不同方法所带入的影响等,逐步构建和完善我国沉积物的标准化数据库。

4.5 沉积物污染治理与修复方法与技术看新

对近表层污染沉积物的治理是相对经济和效

果最大化的方法。在预期效果满意的前提下,环保疏浚在未来一段时间仍可能是主要治理手段。但疏浚中造成的欠挖、残留和回淤,以及疏浚后原位新生表层的渐变、疏浚方法所产生的差异等,不仅需要从疏浚效果做进一步研究,甚至在模拟方法和装备上需要引入创新性手段,使得有些结论和反馈建议真正可用于生产和施工单位。以钝化、覆盖和翻耕为代表的原位治理技术在我国虽已有开展甚至已发展多年,但多因规模性研究和案例少、效果的稳定性不足等而未多被决策部门重视。如何从技术原理研究和工程示范层面解决有效性和稳定性,可能是今后努力方向。以近岸带水生植物恢复和长效稳定生长,目前仍是污染水体水质改善和生态系统修复的主要途径之一,但从生物对沉积物(底质或基底)需求角度的研究还相对较少,对沉积物的物性退化、植物和底栖生物的适生性观察手段、信息获取和评价等,与沉积物污染研究的当今水平相比还有很大差距。新技术的引入和消化应用应积极探索并加以鼓励。例如尝试物化—沉积物微生物电化学和植物—沉积物电化学联合应用的方式对污染沉积物进行修复^[237,238],以及在环保疏浚工程后,接续进行覆盖、钝化或植物恢复等串联性沉积物修复^[191]拓展我国污染沉积物治理创新性思路,积累沉积物修复的创新理论与技术储备,为我国在该领域形成更多的创新技术奠定基础。

参考文献(References):

- [1] HALES S, ADEE S. VII. An examination of the strength of several of the principal purging waters, especially of that of Jessop's well; by the Rev. Stephen Hales DD & FRS communicated in a letter to Cromwell Mortimer MD Sec. RS with a letter from Swithin Adee MDFRS to Dr. Hales, on the virtues of the said well[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1750, 46(495): 446-451.
- [2] BAUER F. XII. Some experiments on the fungi which constitute the colouring matter of the red snow discovered in Baffin's Bay. By Francis Bauer, Esq. F. L. S. In a letter addressed to the Right Honourable Sir Joseph Banks, Bart. G. C. B. P. R. S. &c. &c[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1820, 110: 165-173.
- [3] KANE R J. IV. On the composition of the urine and blood in diabetes mellitus[J]. *The Dublin Journal of Medical and Chemical Science*, 1832, 1(1): 15-24.
- [4] ANDREWS E B. Bituminous coal: Its origin, varieties and a few of its special uses[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1873, 95(1): 58-69.
- [5] FRAZER P. Notes on two traps: A case of alteration of earthy sediments[J]. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 1876, 28: 60.
- [6] RITTENBERG S C, EMERY K O, ORR W L. Regeneration of nutrients in sediments of marine basins[J]. *Deep Sea Research*, 1955, 3(1): 23-45.
- [7] OLIFF W D, BERRISFORD C D, TURNER W D, et al. The ecology and chemistry of sandy beaches and nearshore submarine sediments of Natal—II: Pollution criteria for nearshore sediments of the Natal coast[J]. *Water Research*, 1967, 1(2): 131-146.
- [8] WOODIN S A. Polychaete abundance patterns in a marine soft-sediment environment: The importance of biological interactions[J]. *Ecological Monographs*, 1974, 44(2): 171-187.
- [9] HESSLEIN R H. An in situ sampler for close interval pore water studies[J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, 21(6): 912-914.
- [10] DAVISON W, ZHANG Hao. In situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. *Nature*, 1994, 367(6463): 546-548.
- [11] MCD.TOWNSEND C. 1 The effect of levees on the flow of sediment in rivers. A Discussion of the Article on "The Huai River Conservancy Project"[R]. Professional Memoirs, Corps of Engineers, United States Army, and Engineer Department at Large, 1915, 7(32): 181-190.
- [12] WONG Wenhao. Sediments of the north china rivers and their geological significance or a quantitative study of the phenomena of erosion and deposition in North China[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1931, 10(1): 247-272.
- [13] MA Rongzhi. Influence of geology on soil near Weiyuan, Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Geological Review*, 1940(6): 521-532. [馬溶之. 四川威遠附近地質對土壤之影響[J]. 地质论评, 1940(6): 521-532.]
- [14] XIONG Yi. Properties and formation of Pleistocene clay in Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Geological Review*, 1944 (Suppl.1): 109-120. [熊毅. 江西更新统黏土之性质及其生成, 地质论评, 1944(增刊1): 109-120.]
- [15] REN Meie. New research on the Yellow River in China[J]. *Acta geographica Sinica*, 1948, 15(1): 31-33. [任美镛. 我国最近对于黄河问题之新研究[J]. 地理学报, 1948, 15(1): 31-33.]
- [16] ZHANG Hanying. On the root cause of the Yellow River[J]. *New Yellow River*, 1949(00): 32-36. [张含英. 黄河治本论[J]. 新黄河, 1949(00): 32-36.]
- [17] CAI Shutang. Precipitating movement of sediment in still water[J]. *Acta Physica Sinica*, 1956(5): 402-418. [蔡树棠. 泥沙在静水中的沉淀运动[J]. 物理学报, 1956(5): 402-418.]
- [18] QIAN Ning. Sediment problems in rivers[M]. Beijing: Science Popularization Press, 1957. [钱宁. 河流中的泥沙问题[M]. 北京: 科学普及出版社, 1957.]
- [19] XIE Jianheng. On the riverbed evolution of the Lower Yellow River (second half) [J]. *Yellow River Construction*, 1957(7): 19-23. [谢鉴衡. 关于黄河下游河床演变问题(下)[J]. 黄河建设, 1957(7): 19-23.]
- [20] MAI Qiaowei. Sediment problem of Sanmenxia Hydro Junction

