

· 专题:双清论坛“全球海洋治理与合作的关键科学问题” ·

面向可持续发展方案的三角洲研究趋势与展望^{*}

张卫国 侯立军 彭忠 袁琳 李秀珍^{**} 何青^{**}

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200241

[摘要] 三角洲是海岸带陆海相互作用的核心地带,是全球生态环境保护和沿海社会经济发展的战略要地。在高强度人类活动和气候变化影响下,三角洲的动力、地貌、环境、生态过程发生了剧烈变化,三角洲安全和健康问题突出,严重制约了社会经济的可持续发展,是当前全球面临的最紧迫挑战之一。本文分析了全球三角洲安全、健康和发展面临的挑战,回顾了国内外科技研究趋势,阐述了三角洲可持续发展研究的关键科技问题,包括三角洲自然—社会耦合系统演变机制、智能观测与模拟决策技术和综合管理技术。论文最后围绕我国领衔的联合国“海洋十年”“大河三角洲计划”(2021—2030)的有效实施,建议加强全球合作,并就未来开展的研究主题进行了阐述,以期为实现联合国可持续发展议程目标提供中国方案,为推进“一带一路”、人类命运共同体建设做出积极贡献。

[关键词] 三角洲;可持续发展;自然—社会耦合系统;观测与模拟;数字孪生;综合管理

三角洲是河流入海泥沙堆积形成的地貌产物,是海岸的重要类型之一,为人类社会提供了土地、淡水、航运、渔业等自然资源^[1]。尽管三角洲的陆上部分占地球陆地面积不到1%,却居住了全球约5%的人口^[2],在沿海社会经济可持续发展中具有极其重要的地位^[1]。世界大河由于其巨大的流域面积以及高径流量和输沙量,通常发育大型三角洲。据统计全球陆地面积超过1 000 km²的三角洲有89个,占三角洲总陆地面积的84.3%,集中了全球三角洲人口的89.3%^[3],而面积最大的12个三角洲居住的人口就占全球的3%^[4],因此大河三角洲是全球研



李秀珍 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室研究员,教育部“新世纪优秀人才计划”获得者。主要从事滨海湿地生态过程与功能研究。主持科学技术部国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等。担任中国生态学会副理事长,Future Earth Coasts 执委会成员,联合国海洋十年“大河三角洲计划”联系人,联合国政府间气候变化专门委员会报告(第6版)评审人;Anthropocene 副主编等。



何青 华东师范大学教授,河口海岸学国家重点实验室主任,联合国海洋十年“大河三角洲计划”首席科学家,教育部国际联合实验室和上海市“一带一路”联合实验室负责人。长期从事河口海岸动力—沉积—地貌的应用基础研究,专长于河口三角洲水沙输运、河床演变及其工程应用。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点和重大国际合作等科技项目。兼任中国海洋学会及海洋湖沼学会副理事长,海岸河口分会会长等。获得上海市科技进步奖二等奖、上海市育才奖和三八红旗手称号。



张卫国 华东师范大学河口海岸科学重点实验室研究员,入选上海市青年科技启明星和教育部新世纪优秀人才计划。研究方向包括三角洲环境演变和可持续发展、环境磁学等。主持科学技术部基础性工作专项重点项目、国家重点研发计划政府间国际合作重点专项、上海市科学技术委员会重大项目等。现任Future Earth Coasts 国际计划学术委员会委员,Estuarine, Coastal and Shelf Science 副主编等。获得中国地理学会青年地理科技奖、教育部自然科学奖一等奖和上海市自然科学奖一等奖等奖励。

收稿日期:2024-07-10;修回日期:2024-09-08

^{*} 本文根据国家自然科学基金委员会第366期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者,Email: xzli@sklec.ecnu.edu.cn;qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

本文受到国家重点研发计划国际合作专项(2017YFE0107400, 2022YFE0136700, 2023YFE0113100)、上海市科学技术委员会项目(23590780200, 21230750600)的资助。

究的重点所在。我国长江、黄河和珠江三条世界大河形成的三角洲,是长三角区域一体化发展、黄河流域生态保护与高质量发展和粤港澳大湾区建设等国家战略的自然支撑系统,是我国实施海洋强国战略的关键支撑带,也是我国海岸带生态屏障建设的核心区域。

在高强度人类活动和气候变化影响下,流域和海洋驱动条件发生了快速、剧烈变化,三角洲的地貌、环境、生态和社会经济过程发生了显著变化,三角洲安全和健康问题突出,严重制约了社会经济的可持续发展,其中亚洲、非洲的很多大河三角洲因为人口密度高、经济发展水平低,问题尤为突出^[4]。为此,国内外诸多大科学计划都将海岸带可持续发展列为前沿研究领域。20 世纪 80 年代,国际科学界发起“国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)”,其子计划之一即为“海岸带陆海相互作用(Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ)”,河口三角洲与高风险岛屿、北极海岸、海岸带城市化被列为 LOICZ 计划的四大研究热点问题^[5]。2015 年,在新成立的“未来地球”计划框架下,LOICZ 更名为“未来地球海岸”(Future Earth Coasts, FEC),三角洲仍是其研究的重点区域。《中国海洋科学 2035 发展战略》报告中,健康海洋与海岸带可持续发展被列为六大重点研究方向之一^[6]。2021 年,联合国“海洋科学促进可持续发展十年”(简称“海洋十年”)计划正式启动,首批批准的最高层级行动方案(Programme)即包括河口海岸学国家重点实验室发起和领衔的“大河三角洲:为可持续问题寻求解决方案”大计划(简称“大河三角洲计划, Mega-Delta Programme”),彰显了三角洲研究的全球重要性和紧迫性。国家自然科学基金委员会、科学与技术部等资助的重大重点研究项目,也将三角洲沉积动力过程与地貌演变、流域水沙通量变化对三角洲及邻近海域生态系统影响、气候变化影响下海岸带演变趋势与脆弱性评估等作为重点内容加以研究^[7]。

当前,为可持续发展问题寻求解决方案是全球面临的最紧迫挑战。三角洲作为我国“一带一路”倡议中“海上丝绸之路”的重要节点,保障三角洲可持续发展,是我国人类命运共同体建设所需直面回答的战略议题。为此,本文在梳理了全球三角洲面临的可持续发展挑战基础上,凝练了国家需求背后的关键科学问题,结合我国领衔的联合国“海洋十年”

“大河三角洲计划”的有效实施,对开展三角洲可持续发展研究提出了建议。

1 三角洲可持续发展面临的全球挑战

三角洲对人类生存和发展而言,机遇与挑战并存。但自 21 世纪中叶以来,地球环境的快速变化,使得三角洲的安全、健康和发展形势日趋严峻,无论是发达还是发展中国家,都面临着三角洲的宜居性和可持续发展问题挑战。

1.1 资源安全与灾害问题

全球三角洲最普遍的安全问题是入海河流泥沙剧减和海平面加速上升带来的侵蚀、淹没风险。受气候变化、流域水土保持和大型水利工程建设等自然因素和人类活动影响,1950 年以来河流入海泥沙显著下降,全球平均下降幅度为 50%^[8],2023 年我国长江、黄河、珠江的减沙幅度较多年平均均高达 87%以上^[9]。全球变暖背景下海平面加速上升,1993—2002 年期间,全球平均海平面上升速率为 2.13 mm/yr,2014—2023 年期间这一数值增加了 1 倍多,达到 4.77 mm/yr^[10]。我国 1980—2023 年沿海海平面上升速率为 3.5 mm/yr,这一数值在 1993—2023 年期间上升为 4.0 mm/yr,高于全球同时段平均值 3.4 mm/yr^[11]。受自然和人为因素影响,三角洲区域地面沉降严重,与海平面上升速率相当甚至更高,如长江三角洲的上海尽管近年来地面沉降得到有效控制,沿海郊区沉降速率平均可达 6 mm/yr^[12],密西西比河三角洲则可以达到 9 mm/yr^[13]。在泥沙供应减少、海平面上升和地面沉降等因素共同作用下,世界上许多三角洲面临严重的侵蚀和淹没风险^[14]。在上述因素综合影响下,美国密西西比河三角洲 1930 年以来湿地面积已损失约 25%(约 5 000 km²)^[15]。长江入海泥沙由 20 世纪 60 年代的超过 500 Mt/yr 下降为近十年的 106 Mt/yr,2023 年的最低值仅为 44.5 Mt/yr,不到历史高值的 1/10^[9]。目前,长江三角洲潮滩总体淤涨速率趋缓,而水下三角洲前缘区域强烈侵蚀^[16]。三角洲的侵蚀和淹没,直接威胁人员、基础设施、粮食等安全^[14, 17]。此外,三角洲的供沙不足和海洋动力增强现象,还会引发水下三角洲的滑坡等问题,威胁途经三角洲的油气管道、电缆、通讯网络等基础设施安全^[18]。