- [J]. *New Yellow River*, 1955(11):50-57.[麦乔威. 三门峡水利枢纽的泥沙问题[J]. 新黄河, 1955(11):50-57.]
- [21] ZHAO Jinsheng. Sediment movement of sandy coast, port site selection and erosion and deposition prevention measures [J]. *Chinese Journal of Port Engineering Technology Communication*, 1975(6):1-36.[赵今声. 沙质海岸的泥沙运动, 港址选择和防冲防淤措施[J]. 港工技术通讯, 1975(6):1-36.]
- [22] XIONG Yi, XI Chengfan. Characteristics and evolution of Quaternary sediments in North China Plain [J]. *Science Bulletin*, 1957(6):173-174.[熊毅, 席承藩. 华北平原第四纪沉积物的性质及其演变[J]. 科学通报, 1957(6):173-174.]
- [23] FAN Shiqing, QIN Yunshan. A preliminary study on sediment in the East China Sea and the Southern Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1959(2):82-85.[范时清, 秦蕴珊. 中国东海和黄海南部底质的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1959(2):82-85.]
- [24] Nanjing Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Preliminary report on comprehensive investigation of Lake Taihu [M]. Beijing: Science Press, 1965.[中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告[M]. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [25] HUANG Difan, CHEN Kezao, XU Yongchang, et al. The formation of asphalts in Quaternary sediments of Qinghai Lake and the origin of continental petroleum [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1964(2):171-190.[黄第藩, 陈克造, 徐永昌, 等. 青海湖第四纪沉积物中沥青的形成与陆相石油成因问题[J]. 地质学报, 1964(2):171-190.]
- [26] CHEN Jiyu, YUN Caixing, XU Haigen, et al. The developmental model of the Changjiang River Estuary during last 2000 years [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1979(1):103-111.[陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. 海洋学报, 1979(1):103-111.]
- [27] WANG Sumin, LI Jianren. Lacustrine sedimentation: An effective method to study the historical climate: A case study of Qinghai Lake and Daihai Lake [J]. *Science Bulletin*, 1991(1):54-56.[王苏民, 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段——以青海湖、岱海为例[J]. 科学通报, 1991(1):54-56.]
- [28] WAN Guojiang, HUANG Ronggui, WANG Changsheng, et al. The variation of $^{210}\text{Po}_{\text{ex}}$ vertical profile at the top of Hongfeng Lake [J]. *Science Bulletin*, 1990(8):612-615.[万国江, 黄荣贵, 王长生, 等. 红枫湖沉积物顶部 $^{210}\text{Po}_{\text{ex}}$ 垂直剖面的变异[J]. 科学通报, 1990(8):612-615.]
- [29] ZHANG Licheng, DONG Wenjiang, ZHENG Jianxun, et al. The metal form and form factors of heavy metals in the Xiangjiang River sediments [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1983(1):55-64.[张立成, 董文江, 郑建勋, 等. 湘江河流沉积物重金属的形态类型及其形成因素[J]. 地理学报, 1983(1):55-64.]
- [30] GUO Laodong, HONG Huasheng, ZHUANG Jihao. Sediment-water exchange of phosphorus and silicon in Luoyuan Bay, East Fujian [J]. *Chinese Journal of Tropical Ocean*, 1989(3):60-67.[郭劳动, 洪华生, 庄继浩. 闽东罗源湾沉积物—水界面磷、硅的交换[J]. 热带海洋, 1989(3):60-67.]
- [31] CHEN Shuitu, RUAN Wuqi. Biogeochemistry of phosphorus in Jiulong River Estuary and Western sea area of Xiamen, II. Distribution of phosphorus forms in surface sediments and their transformation in resuspension [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(6):47-54.[陈水土, 阮五崎. 九龙江口、厦门西海域磷的生物地球化学研究, II. 表层沉积物中磷形态的分布及在再悬浮中的转化[J]. 海洋学报, 1993, 15(6):47-54.]
- [32] WANG Tingjian, SU Rui, JIN Xiangcan, et al. The effect to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban eutrophic lakes [J]. *Chinese Journal of Environmental Science Research*, 1994, 7(4):12-19.[王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4):12-19.]
- [33] WANG Xiaorong, HUA Zhaozhe, XU Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments [J]. *Chinese Journal of Environmental Chemistry*, 1996(1):15-19.[王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996(1):15-19.]
- [34] XIANG Mingju, SHI Jiyang, ZHOU Youping, et al. The distribution and evolution of fatty acids in various sediments and its significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997(2):84-88.[向明菊, 史继扬, 周友平, 等. 不同类型沉积物中脂肪酸的分布、演化和生烃意义[J]. 沉积学报, 1997(2):84-88.]
- [35] SONG Jinming. Chemistry of sediment seawater interface in offshore China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1997:222.[宋金明. 中国近海沉积物—海水界面化学[M]. 海洋出版社, 1997:222.]
- [36] YU Zishan, WANG Shihong. The effect of bioturbation of *Nuttallia olivacea* (Jay, 1857) on the vertical distribution of sediment particles [J]. *Journal of Qingdao Ocean University (Natural Science Edition)*, 1999, 29(2):279-282.[于子山, 王诗红. 紫影血蛤的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版, 1999, 29(2):279-282.]
- [37] HONG Yetang, PIAO Hechun, JIANG Hongbo. Environmental geological characteristics of sediment in the Yellow River [J]. *Chinese Science (Part B)*, 1990(11):1175-1184.[洪业汤, 朴河春, 姜洪波. 黄河泥沙的环境地质特征[J]. 中国科学: B辑, 1990(11):1175-1184.]
- [38] FAN Chengxin, ZHOU Yiyong, WU Qinglong. The sediment-water interface of lakes: Processes and effects [M]. Beijing: Science Press, 2013:104-111, 175-184, 244-247, 302-349.[范成新, 周易勇, 吴庆龙. 湖泊沉积物界面过程与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013:104-111, 175-184, 244-247, 302-349.]
- [39] LIU Min, XU Shiyuan, HOU Lijun, et al. Environmental Biogeochemical processes of Nutrients at the sediment-water interface of tidal flat in the Yangtze Estuary [M]. Beijing: Science Press, 2007.[刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江口潮滩沉积物—水界面营养盐环境生物地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [40] WANG Shengrui. Biogeochemistry of Nitrogen and Phosphorus in lake sediment-water interface processes [M]. Beijing: Science Press, 2013.[王圣瑞. 湖泊沉积物—水界面过程氮磷生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [41] WEN Xuefa, ZHANG Xinyu, WEI Jie, et al. Understanding

- the biogeochemical process and mechanism of ecosystem carbon cycle from the perspective of the Earth's critical zone[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 471-479. [温学发, 张心昱, 魏杰, 等. 地球关键带视角理解生态系统碳生物地球化学过程与机制[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 471-479.]
- [42] JI Na, CHENG Heqin, YANG Zhongyong, *et al.* Sedimentary and morphological evolution of nearshore coast of Yangtze Estuary in the last 30 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 945-954. [计娜, 程和琴, 杨忠勇, 等. 近30年来长江口岸滩沉积物与地貌演变特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 945-954.]
- [43] LÜ Ying, CHEN Fanrong, YANG Yongqiang, *et al.* Study on profile distribution of nutrients and exchange fluxes at sediment-water interface in inner Pearl River Estuary in spring[J]. *Chinese Journal of Earth and Environment*, 2006, 34(4): 1-6. [吕莹, 陈繁荣, 杨永强, 等. 春季珠江口内营养盐剖面分布和沉积物—水界面交换通量的研究[J]. 地球与环境, 2006, 34(4): 1-6.]
- [44] SUN Jiao, YUAN Dekui, FENG Huan, *et al.* Research progress on exchange fluxes of nutrients in sediment-water interface[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(6): 933-938. [孙娇, 袁德奎, 冯桓, 等. 沉积物—水界面营养盐交换通量的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(6): 933-938.]
- [45] LIN Xianbiao, LIU Min, HOU Lijun, *et al.* Nitrogen losses in sediments of the East China Sea: Spatiotemporal variations, controlling factors, and environmental implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(10): 2 699-2 715.
- [46] LIU Min, XU Shiyuan. Environmental biogeochemical process and ecological risk of POPs in tidal flat of Yangtze River Estuary[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2005. [刘敏, 许世远. 长江口潮滩 POPs 环境生物地球化学过程与生态风险[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.]
- [47] LÜ Min, LUAN Xiaolin, LIAO Chunyang, *et al.* Human impacts on polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in chinese intertidal zones[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 878-884.
- [48] YANG Z, WANG H, SAITO Y. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4): 501-517.
- [49] WANG Shuai, FU Bojie, PIAO Shilong, *et al.* Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 9: 38-41.
- [50] WU Chuangshou, YANG S L, LEI Y P. Quantifying the anthropogenic and climatic impacts on water discharge and sediment load in the Pearl River (Zhujiang), China (1954-2009) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 452/453: 190-204.
- [51] LIU Wei, WANG Suiji. Temporal and spatial change of the sedimentation rate on the channel cross-sections in the lower reaches of Yellow River and its influence factors[J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation Research*, 2019, 26(2): 167-174. [刘慰, 王随继. 黄河下游河道断面沉积速率的时段变化及其原因分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 167-174.]
- [52] WANG Houjie, YANG Zuosheng, BI Naishuang, *et al.* The rapid swing of the mainstream of the estuary into the sea during the Yellow River water and sediment regulation in 2005 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005(23): 2 656-2 662. [王厚杰, 杨作升, 毕乃双, 等. 2005年黄河调水调沙期间河口入海主流的快速摆动[J]. 科学通报, 2005(23): 2 656-2 662.]
- [53] YANG Yunping, LI Yitian, SUN Zhaohua, *et al.* Surface sediment in the nearby shelf of the Yangtze River: Change and causes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 863-872. [杨云平, 李义天, 孙昭华, 等. 长江口邻近陆架表层沉积物变化特征及成因[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 863-872.]
- [54] CHAI Chao, YU Zhiming, SHEN Zhiliang, *et al.* Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(16): 4 687-4 695.
- [55] ZHANG Shuo, JIAN Xing, ZHANG Wei. Sedimentary Provenance analysis using detrital apatite: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11): 1 142-1 153. [张硕, 简星, 张巍. 碎屑磷灰石对沉积物源判别的指示[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1 142-1 153.]
- [56] WU Gaijie, CAO Wenzhi, WANG, Feifei, *et al.* Riverine nutrient fluxes and environmental effects on China's estuaries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 130-137.
- [57] XU Yayan, SONG Jinming, LI Xuegang, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Bohai Bay[J]. *Chinese Journal of Environmental science*, 2012, 33(3): 732-740. [徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 732-740.]
- [58] MAI Bixian, FU Jiamo, ZHANG Gan, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Pearl river and estuary, China: Spatial and temporal distribution and sources[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 1611/120: 1 429-1 445.
- [59] SHI Hao, YANG Yi, LIU Min, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics in the surface sediments of the Yangtze Estuary and nearby coastal areas [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(1): 317-323.
- [60] HUANG Honghui, LIN Yantang, LI Chunhou, *et al.* Ecology study on the Benthic Animals of Pearl River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002(4): 603-607. [黄洪辉, 林燕棠, 李纯厚, 等. 珠江口底栖动物生态学研究[J]. 生态学报, 2002(4): 603-607.]
- [61] SUN M Y, DAFFORN K A, BROWN M V, *et al.* Bacterial communities are sensitive indicators of contaminant stress [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(5): 1 029-1 038.
- [62] MENG Xiangliang, JIANG Xiaoming, LI Zhengfei, *et al.* Responses of macroinvertebrates and local environment to short-term commercial sand dredging practices in a flood-plain lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1 350-1 359.
- [63] MENG Xiangliang, CHEN Juanjuan, Li Zhengfei, *et al.* Degraded functional structure of macroinvertebrates caused by

- commercial sand dredging practices in a flood plain lake [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263(Part B): 114415.
- [64] LI Xiubao, HUANG Hui, LIAN Jiansheng. Coral community changes in response to a high sedimentation event: A case study in southern Hainan Island [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 58(9): 1 028-1 037.
- [65] QIAN Ning, WAN Zhaohui. Dynamics of sediment movement [M]. Beijing: Science Press, 2003: 15-20. [钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 15-20.]
- [66] FANG Hongwei, CHEN Minghong, CHEN Zhihe. Surface characteristics and model of environmental sediments [M]. Beijing: Science Press, 2009. [方红卫, 陈明洪, 陈志和. 环境泥沙的表面特性与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [67] TANG Hongxiao, QIAN Yi, WEN Xianghua. Characteristics and control principles of water particles and refractory organic matter (Volume I): Water particles [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2000. [汤鸿霄, 钱易, 文湘华. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理(上卷): 水体颗粒物[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.]
- [68] XIAO Yang, LU Qi, CHENG Haoke, et al. Surface properties of sediments and its effect on phosphorus adsorption [J]. *Chinese Journal of Sediment Research*, 2011(6): 64-68. [肖洋, 陆奇, 成浩科, 等. 泥沙表面特性及其对磷吸附的影响[J]. 泥沙研究, 2011(6): 64-68.]
- [69] CHEN Minghong, FANG Hongwei, CHEN Zhihe. Experiment of phosphorus distribution on sediment surface [J]. *Chinese Journal of Sediment Research*, 2009(4): 51-57. [陈明洪, 方红卫, 陈志和. 泥沙颗粒表面磷吸附分布的实验研究[J]. 泥沙研究, 2009(4): 51-57.]
- [70] FANG Hongwei, HUANG Lei, ZHAO Huiming, et al. Mechanics of bio-sediment transport [M]. Berlin: Springer, 2020.
- [71] CHEN Xindi, ZHANG Changkuan, ZHOU Zeng, et al. Stabilizing effects of bacterial biofilms: EPS penetration and redistribution of bed stability down the sediment profile [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122: 3 113-3 125.
- [72] LI Yi, WANG Chao, ZHANG Wenlong, et al. Modelling the effects of hydrodynamic regimes on microbial communities within fluvial biofilms: Combining deterministic and stochastic processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 12 869-12 878.
- [73] YANG Shouye, YIN Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environment changes and human activities [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 1-10. [杨守业, 印萍. 自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 1-10.]
- [74] FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: I. Spatial variation of the ammonium release rates and its source and sink fluxes [J]. *Chinese Journal of Lake Science*, 2004(1): 10-20. [范成新, 张路, 秦伯强, 等. 太湖沉积物—水界面生源要素迁移机制及量化——1. 铵态氮释放速率的空间差异及源—汇通量[J]. 湖泊科学, 2004(1): 10-20.]
- [75] FAN Chengxin, ZHANG Lu, BAO Xianming, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. *Chinese Journal of Lake Science*, 2006(3): 207-217. [范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物—水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源—汇转换[J]. 湖泊科学, 2006(3): 207-217.]
- [76] ZHANG Yakun, YANG Libiao, LEI Kun, et al. Exchange and deposition fluxes of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in lower Yellow River [J]. *Sediment Research*, 2013(6): 66-74. [张亚昆, 杨丽标, 雷坤, 等. 黄河下游沉积物—水界面氮磷交换与沉积通量研究[J]. 泥沙研究, 2013(6): 66-74.]
- [77] WANG Houjie, YUAN Xiaojun, WANG Yan, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: Processes and mechanism [J]. *Sediment Research*, 2010(4): 51-60. [王厚杰, 原晓军, 王燕, 等. 现代黄河三角洲废弃神仙沟—钓口叶瓣的演化及其动力机制[J]. 泥沙研究, 2010(4): 51-60.]
- [78] DONG Aiguo. Source, sink and its environmental record of sediments in Yellow Sea and East China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [董爱国. 黄、东海海域沉积物的源汇效应及其环境意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [79] SONG Jinming, QU Baoxiao, LI Xuegang, et al. Carbon sinks/sources in the Yellow and East China Seas—Air-sea interface exchange, dissolution in seawater, and burial in sediments [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(11): 1 583-1 593. [宋金明, 曲宝晓, 李学刚, 等. 黄东海的碳源汇: 大气交换、水体溶存与沉积物埋藏[J]. 中国科学: D辑, 2018, 48(11): 1 444-1 455.]
- [80] DING Shiming, CHEN Musong, GONG Mengdan, et al. Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 872-884.
- [81] YANG Zhihong. A study on phosphorus flux from sediment in reservoirs: A case study of Xinshan Reservoir and Shimen Reservoir [D]. Taiwan: Taiwan University, 2007. [楊智閻. 水庫底泥磷通量之研究——以新山水庫、石門水庫為例[D]. 台灣: 台灣大學, 2007.]
- [82] WANG Jingfu, CHEN Jingan, LUO Jing, et al. Comparative study on quantitative estimations of phosphorus release flux from sediments of Lake Hongfeng, Guizhou Province, China [J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(1): 1-6. [王敬富, 陈敬安, 罗婧, 等. 红枫湖沉积物内源磷释放通量估算方法的对比研究[J]. 地球与环境, 2018, 46(1): 1-6.]
- [83] FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. Estimation on dynamic release of phosphorus from wind-induced suspended particulate matter in Lake Taihu [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(8): 760-768. [范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学: D辑, 2003, 33(8): 760-768.]
- [84] QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. Dynamics of

- sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 54-64. [秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1 822-1 831.]
- [85] QIN Boqiang, ZHU Guangwei, ZHANG Lu, *et al.* Estimation of internal nutrient release in large shallow Lake Taihu, China [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(Suppl.1): 33-44. [秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学: D辑, 2005, 35(增刊1): 33-44.]
- [86] LUO Liancong, QIN Boqiang, ZHU Guangwei. Calculation of total and resuspendable sediment volume in Lake Taihu [J]. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 2004, 35(6): 491-496. [罗澈葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 491-496.]
- [87] PANG Yong, YAN Runrun, YU Zhongbo, *et al.* Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu affected by wind [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008(9): 2 456-2 464. [逢勇, 颜润润, 余钟波, 等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究[J]. 环境科学, 2008(9): 2 456-2 464.]
- [88] PANG Yong, YAN Runrun, LI Yiping, *et al.* Contribution of combined action of exogenous source and internal load on water nutrient in Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Water Conservancy*, 2008(9): 1 051-1 059. [逢勇, 颜润润, 李一平, 等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究[J]. 水利学报, 2008(9): 1 051-1 059.]
- [89] FAN Chengxin. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: A review [J]. *Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1 191-1 218. [范成新. 湖泊沉积物—水界面研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1 191-1 218.]
- [90] HOU Lijun, YIN Guoyu, LIU Min, *et al.* Effects of sulfamethazine on denitrification and the associated N_2O release in estuarine and coastal sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(1): 326-333.
- [91] LEI Yang, WANG Peifang, WANG Chao, *et al.* The effect of submerged plants on the release of heavy metals from sediment under different hydrodynamic disturbances [J]. *Hydrodynamic Research and Progress (A)*, 2015, 30(3): 245-250. [雷阳, 王沛芳, 王超, 等. 不同水动力扰动下沉水植物对沉积物重金属释放的影响[J]. 水动力学研究与进展 A辑, 2015, 30(3): 245-250.]
- [92] CHENG Haomiao, HUA Zulin. Effects of hydrodynamic disturbances and resuspension characteristics on the release of tetrabromobisphenol A from sediment [J]. *Environment Pollution*, 2016, 219: 785-793.
- [93] SHI Dan, DING Shiming, XU Di, *et al.* Determination of soluble reactive phosphorus in porewaters of sediments using the technique of diffusive equilibration in thin films [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(6): 768-774. [时丹, 丁士明, 许笛, 等. 利用薄膜扩散平衡技术分析沉积物间隙水溶解态反应性磷[J]. 湖泊科学, 2009, 21(6): 768-774.]
- [94] LUO Min, HUANG Jiafang, ZHU Wenfeng, *et al.* Impacts of increasing salinity and inundation on rates and pathways of organic carbon mineralization in tidal wetlands: A review [J]. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 31-49.]
- [95] PAN Feng, GUO Zhanrong, LIU Huatai, *et al.* High-resolution distribution and biogeochemical behavior of phosphorus and iron at sediment-water interface of tidal flat [J]. *Geosciences*, 2018, 43(11): 4 109-4 119. [潘峰, 郭占荣, 刘花台, 等. 潮滩沉积物—水界面磷、铁的高分辨率分布特征及生物地球化学行为[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4 109-4 119.]
- [96] DING Shiming, XU Di, SUN Qin, *et al.* Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44: 8 169-8 174.
- [97] DING Shiming, SUN Qin, XU Di, *et al.* High-resolution simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved sulfide: The first observation of their simultaneous release in sediments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46: 8 297-8 304.
- [98] ZHANG Yaohong, WANG Lin, XIE Xiaojin, *et al.* Effects of invasion of *Spartina alterniflora* and exogenous N deposition on N_2O emissions in a coastal salt marsh [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 77-83.
- [99] SHENG Qiang, ZHAO Bin, HUANG Mingyao, *et al.* Greenhouse gas emissions following an invasive plant eradication program [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 229-237.
- [100] XIE Xuefeng, SUN Xiaomin, WU Tao, *et al.* Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on coastal wetland ecosystem: Advances and prospects [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2 119-2 128. [解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 等. 互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2 119-2 128.]
- [101] YOU Bensheng, ZHONG Jicheng, FAN Chengxin, *et al.* Effects of hydrodynamics processes on phosphorus fluxes from sediment in large, shallow Taihu Lake [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9): 1 055-1 060.
- [102] TIAN Zhuangcai, GUO Xiujun, YU Le, *et al.* Review of seabed sediment resuspension by internal solitary wave [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(2): 166-178. [田壮才, 郭秀军, 余乐, 等. 内孤立波悬浮海底沉积物研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(2): 166-178.]
- [103] ZHENG Shasha, WANG Peifang, WANG Chao, *et al.* Sediment resuspension under action of wind in Taihu Lake, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015, 30(1): 48-62.
- [104] DONG Jianwei, XIA Xinghui, WANG Minghu, *et al.* Effect of recurrent sediment resuspension-deposition events on bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 934-946.
- [105] LI Wang, LI Zhenliang, ZU Bo. Adsorption experiment and model study on phosphorus in sediment in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2018, 18(33): 91-97. [李旺, 李振亮, 祖波. 三峡库区泥沙对

- 磷的吸附试验及模型研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 91-97.]
- [106] LUO Liancong, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, *et al.* Sediment distribution and the maximum resuspension depth with disturbance in Lake Taihu [J]. *Sediment Research*, 2004(1): 9-14. [罗激葱, 秦伯强, 朱广伟, 等. 太湖沉积物的分布和动力扰动下最大侵蚀深度的确定[J]. 泥沙研究, 2004(1): 9-14.]
- [107] HU Chunhua, HU Weiping, ZHANG Fabing, *et al.* Sediment resuspension observation in Taihu Lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005(22): 2 541-2 545. [胡春华, 胡维平, 张发兵, 等. 太湖沉积物再悬浮观测[J]. 科学通报, 2005(22): 2 541-2 545.]
- [108] HU Kaiming, WANG Shui, PANG Yong, Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu[J]. *Lake Sciences*, 2014, 26(2): 191-199. [胡开明, 王水, 逢勇. 太湖不同湖区底泥悬浮沉降规律研究及内源释放量估算[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 191-199.]
- [109] LI Yiping, WANG Jianwei, JIANG Long, *et al.* The driving force of sediment suspension on sediment-water interface in shallow lakes [J]. *Lake Sciences*, 2017, 29(1): 43-51. [李一平, 王建威, 姜龙, 等. 浅水湖泊动力作用下水—土界面底泥起悬驱动力野外观测[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 43-51.]
- [110] ZHENG Shasha. Simulation of sediment resuspension process and heavy metal migration in Taihu Lake under wind disturbance [D]. Nanjing: Hohai University, 2015. [郑莎莎. 风扰动的太湖沉积物再悬浮过程及重金属的迁移模拟[D]. 南京: 河海大学, 2015.]
- [111] ZHANG Yanwei, WANG Lei, SUN Hongwen, *et al.* Impacts of loach bioturbation on the selective bioaccumulation of HBCDD diastereoisomers and enantiomers by mirror carp in a microcosm [J]. *Chemosphere*, 2016, 163: 471-479.
- [112] LIU Jingsi, ZHU Xiaosheng, HU Zilong, *et al.* Effects of different water stratification on vertical distribution of nitrogen in sediment interstitial water: A case study of Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2019, 41(8): 3 601-3 611. [刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 等. 不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例[J]. 环境科学, 2019, 41(8): 3 601-3 611.]
- [113] GENG Nan. Multi-media migration and transformation of heavy metal cadmium and enrichment effect of *Corbicula fluminea* in dynamic water [D]. Nanjing: Hohai University, 2015. [耿楠. 动水条件下重金属镉的多介质迁移转化及河蚶的富集效应[D]. 南京: 河海大学, 2015.]
- [114] HOU Lijun, ZHENG Yanling, LIU Min, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation and its contribution to nitrogen removal in China's coastal wetlands [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15 621.
- [115] DENG Fengyu, HOU Lijun, LIU Min, *et al.* Dissimilatory nitrate reduction processes and associated contribution to nitrogen removal in sediments of the Yangtze Estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120: 1 521-1 531.
- [116] CAO Wenzhi, YANG Jingxin, LI Ying, *et al.* Dissimilatory nitrate reduction to ammonium conserves nitrogen in anthropogenically affected subtropical mangrove sediments in Southeast China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 155-161.
- [117] HAN Chao, REN Jinghua, TANG Hao, *et al.* Quantitative imaging of radial oxygen loss from *Vallisneria spiralis* roots with a fluorescent planar optode [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570: 1 232-1 240.
- [118] REN Mingyi, DING Shiming, SHI Dan, *et al.* A new DGT technique comprised in a hybrid sensor for the simultaneous measurement of ammonium, nitrate, phosphorus and dissolved oxygen [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138447.
- [119] DONG Jianwei, XIA Xinghui, WANG Minghu, *et al.* Effect of water-sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir on the concentrations, bioavailability, and fluxes of PAHs in the middle and lower reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 101-112.
- [120] YU Shen, LI Hongbo. Perspective on the release of heavy metals via sediment resuspension [J]. *Ecological Environment*, 2010, 19(7): 1 724-1 731. [俞慎, 厉红波. 沉积物再悬浮—重金属释放机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1 724-1 731.]
- [121] PENG Jianfeng, WANG Baozhen, SONG Yonghui, *et al.* Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(2): 92-97.
- [122] XIA Xinghui, YANG Zhifeng, ZHANG Xueqing. Effect of suspended-sediment concentration on Nitrification in river water: Importance of suspended sediment-water interface [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10): 3 681-3 687.
- [123] XIA Xinghui, LIU Ting, YANG Zhifeng, *et al.* Dissolved organic Nitrogen transformation in River Water: Effects of suspended sediment and organic Nitrogen concentration [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 484: 96-104.
- [124] LIU Ting, XIA Xinghui, LIU Shaoda, *et al.* Acceleration of denitrification in turbid rivers due to denitrification occurring on suspended sediment in oxic waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(9): 4 053-4 061.
- [125] XIA Xinghui, LI Zhihuang, ZHANG Sibao, *et al.* Occurrence of anammox on Suspended Sediment (SPS) in oxic river water: Effect of the SPS particle size [J]. *Chemosphere*, 2019, 235: 40-48.
- [126] XIA Xinghui, JIA Zhimei, LIU Ting, *et al.* Coupled nitrification-denitrification caused by Suspended Sediment (SPS) in rivers: Importance of SPS size and composition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 212-221.
- [127] XIA Xinghui, LIU Ting, YANG Zhifeng, *et al.* Enhanced nitrogen loss from rivers through coupled nitrification-denitrification caused by suspended sediment [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 47-59.
- [128] ZHOU Yiyong, LI Jianqiu, ZHANG Min. Vertical variations in kinetics of alkaline phosphatase and P species in sediments of a shallow chinese eutrophic lake (Lake Donghu) [J]. *Hydrobiologia*, 2001, 450: 91-98.
- [129] QIN Boqiang, Deng Jianmin, PAERL H W, *et al.* Why Lake

- Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(6): 354-356.
- [130] ZHOU Yiyong, SONG Chunlei, CAO Xiuyun, *et al.* Phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sediments of a large eutrophic chinese lake (Lake Taihu)[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 599: 119-116.
- [131] SONG Chunlei, CAO Xiuyun, ZHOU Yiyong. Fluctuation of size- fractionated alkaline phosphatase after bloom disappearance in two shallow ponds[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, 18: 982-988.
- [132] WANG Siyang, XIAO Jian, WAN Lingling, *et al.* Mutual dependence of Nitrogen and Phosphorus as key nutrient elements: One facilitates dolichospermum flos-aquae to overcome the limitations of the other[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52: 5 653-5 661.
- [133] WU Qinglong, WU Yucheng, XING Peng, *et al.* Chapter 4: Nitrogen oxidation and its microbiological processes at sediment interface[M]// FAN Chengxin, ZHOU Yiyong, WU Qinglong, *et al.* The sediment-water interface of lakes: Processes and effects. Beijing: Science Press, 2013: 82-116.[吴庆龙, 吴宇澄, 邢鹏, 等. 第4章 沉积物界面氮氧化及其微生物学过程[M]//范成新, 周易勇, 吴庆龙, 等. 湖泊沉积物水界面过程与效应. 北京: 科学出版社, 2013: 82-116.]
- [134] WU Yonghong, LIU Jiantong, YANG Linzhang, *et al.* Allelopathic control of cyanobacterial blooms by periphyton biofilms [J]. *Environmental Microbiology*, 2011, 13: 604-615.
- [135] LIU Yuansi, GONG Lixue, MU Xiaoying, *et al.* Characterization and co-occurrence of microbial community in epiphytic biofilms and surface sediments of wetlands with submersed macrophytes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136950.
- [136] ZHANG Lei, GU Xiaozhi, FAN Chengxin. Impact of different benthic animals on phosphorus dynamics across the sediment-water interface[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(11): 1 674-1 682.
- [137] SHANG Jingge, ZHANG Lu, ZHANG Bo, *et al.* Disturbance effect of *Tanytus chinensis* larvae on denitrification rate and process in sedimen[J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(5): 708-713.[商景阁, 张路, 张波, 等. 中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)幼虫底栖扰动对沉积物溶解氧特征及反硝化的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 708-713.]
- [138] SMITH V. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 221: 669-671.
- [139] SCHEFFER M, RINALDI S, GRAGNANI A, *et al.* On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes[J]. *Ecology*, 1997, 78: 272-282.
- [140] XIE Liqiang, XIE Ping, LI Sixin, *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of microcystis blooms?[J]. *Water Research*, 2003, 37: 2 073-2 080.
- [141] XU Hai, PAERL H W, QIN Boqiang, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55: 420-432.
- [142] TONG Yindong, ZHANG Wei, WANG Xuejun, *et al.* Decline in chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 507.
- [143] SØNDERGAARD M. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2003. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd.
- [144] YANG Liuyan, YANG Xinyan, REN Liman, *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1): 18-27.[杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27.]
- [145] WEI Hailun, CAI Jingong, WANG Guoli, *et al.* The diversity of organic matter in marine sediments and the suspiciousness of source parameters: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1 014-1 033.[韦海伦, 蔡进功, 王国力, 等. 海洋沉积物有机质赋存的多样性与物源指标的多疑性综述[J]. 地球科学进展, 2018, 33(10): 1 014-1 033.]
- [146] XIE Liqiang, XIE Ping, TANG Huijuan. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by Microcystis blooms—An enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical chinese lake [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 391-399.
- [147] SUN Rui, SUN Pengfei, ZHANG Jianhong, *et al.* Microorganisms-based methods for harmful algal blooms control: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 12-20.
- [148] ZHU Lin, SHI Wenqing, van Dam B, *et al.* Algal accumulation decreases sediment nitrogen removal by uncoupling Nitrification-denitrification in shallow Eutrophic lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6 194-6 201.
- [149] HAN Chao, DING Shiming, YAO Lei, *et al.* Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 300: 329-337.
- [150] WU Songjun, ZHAO Yanping, CHEN Yuanyuan, *et al.* Sulfur cycling in freshwater sediments: A cryptic driving force of iron deposition and phosphorus mobilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1 294-1 303.
- [151] ZHAO Yanping, ZHANG Zhongqian, WANG Guoxiang, *et al.* High sulfide production induced by algae decomposition and its potential stimulation to phosphorus mobility in sediment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 163-172.
- [152] BAI Xiuling, DING Shiming, FAN Chengxin, *et al.* Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 2 507-2 513.
- [153] Ni Zhaokui, WANG Shengrui, CAI Jingjing, *et al.* The potential role of sediment organic phosphorus in algal growth in a low nutrient lake [J]. *Environal Pollution*, 2019, 255 (Pt 2) : 113235.
- [154] NI Zhaokui, WANG Shengrui, WANG Yuemin. Characteristics of bioavailable organic phosphorus in sediment and its contribution to lake eutrophication in China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255 (Pt 2) : 113235.