由于三角洲地势低平,极易受到流域洪水、局地暴雨、天文大潮、海洋风暴潮等引起的复合洪涝灾害

的威胁,而三角洲侵蚀和相对海平面上升更是加剧了洪涝灾害风险。如2005年“卡特里娜”飓风重创密西西比河三角洲上的新奥尔良市,造成1800人死亡,经济损失超过1350亿美元^[19]。2008年,热带气旋“纳尔吉斯”横扫缅甸伊洛瓦底江三角洲,狂风、暴雨和风暴潮导致超过13万人死亡或失踪^[20]。

与洪涝威胁对应的是盐水入侵、干旱和淡水资源短缺问题。2022年,长江流域发生百年未遇的夏季特大干旱^[21],叠加台风事件的影响,长江河口夏季发生极为罕见的盐水入侵,具有强度大、时间长的特点,给特大城市上海的河口水库供水造成了严重的压力,影响了近1500万人的淡水安全保障^[22]。

1.2 生态环境健康问题

流域以及三角洲密集的人类活动,如农业施肥、生活和工业污水排放等,使得近百年河流入海污染物通量显著增加,导致三角洲区域的水体、沉积物和土壤污染,威胁生态系统和人类生命健康。以长江口为例,自20世纪80年代以来,河口营养盐浓度显著增加,与1960年相比,2016年溶解无机氮、磷的入海通量分别增加了6.4倍和4.2倍^[23],尽管近10年这一趋势由于流域环境保护措施的实施得到扭转^[24],但长江口邻近水域的水质仍是我国近海水环境质量最差区域之一,导致了河口邻近海域高度富营养化和生态系统的亚健康^[25]。尼罗河三角洲水质恶化形势严峻,污染水体应用于农业灌溉,使得沉积物、土壤重金属严重超标,威胁着超过5000万人的生命健康^[26]。三角洲地下水开采引起的砷污染及其生命健康问题,在恒河、湄公河等三角洲都引起了广泛关注^[27]。

沿海经济发展驱动滨海湿地转化为农业、工业、交通用地,导致海岸防护、净化水质等生态服务功能下降。外来物种的入侵,致使本地物种分布面积下降,如长江三角洲自20世纪90年代末引进的互花米草,已超越本地物种芦苇和海三棱藨草成为滨海湿地的优势植物^[28]。除了围垦、外来物种入侵等因素,气候变化和人类活动导致的河流入海水沙变化也会影响三角洲湿地,如巴基斯坦印度河三角洲由于上游水库建设和农业灌溉,河流入海流量下降,1861年的16个入海河道至2000年仅剩1个,导致严重的海岸侵蚀和盐水入侵,威胁红树林生态系统、渔业和当地居民生计^[29, 30]。

1.3 社会经济发展问题

从全球而言,亚洲、非洲是大河三角洲密集分布

的区域,人口稠密,生产活动以农业、渔业等为主,但侵蚀、洪涝、干旱等灾害频发,是经济发展水平相对落后的区域,全球受热带气旋诱发洪涝灾害的三角洲人口有92%位于发展中或最不发达国家,如恒河—布拉马普特拉河—梅加纳河三角洲等^[2]。即使我国经济发展水平居于前列的长江和珠江三角洲,区域内的经济发展差异仍极为显著,因此近年来交通基础设施建设投入持续增加,以加强区域经济均衡发展。位于美国的密西西比河三角洲,由于风暴灾害频发和土地侵蚀消失,人口呈现从三角洲向内陆转移的趋势^[31]。

目前,经济欠发达的三角洲区域,道路、桥梁、港口码头、清洁能源、节水灌溉、污水收集和处理、海岸堤防等基础设施匮乏,进一步限制了社会经济发展。同时,由于低收入居民的受教育机会和文化程度较低,也对环境保护和脱贫致富产生影响。尽管在有限的资金投入情况下,是优先投资基础设施还是教育没有定论,但不少研究显示了基础设施投入对经济增长和减贫的积极作用^[32]。