- 2016, 219: 537-544.
- [155] YAO Xiaohong, ZHANG Yunlin, ZHANG Lu, *et al.* Emerging role of dissolved organic nitrogen in supporting algal bloom persistence in Lake Taihu, China: Emphasis on internal transformations[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139497.
- [156] LI Hui, SONG Chunlei, CAO Xiuyun, *et al.* The phosphorus release pathways and their mechanisms driven by organic carbon and nitrogen in sediments of eutrophic shallow lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 280.
- [157] SHEN Qiushi, FAN Chengxin. Identification of black suspended particles in the algae-induced black bloom using multi-approaches[J]. *Lake Sciences*, 2015, 27(3):591-598.[申秋实, 范成新. 太湖湖泛水体显黑颗粒的元素形态分析与鉴定[J]. 2015, 27(3):591-598.]
- [158] LU Xin. Forming mechanisms of major odorous compounds (VSCs) in algae-induced black water bloom and preventive effects of sediment dredging on their production [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012: 70-77.[卢信. 藻源性湖泛主要致臭物(VSCs)形成机制及底泥疏浚影响研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012:70-77.]
- [159] CAI Ping, WU Yuchen, LIU Xin, *et al.* The contribution of sediment and algal to the formation of black bloom and their potential to supply the black substance in waters in Lake Taihu[J]. *Lake Sciences*, 2015, 27(3):575-582.[蔡萍, 吴雨琛, 刘新, 等. 底泥和藻体对太湖湖泛的诱发及水体致黑物的供应潜力[J]. 湖泊科学, 2015, 27(3):575-582.]
- [160] FENG Z, FAN C, HUANG W, *et al.* Microorganisms and typical organic matter responsible for lacustrine "black bloom"[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 1-8.
- [161] WAN Guojiang, HU Qile, CAO Long, *et al.* Resource exploitation environmental disaster geochemistry: An example from Fe and Mn pollution in Lake Aha, Guizhou Province[J]. *Frontier of Geosciences*, 2001, 8(2): 353-358.[万国江, 胡其乐, 曹龙, 等. 资源开发—环境灾害—地球化学——以贵州阿哈湖铁、锰污染为例[J]. 地学前缘, 2001, 8(2):353-358.]
- [162] DAI Guohua, LIU Xinhui. Factors affecting the migration of persistent organic pollutants across the sediment-water interface of aquatic environment.[J] *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 224-230.[戴国华, 刘新会. 影响沉积物—水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 224-230.]
- [163] ZHOU Wenxiu, CHEN Weifang, LI Peng, *et al.* Occurrence and distribution of Polyhalogenated Carbazoles (PHCs) in sediments from the northern South China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 753:142 072-142 072.
- [164] MA Deyi, WANG Juying, HONG Ming, *et al.* Methodology analysis of marine environmental quality benchmark research [M]. Beijing: Ocean Press, 2011.[马德毅, 王菊英, 洪鸣, 等. 海洋环境质量基准研究方法学浅析[M]. 北京:海洋出版社, 2011.]
- [165] WANG Shengrui, WU Zhihao, LUO Jun. Transfer mechanism, uptake kinetic process, and bioavailability of P, Cu, Cd, Pb, and Zn in macrophyte rhizosphere using diffusive gradients in thin films[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52: 1 096-1 108.
- [166] FAN Chengxin, ZHU Yuxin, JI Zhijun, *et al.* Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3): 235-241.[范成新, 朱育新, 吉志军, 等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3):235-241.]
- [167] MA Deyi, WANG Juying. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 521-525.[马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):521-525.]
- [168] ZENG Yan, ZHANG Wei, CHEN Jingan, *et al.* Analysis of heavy metal pollution in the sediment of the inflow-lake rivers of the Hongfeng Lake [J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(4): 470-475.[曾艳, 张维, 陈敬安, 等. 红枫湖入库河流沉积物中重金属污染状况分析[J]. 地球与环境, 2010, 38(4): 470-475.]
- [169] ZHAO Yanmin, QIN Yanwen, CAO Wei, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake[J]. *Chinese Journal of Environmental Science Research*, 2020, 33(3): 572-580.[赵艳民, 秦延文, 曹伟, 等. 洞庭湖表层沉积物重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 572-580.]
- [170] FENG Xinbin, JIANG Hongmei, QIU Guangle, *et al.* Mercury massbalance study in Wujiangdu and Dongfeng Reservoirs, Guizhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2 594-2 603.
- [171] CHEN Jingan, WANG Jingfu, GUO Jianyang, *et al.* Eco-environment of reservoirs in China: Characteristics and research prospects [J]. *Progress in Physical Geography*, 2018, 42(2): 185-201.
- [172] WANG Xinxin, SU Ping, LIN Qidong, *et al.* Distribution, assessment and coupling relationship of heavy metals and macroinvertebrates in sediments of the Weihe River Basin[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50:101665.
- [173] REN Mingyi, WANG Yan, DING Shiming, *et al.* Development of a new diffusive Gradients in Thin Films (DGT) method for the simultaneous measurement of CH₃Hg⁺ and Hg²⁺[J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(10):7 976-7 983.
- [174] DING Zhiyong, PU Jia, GILILI Abdulwaili. Heavy metal contamination characteristics and its assessment in surface sediments of major lakes in China [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(6): 126-141.[丁之勇, 蒲佳, 吉力力·阿不都外力. 中国主要湖泊表层沉积物总金属污染特征与评价分析[J]. 环境工程, 2017, 35(6): 126-141.]
- [175] YANG Jinxi, ZHANG Yanfeng, ZHU Lingyan. Pollution and risk assessment of typical heavy metals in river sediments of seven major watersheds in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 30(3): 423-432.[阳金希, 张彦峰, 祝凌燕. 中国七大水系沉积物中典型重金属生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 423-432.]

- [176] CHEN Ruihui, CHEN Haiyang, SONG Liuting, *et al.* Characterization and source apportionment of heavy metals in the sediments of Lake Tai (China) and its surrounding soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 1338-19.
- [177] YI Xiaoyi, LI Huizhen, MA Ping, *et al.* Identifying the causes of sediment-associated toxicity in urban waterways in South China: Incorporating bioavailability-based measurements into whole-sediment toxicity identification evaluation [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(8): 1744-1750.
- [178] LI Chaocan, HUO Shouliang, YU Zhiqiang, *et al.* National investigation of semi-volatile organic compounds (PAHs, OCPs, and PCBs) in lake sediments of China: Occurrence, spatial variation and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:325-336.
- [179] ZHANG Yu. Distribution and risk assessment of new organic pollutants in sediments from the intertidal zone of the New River Estuary [D]. Qingdao: Qingdao University, 2019: 1-40. [张宇. 新河入海口潮间带沉积物中新型有机污染物的分布及风险评估[D]. 青岛: 青岛大学, 2019: 1-40.]
- [180] CHEN Manying, LUO Xiaojun, ZHANG Xiulan, *et al.* Chlorinated paraffins in sediments from the Pearl River Delta, South China: Spatial and temporal distributions and implication for processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45: 9936-9943.
- [181] LI Huizhen, YI Xiaoyi, CHENG Fei, *et al.* Identifying organic toxicants in sediment using effect-directed analysis: A combination of bioaccessibility—Based extraction and high-throughput midge toxicity testing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53: 996-1003.
- [182] LI Huizhen, SUN Baoquan, CHEN Xin, *et al.* Addition of contaminant bioavailability and species susceptibility to a sediment toxicity assessment: Application in an urban stream in China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 135-141.
- [183] BAO Lianjun, ZENG E Y. Application of passive sampling techniques in measurement of HOCs in aquatic environments [M]//Zeng E Y. Persistent Organic Pollutants (POPs): Analytical techniques, environmental fate and biological effects [M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 135-159.
- [184] LIAO Chunyang, BAO Lianjun, CUI Xinyi, *et al.* Research methods and applications of bioavailability of organic pollutants [M]//JIANG Guibin, ZHENG Minghui, SUN Hongwen, *et al.* Frontier of Environmental Chemistry (Vol. 2). Beijing: Science Press, 2019: 47-67. [廖春阳, 鲍恋君, 崔欣毅, 等. 有机污染物生物有效性研究的方法与应用[M]//江桂斌, 郑明辉, 孙红文, 等. 环境化学前沿(第二辑). 北京: 学出版社, 2019: 47-67.]
- [185] ZHANG Shuguang, ZHAO Peilun, LI Yaqing. Study on water quality evaluation standard of muddy rivers [J]. *People's Yellow River*, 1996, 7: 29-33. [张曙光, 赵沛伦, 李雅卿. 多泥沙河流水质评价标准研究[J]. 人民黄河, 1996, 7: 29-33.]
- [186] WANG Lixin, CHEN Jingsheng, LIU Huamin. Research on deriving sediment quality criteria for heavy metals using the biological effect database approaches as Jinzhou Gulf, Bohai Sea an example [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2004(4): 467-472. [王立新, 陈静生, 刘华民. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究——以渤海锦州湾海洋沉积物为例[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2004(4): 467-472.]
- [187] ZHU Lingyan, DENG Baole, LIU Nannan, *et al.* Application of equilibrium partitioning approach to derive sediment quality criteria for heavy metals [J]. *Environmental Science Research*, 2009, 22(7): 762-767. [祝凌燕, 邓保乐, 刘楠楠, 等. 应用相平衡分配法建立污染物的沉积物质量基准[J]. 环境科学研究, 2009, 22(7): 762-767.]
- [188] ZHANG Ting, ZHONG Wenjue, ZENG Yi, *et al.* Sediment heavy metals quality criteria for fresh waters based on biological effect database approach [J]. *Acta Ecologica Sinica Sinica*, 2012, 23(9): 2587-2594. [张婷, 钟文珏, 曾毅, 等. 应用生物效应数据库法建立淡水水体沉积物重金属质量基准[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2587-2594.]
- [189] WANG Juying. Environmental quality assessment of marine sediments [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. [王菊英. 海洋沉积物的环境质量评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.]
- [190] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18668-2002 Marine Sediment Quality [S]. 2002-03-10. Beijing: China Standards Press, 2002. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 2002-03-10. 北京: 中国标准出版社, 2002.]
- [191] FAN Chengxin, ZHANG Lu. Taihu Lake: Principles of sediment pollution and remediation [M]. Beijing: Science Press, 2009. [范成新, 张路. 太湖——沉积物污染与修复原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [192] ZHAO Bin, HU Xiaozhen, WU Xianhua. Pilot study on the inhibition of phosphorus release from Dianchi Lake sediment by calcite overburden [J]. *Journal of Yuxi Normal University*, 2010, 26(8): 29-32. [赵斌, 胡小贞, 吴献花. 方解石覆盖层抑制滇池底泥磷释放的中试试验研究[J]. 玉溪师范学院学报, 2010, 26(8): 29-32.]
- [193] CHEN Chunmei. Studying on control of organic phosphorus release in sediment using *in situ* capping [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. [陈春梅. 原位覆盖技术控制底泥中有机磷释放的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.]
- [194] SHANG Jingge, HE Wei, SHAO Shiguang, *et al.* Thin layer capping to eliminate algal-caused black bloom in Eutrophic Lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(4): 599-606. [商景阁, 何伟, 邵世光, 等. 底泥覆盖对浅水湖泊藻源性湖泛的控制模拟[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 599-606.]
- [195] LIN Jianwei, HE Siqu, ZHAN Yanhui, *et al.* Assessment of sediment capping with zirconium-modified bentonite to intercept phosphorus release from sediments [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(4): 3501-3516.
- [196] KONG Ming, LIU Feifei, TAO Yue, *et al.* First attempt for *in situ* capping with Lanthanum Modified Bentonite (LMB) on the immobilization and transformation of organic phosphorus at the sediment-water interface [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 1338-19.