2 三角洲研究的前沿与趋势

三角洲的安全、健康和发展问题的产生,与我们对三角洲复杂过程和机制的认识不足,观测和模拟预测能力欠缺,以及人类采取的应对方案欠佳有关。近期围绕为三角洲可持续发展寻找解决方案的需求,三角洲研究前沿呈现如下特点:

2.1 以地球系统科学理念为指导,强化自然和人文科学的交叉融合

三角洲作为河流入海泥沙堆积产生的地貌,是近8000年以来陆海相互作用的产物^[33],有着复杂的气候—水文—泥沙—地貌—地球化学—生物过程及其相互作用,影响着水、泥沙、污染物在流域—三角洲—近海之间的迁移和分配。受气候、海平面变化等影响,上述过程存在着季节~千年等不同时间尺度的变化,极端天气气候事件也会加剧侵蚀、洪涝、盐水入侵等灾害以及环境质量的变化。人类活动如流域筑坝、排污、河口航道开挖、三角洲农业灌溉等,会对上述过程产生影响,并进而影响到社会经济可持续发展。三角洲作为一个典型的自然过程与社会经济过程耦合系统,二者之间存在复杂的“作用—响应—反馈”关系^[31]。在当前人类活动加剧和气候变化加速的背景下,三角洲可持续发展研究呈现为以地球系统科学理念为指引,基于陆海统筹的

视角,开展流域—三角洲—近海连续体的物质输移通量及其水文地貌、环境、生态和社会经济效应整合研究,从历史过程分析发展到未来预测及应对方案构建。LOICZ 第一期(1993—2002)着重研究海岸带系统演变的自然过程,第二期(2003—2014)是 IGBP 与“全球环境变化的人文因素(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)”联合支持的计划,更加重视海岸带系统演变的人文因素,涉及到自然—社会耦合过程、海岸带管理等^[5]。LOICZ 二期乃至目前的 FEC 计划,都强调要加强多学科交叉、跨部门合作,开展以解决问题为导向的科学研究,以支撑海岸带的可持续发展。2022 年,美国发布的“美国国家科学基金会的下一代地球系统科学”报告中,强调开展自然科学、社会科学、信息科学等综合交叉研究,以解决复杂的人地耦合关系问题^[34]。但目前对三角洲复合系统的演变过程和转型机理、资源—环境—生态关联机制、综合承载能力与韧性调控、海岸带综合管理决策优化的认识不足,亟待开展系统的理论和方法研究。

2.2 高分辨率的智能化观测、预测与决策技术有待突破的瓶颈

应对可持续发展问题,需要解决观测、预测与决策技术的挑战^[35]。国内外普遍重视观测,目前针对全球共性挑战问题开展的全球尺度观测有全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, GOOS)、全球综合地球观测系统(Global Earth Observation System of Systems, GEOSS)等^[36]。但三角洲是高度异质性和变化快速的复杂系统,针对三角洲区域的综合观测网络的时空分辨率有待提升,需要发展局地—区域—全球多尺度融合的立体综合观测系统。基于数据、过程和机制的理解,进而建立模型对未来变化情景下的三角洲复合系统做出趋势判断,是当前地球系统科学的挑战之一。三角洲水文过程与地貌演变本身是一个复杂的过程,为此开展了大量三角洲水动力与沉积地貌模型研究^[37, 38]。在此基础上,进一步耦合生物地球化学过程,可以揭示生态系统物质循环规律^[39],但这一方面的工作仍有待深入,为此联合国海洋十年支持了“观测和预测全球沿海海洋”(CoastPredict)大科学计划,这是 GOOS 参与“海洋十年”的三大计划之一^[40]。总体而言,现有预测模型中很少考虑气候变化与人类社会经济、管理活动耦合下的三角洲系统演变过程,缺少流域—三角洲—近海复合系统模型。借助复合系统模型进

行多目标、多情景分析和管理方案决策,已成为三角洲管理的重要支撑。认识到数字孪生平台这一智能工具的重要性,2021 年,联合国“海洋十年”启动了“海洋数字孪生(Digital Twin of the Ocean)”大科学计划^[41],但三角洲数字孪生领域的研究整体来说仍然处于起跑状态。

2.3 基于自然的流域—三角洲—近海综合管理技术愈益受到重视

无论是三角洲区域的资源利用、环境保护还是生态修复,都涉及人类的干预措施。由于三角洲具有多种生态系统服务功能,且受到流域和海洋的交互作用,因此基于自然的综合管理理念愈益受到重视。2005 年,在经历了“卡特里娜”超级飓风对密西西比河三角洲带来的严重打击后,美国路易斯安那州颁布了“可持续海岸综合规划”,决定在未来 50 年投资 500 亿美金保护和恢复密西西比三角洲生态系统,提高沿海社区的可持续发展能力^[42]。欧盟国家在基于生态系统的海岸带防灾减灾、资源利用和生态保护等理念和技术方面走在世界前列,2011 年,基于“与自然共建”(Building with Nature)的理念,荷兰开展了“沙引擎”(Sand Motor)护岸工程实践,通过风力和沿岸流等自然力量进行海岸人工补沙,以减少对环境的人为干扰,维护海岸系统安全,目前已取得显著成效^[43]。国内外在三角洲侵蚀防护、近海富营养化的监测与治理、滩涂湿地生态修复、海岸带脆弱性评估、港口航运和淡水资源高效利用等方面取得了显著进展^[6]。但是,目前三角洲邻近海域富营养化污染防治的协同不够、效率不高,新污染物的生物地球化学行为及生态效应不明确;基于陆海统筹的环境健康、生态安全、防护能力于一体的三角洲滨海湿地多功能提升技术体系缺乏;三角洲土地、水、航运等资源优化配置和可持续高效利用技术不完善。因此,开展基于生态系统的三角洲综合治理保护体系和陆海统筹的管控对策研究,是保障三角洲安全和高质量发展的必然需求。

3 三角洲研究的关键科技问题

针对上述国家需求以及领域发展态势,三角洲研究亟须从理论上认识快速全球变化下的三角洲发育和演变的规律,研发观测、模拟和决策关键技术,开展未来全球变化情景下的三角洲演变趋势预测,进而提出防灾减灾、资源利用、环境保护和经济发展相互协调的可持续发展路径和方案,这也是当前地

球系统科学着力解决的重大科学前沿问题^[33, 44]。

3.1 三角洲自然—人类社会复合系统演变过程与机制

揭示全球变化下流域—河口—近海物质输移与转化规律,阐明三角洲水沙—地貌—环境—生态—社会经济过程的空间格局与互馈特征,厘清三角洲自然—人类社会复合系统的演变过程,甄别自然和人类活动对三角洲系统演变的影响,揭示资源—灾害—环境—生态关联机制和主控因素,量化全球变化影响下三角洲系统稳态转换阈值和承载力,发展基于陆海统筹的三角洲资源优化配置理论。

3.2 三角洲智能观测、模拟与决策关键技术

建立高时空分辨率的三角洲多要素立体智能观测体系,提出多源异构数据聚融和质量控制方法,研制三角洲多源异构大数据管理系统,研发流域—三角洲—近海多过程与大数据融合驱动模型,提升三角洲中长期地貌演变、植被—水沙—堤防相互作用、生境演变与生物演替、自然过程和社会经济耦合等关键模型技术,研发三角洲实时监测—系统预测—智能决策的数字孪生技术体系。

3.3 三角洲资源—灾害—环境—发展多目标协同的综合管理技术

构建三角洲灾害、健康和可持续发展评估指标体系,评估三角洲资源安全、灾害风险、生态环境健康和社会经济发展状况及其时空变化格局,研发基于陆海统筹的水沙调控、污染管控、滨海湿地修复、灾害防治及水土航运等资源高效利用为一体的综合管理技术体系,研发多目标协同和承载力提升的决策方案优化方法。

4 建议

三角洲已成为我国社会发展的重要支撑,也是“海上丝绸之路”的重要节点。然而,我们对三角洲复合系统如何响应全球变化的认知,还不能满足三角洲高质量发展的需要。提出我国及全球大河三角洲可持续发展中所面临问题的解决途径,可为落实国家的海洋经济发展、全球海洋治理、人类命运共同体建设战略做出积极贡献。因此,开展三角洲可持续发展研究科学意义重大。

全球性的复杂科学问题,需要国内外多个机构的合作加以开展,特别是全球三角洲系统具有区域性和多样性的特点,通过全球合作研究,可以深化对三角洲系统复杂性的科学认知。国际上的发达国家