- ment, 2020, 741(1):140342.
- [197] YU Yanghua, CHEN Cheng, WU Yonggui, *et al.* Study on sediment coverage effect of deep valley lake under anaerobic condition[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(2): 53-57. [喻阳华, 陈程, 吴永贵, 等. 厌氧条件下深谷型湖泊底泥覆盖效果研究[J]. 环境工程, 2015, 33(2):53-57.]
- [198] ZOU Yinhong, ZHANG Runyu, CHEN Jing'an, *et al.* Research advance in the application of clay minerals to phosphorus pollution control in eutrophic water bodies and sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(6): 578-589. [邹银洪, 张润宇, 陈敬安, 等. 黏土矿物在富营养化水体和底泥磷污染控制中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 578-589.]
- [199] LIU Qunqun, SHENG Yanqing, WANG Wenjing, *et al.* Remediation and its biological responses of Cd contaminated sediments using biochar and minerals with nanoscale zero-valent iron loading[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 13650.
- [200] MA Tao, SHENG Yanqing, MENG Yingjie, *et al.* Multistage remediation of heavy metal contaminated river sediments in a mining region based on particle size[J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 83-92.
- [201] ZHAO Guoqiang, SHENG Yanqing, LI Changyu, *et al.* Restriction of enzymolysis and photolysis of organic phosphorus and pyrophosphate using synthetic zeolite with humic acid and lanthanum[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 386: 123791.
- [202] YIN Hongbin, ZHU Jincan. In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 285: 112-120.
- [203] YIN Hongbin, KONG Ming, HAN Meixiang, *et al.* Influence of sediment resuspension on the efficacy of geoengineering materials in the control of internal phosphorous loading from shallow eutrophic lakes [J]. *Environment Pollution*, 2016, 219: 568-579.
- [204] HUNG Changmao, HUANG Chinpao, LAM Sushuang, *et al.* The removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from marine sediments using persulfate over a nano-sized iron composite of magnetite and carbon black activator[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8: 104440.
- [205] BAO Xianming, CHEN Kaining, FAN Chengxin. Effects on nitrogen and phosphorus distribution in interstitial water and sediment-water nitrogen and phosphorus release with growing of submerged macrophytes[J]. *Lake Sciences*, 2006(5): 515-522. [包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006(5): 515-522.]
- [206] CHEN Kaining, CHEN Xiaofeng, CHEN Weimin, *et al.* Effects of sediments on submerged macrophytes growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1 511-1 516. [陈开宁, 陈小峰, 陈伟民, 等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1 511-1 516.]
- [207] ZHAO Guoqiang, SHENG Yanqing, WANG Chuanyuan, *et al.* *In situ* microbial remediation of crude oil-soaked marine sediments using zeolite carrier with a polymer coating[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 129(1): 172-178.
- [208] WANG Chuanyuan, HE Shijie, ZOU Yanmei, *et al.* Quantitative evaluation of *in-situ* bioremediation of compound pollution of oil and heavy metal in sediments from the Bohai Sea, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110787.
- [209] LIU Huiqing. Environmental dredging in the internal source treatment of lake pollution [J]. *Water Transport Engineering*, 2000(11): 21-27. [柳惠青. 湖泊污染内源治理中的环保疏浚[J]. 水运工程, 2000(11):21-27.]
- [210] NIAN Yuegang, FAN Chengxin, KONG Fanxiang, *et al.* Research and engineering demonstration of environmental dredging series technology [J]. *China Water Conservancy*, 2006(17): 40-42, 58. [年跃刚, 范成新, 孔繁翔, 等. 环保疏浚系列化技术与工程示范[J]. 中国水利, 2006(17):40-42, 58.]
- [211] FAN Chengxin, ZHONG Jicheng, ZHANG Lu, *et al.* Research progress and prospect of environmental dredging decision of lake sediment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1 254-1 277. [范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1 254-1 277.]
- [212] JIN Xiangcan, LI Jinjun, ZHANG Qingbo. Technical guide for environmental dredging of lakes and rivers [M]. Beijing: Science Press, 2013: 30-31, 38-41, 68, 169-176. [金相灿, 李进军, 张晴波. 湖泊河流环保疏浚工程技术指南[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 30-31, 38-41, 68, 169-176.]
- [213] ZHU Wei, MIN Fanlu, LÜ Yiyang, *et al.* Subject of "mud science and application technology" and its research progress [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2013, 34(11): 3 041-3 054. [朱伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. "泥科学与应用技术"的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3 041-3 054.]
- [214] ZHANG Chunlei, ZHU Wei, DAMU Yizhang. Application of solidification technology of polluted sediment in engineering [C]// Chinese society of Environmental Sciences. 2008 annual meeting of Chinese society of environmental sciences. Proceedings of excellent papers (Vol.I). 2008: 695-698. [张春雷, 朱伟, 大木宜章. 湖泊污染底泥的固化资源化技术在工程中的应用[C]// 中国环境科学学会. 2008中国环境科学学会学术年会优秀论文集(上卷). 2008:695-698.]
- [215] FAN Chengxin, CHEN Shuang. Determination method of ecological dredging area of polluted sediment [P]. ZL 201010287880.7, 2012-01-25. [范成新, 陈爽. 水体污染底泥生态疏浚面积的确定方法[P]. ZL 201010287880.7, 2012-01-25.]
- [216] JIANG Xia, ZHANG Qingbo, WANG Shuhang. Study on environmental dredging planning of toxic and harmful sediment and high nitrogen and phosphorus pollution in Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2014. [姜霞, 张晴波, 王书航. 太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚规划研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [217] WANG Qiujuan. Determination of nitrogen pollution and sediment dredging amount in three northern Taihu Lake areas [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2012. [王秋娟. 太湖北部三个湖区氮污染状况及其底泥疏浚量的确定[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.]