向来重视对三角洲研究的长期、持续支持,其布局不仅是国内,还着眼于全球,以保持其全球科技的影响力。美国国家科学基金会2020年设立了“海岸线与人(Coastlines and People, CoPe)”计划,并将其视作美国对联合国“海洋十年”计划的贡献^[45]。该计划着眼于美国海岸带自然和人文过程的综合研究,支持不同类型海岸带区域的研究机构网络建设,其中密西西比河三角洲所在的墨西哥湾区是重点支持的海岸带区域之一。荷兰研究理事会(Netherlands Organization for Scientific Research, NWO)针对三角洲可持续发展问题,2023年资助了为期10年的“ Δ -ENIGMA(三角洲难题)”项目,以加强观测和模拟的基础设施能力建设^[46]。英国研究与创新署针对发展中国家的可持续发展问题,设立了全球挑战研究基金(Global Challenge Research Fund, GCRF, 2016—2024),其目标定位是成为全球可持续发展的科技领导者,为了应对全球最具挑战性问题,2019年启动了12个全球跨学科研究中心建设项目,其中之一是Living Deltas Hub(活力三角洲中心),针对的三角洲是亚洲的红河、湄公河和恒河三角洲^[47]。

我国是联合国“海洋十年”“大河三角洲:为可持续问题提供解决方案”大科学计划的领导者,该项目旨在把不同类型、不同气候带、不同社会经济发展水平的三角洲联系在一起,为相关的研究人员、工程技术人员、决策者和公众提供一个合作和交流平台,共同应对全球变化带来的问题和挑战,其成功实施将有助于大幅提升我国的科技影响力,为全球海岸带的人类命运共同体建设做出积极贡献。围绕为全球大河三角洲可持续发展寻找解决方案的目标,建议在如下领域进行布局。

4.1 全球三角洲基础信息平台建设

从多时空尺度气候—水文—地貌—生物地球化学过程与社会经济、管理活动耦合的角度,制定三角洲复合系统的数据采集标准,研发高时空分辨率的数据获取和解译方法,以典型研究区为对象,集成多时空尺度的气候、水文、泥沙、污染物、植被、地形以及人口、GDP、产业结构等数据,构建全球典型三角洲基础信息平台,厘清世界大河三角洲的自然和社会经济演变历史和现状,列出制约三角洲可持续发展的资源、环境与灾害问题清单。

4.2 三角洲复合系统演变机制分析与趋势预测模型研发

阐明不同时空尺度三角洲水沙动力格局、沉积

地貌过程、生物地球化学循环、滨海湿地生态系统演变规律,揭示海岸带资源供给—灾害风险—环境健康—生态安全的动态变化过程和相互作用,剖析全球变化下三角洲自然过程与社会经济过程的互馈机制,深度融合人工智能技术,研发过程和数据融合的三角洲自然与社会经济耦合模型,预测三角洲复合系统的演化趋势,揭示三角洲转型早期预警信号和阈值。

4.3 三角洲可持续发展智能决策平台与解决方案研发

研发三角洲实时监测—系统预测—智能决策的数字孪生技术体系,针对世界大河三角洲面临的海洋平面上升、海岸侵蚀、洪涝灾害、盐水入侵、水土污染、生态系统退化、资源可持续利用等共性问题及区域特点,构建未来数十年—百年气候变化以及社会经济发展情景,基于三角洲系统演变模型开展多目标决策方案筛选,给出三角洲生态环境保护与资源利用协同的综合管理方案。