- [218] DING Tao, TIAN Yingjie, LIU Jinbao, *et al.* Calculation of the environmental dredging depth for removal of river sediments contaminated by heavy metals [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 4 295-4 302.
- [219] GUO Zhiyong, YANG Jianhua, CHEN Jiuxiao. Design of new environmental protection cutter for cutter suction dredger [J]. *China Harbor Construction*, 2014(12): 66-68.[郭志勇, 杨建华, 陈九肖. 绞吸挖泥船新型环保绞刀设计[J]. 中国港湾建设, 2014(12): 66-68.]
- [220] LI Jingui, LI Jinjun, YANG Jianhua. Precise dredging technology for polluted sediment [J]. *China Harbour Construction*, 2004(6): 11-14, 20.[李金贵, 李进军, 杨建华. 污染底泥精确疏浚技术[J]. 中国港湾建设, 2004(6): 11-14, 20.]
- [221] PU Peimin, WANG Guoxiang, HU Chunhua, *et al.* Can we control lake eutrophication by dredging? [J]. *Lake Sciences*, 2000, 12(3): 269-279.[濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 269-279.]
- [222] FAN Chengxin, ZHANG Lu, WANG Jianjun, *et al.* Processes and mechanism of effects of sludge dredging on internal source release in lakes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(17): 1 853-1 859.[范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理研究[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1 523-1 528.]
- [223] LIU Cheng, DU Yiheng, YIN Hongbin, *et al.* Exchanges of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface influenced by the external suspended particulate matter and the residual matter after dredging [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 207-216.
- [224] ZHONG Jicheng, FAN Chengxin, ZHANG Lu, *et al.* Significance of dredging on sediment denitrification in Meiliang Bay, China: A year long simulation study [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(1): 68-75.
- [225] LIU Cheng, ZHONG Jicheng, WANG Jianjun, *et al.* Fifteen-year study of environmental dredging effect on variation of nitrogen and phosphorus exchange across the sediment-water interface of an urban lake [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 639-648.
- [226] ZHU Wei. Excerpt from the comprehensive discussion of the Special Committee on dredging and mud treatment/utilization of Chinese Water Conservancy Society [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(4): 93-94.[朱伟. 中国水利学会疏浚与泥处理利用专委会综合讨论摘登[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 93-94.]
- [227] ZHANG Xuanqi, JIANG Bo. Experimental study on consolidation treatment of lake sediment in Dongqian Lake Dredging and reclamation Section [J]. *People's Pearl River*, 2007(4): 66-68.[张选岐, 江波. 东钱湖疏浚吹填试验段湖泊底泥固结处理试验研究[J]. 人民珠江, 2007(4): 66-68.]
- [228] HUANG Yinghao, DONG Chan. Review on principle and classification of sludge treatment technology [J]. *People's Yellow River*, 2014, 36(7): 91-94.[黄英豪, 董婵. 淤泥处理技术原理及分类综述[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 91-94.]
- [229] WU Silin, ZHU Wei, LIU Jiming, *et al.* Change laws of mud property and problems in typical environmental dredging treatment projects [J]. *Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2 290-2 296.[吴思麟, 朱伟, 刘既明, 等. 环保疏浚泥处理工程泥性质变化规律及问题分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2 290-2 296.]
- [230] WU Silin, ZHU Wei, MIN Fanlu, *et al.* Clogging mechanism and effect of cake permeability in soil-water separation using vacuum filtration [J]. *Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8): 1 530-1 537.[吴思麟, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥浆真空抽滤泥水分离中堵塞机理及规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1 530-1 537.]
- [231] BAO Jianping, ZHU Wei, WANG Shuncai, *et al.* Stabilization effect of heavy metals in solidified sludge [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(1): 24-28.[包建平, 朱伟, 汪顺才, 等. 固化对淤泥中重金属的稳定化效果[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 24-28.]
- [232] FAN Chengxin, WANG Jiaquan, YANG Xiangdong, *et al.* Background effect and control of phosphorus in Chaohu Lake [M]. Beijing: Environmental Science Press, 2012: 190-220.[范成新, 汪家权, 羊向东, 等. 巢湖磷本底影响及其控制[M]. 北京: 环境科学出版社, 2012: 190-220.]
- [233] FANG Hongwei, LI Xiaocui, HUANG Lei, *et al.* Ceramization of contaminated sediment backfill technology and its effects of sediment remediation [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 1-6.[方红卫, 李晓翠, 黄磊, 等. 受污染底泥陶粒化回填技术及其底泥修复效果[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 1-6.]
- [234] WU Silin, ZHU Wei, LÜ Yiyan, *et al.* Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island: Case study of the artificial island of Dalian Bay, China [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 664-671.
- [235] CHEN Fahu, FU Bojie, XIA Jun, *et al.* Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(11): 1 665-1 701.[陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1 659-1 696.]
- [236] ZHANG Xiaodong, LIU Zhifei, ZHANG Yanwei, *et al.* Research progress on source-to-sink transport processes of marine microplastics [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(9): 936-949.[张晓栋, 刘志飞, 张艳伟, 等. 海洋微塑料源汇搬运过程的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 936-949.]
- [237] JIANG Helong, WANG Changhui, BAI Leilei, *et al.* Advances and prospects in lake environment science and engineering: A review [J]. *Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1 278-1 296.[江和龙, 王昌辉, 白雷雷, 等. 湖泊环境科学与工程技术研究进展探讨[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1 278-1 296.]
- [238] ZHANG Min, WANG Xiangchun, YANG Long, *et al.* Research on progress in combined remediation technologies of heavy metal polluted sediment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(24): 5 098.

Research Progress and Prospect of Sediment Environment and Pollution Control in China in Recent 20 Years*

FAN Chengxin¹, LIU Min², WANG Shengrui³, FANG Hongwei⁴,
XIA Xinghui⁵, CAO Wenzhi⁶, DING Shiming¹, HOU Lijun⁷,
WANG Peifang⁸, CHEN Jing'an⁹, YOU Jing¹⁰,
WANG Juying¹¹, SHENG Yanqing¹², ZHU Wei¹³

(1. State Key Laboratory of Lake Sciences and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Geographical Information Sciences, Ministry of Education, College of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200240, China; 3. Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory for Water Security, Research Center of Water Science, Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai Guangdong 519087, China; 4. State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. School of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 7. College of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200240, China; 8. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 9. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 10. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 11. State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 266003, China; 12. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003, China; 13. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Inland water bodies (lakes, reservoirs, swamps, rivers) and estuarine oceans are widely and continuously distributed with sediments, which are affected by natural and human activities in the process of their formation, and have environmental significance and characteristics related to pollutants. There are great regional differences in China, and the environmental problems are more prominent. After decades of research on sediment environment and pollution control, the relevant achievements in China continue to emerge. This paper first introduces some international landmark studies on sediment environment and reviews the development of sediment research in China in the past 70 years. Then, the main research progress of China in the research fields of sediment environment and pollution control in recent 20 years are systematically summarized, which are the role and effect of sediment in water environment, environmental behavior and influencing factors of pollutants at sediment-water interface, ecological risk and quality criteria of sediments, *in-situ* remediation of contaminated sediments, environmental dredging and *ex-situ* disposal as well utilization of contaminated sediments. And the relationship and difference of some research results are reviewed. At the end of the paper, the existing problems of sediment environmental research in China are analyzed, and several scientific and technical problems that need to be studied urgently and deeply, such as interdisciplinary, composite pollution, emerging/non-traditional pollutants, quality criteria, and governance technology innovation, are put forward. The solutions and approaches are proposed, and the prospects are also given.

Key words: Sediment; Environmental effects; Ecological risk; Quality criteria; Pollution control and remediation; Treatment and utilization; China.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China Key Project "Environmental process, coupling mechanism and spatial simulation of typical POPs in Yangtze River Delta urban agglomeration" (Grant No. 41730646); Yunnan Joint Fund Project "Characteristics of phosphorus migration and transformation at Erhai Lake interface system and influence mechanism of algal bloom" (Grant No. U1902207); The Key Program of National Natural Science Foundation of China "Study on interaction of biogenic matter transport and microbial action mechanism under runoff regulation in Yalung Zangbo River" (Grant No. 91647206) and "Study on the water and sediment variation and the riverbed evolution under runoff regulation in Yalung Zangbo River" (Grant No. 91647210).

First author: FAN Chengxin (1954-), male, Nanjing City, Jiangsu Province, Professor. Research areas include lake and river sediment pollution and its remediation. **E-mail:** cxfan@niglas.ac.cn