参 考 文 献

- [1] 陈吉余,沈焕庭,恽才兴,等. 长江河口动力过程和地貌演变. 上海:上海科学技术出版社,1988.
- [2] Edmonds DA, Caldwell RL, Brondizio ES, et al. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4741.
- [3] Caldwell RL, Edmonds DA, Baumgardner S, et al. A global delta dataset and the environmental variables that predict delta formation on marine coastlines. *Earth Surface Dynamics*, 2019, 7(3): 773—787.
- [4] Haq B, Milliman J. Perilous future for river deltas. *GSA Today*, 2023, 33(10): 4—12.
- [5] Ramesh R, Chen Z, Cummins V, et al. Land-Ocean interactions in the coastal zone: Past, present & future. *Anthropocene*, 2015, 12: 85—98.
- [6] “中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”项目组. 中国海洋科学 2035 发展战略. 北京:科学出版社,2023.
- [7] 吴立新,荆钊,陈显尧,等. 我国海洋科学发展现状与未来展望. *地学前缘*, 2022, 29(5): 1—12.
- [8] Syvitski J, Ángel JR, Saito Y, et al. Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3: 179—196.
- [9] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报—2023. 北京:中国水利水电出版社,2024.
- [10] World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2023. [2024-07-09]. <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789263113474/read>.
- [11] 自然资源部. 2023 年中国海平面公报. (2024-04-15)/[2024-07-06]. https://gi.mnr.gov.cn/202404/t20240429_2844012.html.
- [12] Wang R, Yang MS, Yang TL, et al. Decomposing and mapping different scales of land subsidence over Shanghai with X-and C-Band SAR data stacks. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 478—502.
- [13] Nienhuis JH, Törnqvist TE, Jankowski KL, et al. A new subsidence map for coastal Louisiana. *GSA Today*, 2017: 60—61.
- [14] Giosan L, Syvitski J, Constantinescu S, et al. Climate change: protect the world's deltas. *Nature*, 2014, 516 (7529): 31—33.
- [15] Couvillion BR, Beck H, Schoolmaster D, et al. Land area change in coastal Louisiana (1932 to 2016): US geological survey scientific investigations Map 3381, p. 16 Pamphlet. Louisiana: US Geological Survey, 2017.
- [16] Guo LC, Zhu CY, Xie WM, et al. Changjiang Delta in the Anthropocene: Multi-scale hydro-morphodynamics and management challenges. *Earth-Science Reviews*, 2021, 223: 103850.
- [17] Zhang WG, Xu YJ, Guo LC, et al. Comparing the Yangtze and Mississippi River Deltas in the light of coupled natural-human dynamics: Lessons learned and implications for management. *Geomorphology*, 2022, 399: 108075.
- [18] 李海东,杨作升,王厚杰,等. 现代黄河水下三角洲地质灾害现象的空间分布. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 37—43.
- [19] Dixon TH. Ten years after Katrina: What have we learned?. (2015-08-27)/[2024-07-06]. <https://eos.org/opinions/ten-years-after-katrina-what-have-we-learned>.
- [20] Fritz HM, Blount CD, Thwin S, et al. Cyclone Nargis storm surge in Myanmar. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 448—449.
- [21] 官学文,曾明. 2022 年长江流域枯水特征分析与启示. *人民长江*, 2022, 53(12): 1—5, 36.
- [22] 自然资源部. 2022 年中国海平面公报. (2023-04-05)/[2024-07-06]. https://gi.mnr.gov.cn/202304/t20230412_2781114.html.
- [23] Song Y, Tong M, Li MT, et al. The biogenic elements retention in reservoirs of the Yangtze River basin and effect on the nutrient flux into the sea. *Global and Planetary Change*, 2023, 230: 104280.

- [24] Wang Y, Gao L, Ming Y, et al. Recent declines in nutrient concentrations and fluxes in the lower Changjiang River. *Estuaries and Coasts*, 2023; 1—19.
- [25] 生态环境部. 2023年中国海洋生态环境状况公报. (2024-06-05)/[2024-07-06]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202406/P020240604551536165161.pdf>.
- [26] Abotalib AZ, Abdelhady AA, Heggy E, et al. Irreversible and large-scale heavy metal pollution arising from increased damming and untreated water reuse in the Nile Delta. *Earth's Future*, 2023, 11(3): e2022EF002987.
- [27] Fendorf S, Michael HA, van Geen A. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and Southeast Asia. *Science*, 2010, 328(5982): 1123—1127.
- [28] Wu WT, Lin ZB, Chen CP, et al. Tracking the dynamics of tidal wetlands with time-series satellite images in the Yangtze River Estuary, China. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2330684.
- [29] Syvitski JPM, Kettner AJ, Overeem I, et al. Anthropocene metamorphosis of the Indus Delta and lower floodplain. *Anthropocene*, 2013, 3: 24—35.
- [30] Aeman H, Shu H, Abbas S, et al. Sinking delta: Quantifying the impacts of saltwater intrusion in the Indus Delta of Pakistan. *Science of the Total Environment*, 2023, 880: 163356.
- [31] Lam N, Xu Y, Liu KB, et al. Understanding the Mississippi river delta as a coupled natural-human system: research methods, challenges, and prospects. *Water*, 2018, 10(8): 1054.
- [32] Timilsina G, Hochman G, Song Z. Infrastructure, economic growth, and poverty: A review. Washington, DC: World Bank, 2020.
- [33] Stanley DJ, Warne AG. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science*, 1994, 265(5169): 228—231. [PubMed]
- [34] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). Next Generation Earth Systems Science at the National Science Foundation. Washington, D. C. National Academies Press, 2022
- [35] Reid W, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: grand challenges. *Science*, 2010, 330: 916—917.
- [36] 麻常雷, 高艳波. 多系统集成的全球地球观测系统与全球海洋观测系统. *海洋技术*, 2006, 25(3): 41—44, 50.
- [37] Guo LC, van der Wegen M, Roelvink D, et al. Long-term, process-based morphodynamic modeling of a fluvio-deltaic system, part I: The role of river discharge. *Continental Shelf Research*, 2015, 109: 95—111.
- [38] Edmonds DA, Chadwick AJ, Lamb MP, et al. Morphodynamic modeling of river-dominated deltas: a review and future perspectives. *Treatise on Geomorphology*. Amsterdam; Elsevier, 2022: 110—140.
- [39] Ge JZ, Zhang JS, Chen CS, et al. Impacts of fluvial flood on physical and biogeochemical environments in estuary-shelf continuum in the East China Sea. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126441.
- [40] GOOS. The global ocean observing system at the heart of the decade of ocean science for sustainable development 2021-2030. [2024-07-06]. <https://goosocean.org/what-we-do/goos-at-the-heart-of-the-ocean-decade/>.
- [41] DITTO. Digital twins of the ocean-DITTO decade programme. (2021)/[2024-07-06]. <https://ditto-oceandecade.org/>.
- [42] Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana. Louisiana's comprehensive master plan for a sustainable coast. Baton Rouge: Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana, 2017.
- [43] Luijendijk A, Oudenhoven AV. The Sand Motor: a nature-based response to climate change. Findings and reflections of the interdisciplinary research program Naturecoast. Delft: Delft University Publishers, 2019
- [44] 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的未来、现在与过去——地球科学发展战略概要. *科学通报*, 2021, 66(35): 4485—4490.
- [45] U. S. National Science Foundation. NSF announces new awards to understand coastal systems and tackle coastal hazards. (2022-08-24)/[2024-07-06]. <https://new.nsf.gov/news/nsf-announces-new-awards-understand-coastal>.
- [46] NWO. Delta ENIGMA. (2023-11-01)/[2024-07-06]. <https://www.nwo.nl/en/projects/184036008>.
- [47] UK Research and Innovation. GCRF global interdisciplinary research hubs. London: UKRI, 2023.

Delta Research for Pathways to Sustainability: Progress and Future Directions

Weiguo Zhang Lijun Hou Zhong Peng Lin Yuan Xiuzhen Li* Qing He*

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241

Abstract Deltas, located at crucial areas of land and sea interaction in coastal zones, are global hotspots of ecological protection and strategically important for the socio-economic development of coastal regions. Due to the impacts of intensive human activities and climate change, deltas have experienced significant changes in hydrodynamic, morphological, environmental, and ecological processes. Security and health issues in deltas are pressing concerns, severely hindering sustainable socio-economic development. This represents one of the most urgent global challenges, necessitating international cooperation to provide scientific support for comprehensive delta management and decision-making. This paper examines first the security, health, and development challenges in global deltas. After reviewing research progress and gaps, this paper then identifies key scientific themes in delta research, including evolution mechanism of coupled human-natural deltaic system, intelligent observation-modelling-decision technology, and integrated management technology. Lastly, focusing on the implementation of the UN Ocean Decade Mega-Delta Programme (2021—2030), led by Chinese scientists, this paper calls for enhanced global cooperation and outlines future research directions. It is anticipated that such a study will offer a Chinese pathway to achieving the UN Sustainable Development Goals, contributing to the realization of the Belt and Road Initiative and building a community of shared future for the mankind.

Keywords delta; sustainability; coupled human-natural system; observation and modelling; digital twin; integrated management

(责任编辑 陈鹤 张强)

* Corresponding Authors, Email: xzli@sklec.ecnu.edu.cn; qinghe@sklec.ecnu.edu.cn