

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.06.015

黄河三角洲水文-地貌-生态系统演变与 多维调控研究进展

凡姚申¹, 窦身堂¹, 于守兵¹, 王广州¹, 吴彦¹, 谢卫明²

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003;
2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 河口三角洲是由水文、地貌和生态耦合作用形成的复合系统, 其演变具有时空波动性强、响应高度敏感、边缘效应显著与环境异质性高的特性, 属典型的易失衡区。从黄河三角洲水文-地貌-生态子系统演变过程、耦合作用关系以及多维调控理论与技术等方面, 阐述了多重压力下的子系统自适应调整与状态特征, 归纳了水文条件与河口地貌-生态系统演变的互馈关系, 搭建了多维协同的水沙配置研究框架, 并提出了基于水沙优化配置的多维调控策略。针对目前研究存在的问题, 从连续性监测平台建设、全过程模型构建、失衡风险预测以及多维调控理论与技术研究等方面提出了未来研究的重点方向, 以期优化利用有限水沙资源维持河口系统稳定提供科学支撑。

关键词: 水文-地貌-生态; 演变过程; 耦合关系; 互馈关系; 多维调控; 黄河三角洲

中图分类号: P737; X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)06-0984-15

河口三角洲作为河陆海相互作用的关键区域, 给人类和全球众多生物提供了重要栖息场所和物质来源, 是地球表层极具价值的生态系统, 也是经济社会可持续发展的核心地带^[1], 在全球有效碳存贮与碳中和方面具有不可替代性^[2-3]。维护河口演变平衡关乎三角洲的稳定与资源利用的可持续性, 是沿海经济社会发展的重要基石。然而, 河口三角洲演变具有时空波动性强、变化响应敏感、边缘效应显著以及环境异质性高等特性, 属典型的易失衡区。20世纪50年代以来, 河流入海水沙减小叠加海平面上升和极端气候事件, 导致全球大多数河口三角洲出现岸滩侵蚀、土地淹没、生态环境破坏等一系列问题^[4]。因此, 河口地貌演变与生态系统演化成为近期及未来研究热点, “大河三角洲计划”(Mega-Delta Programme)已列入联合国“海洋科学”十年行动计划(2021—2030年), 同时相关问题也纳入了《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》。

黄河是以高含沙量著称的世界级大河, 大量入海泥沙在河口沉积造就了广袤的河口三角洲, 同时孕育了世界上暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统, 是黄河下游与环渤海地区的天然生态屏障。黄河三角洲属于河控多沙型河口三角洲, 由1855年黄河在铜瓦厢决口流入渤海后经过11次大的流路变迁、泥沙堆积而形成^[5-6]。黄河三角洲稳定是黄河流域与环渤海地区的防洪安全、供水安全、生态安全和社会经济发展全局的重要基础。2019年, 黄河流域生态保护与高质量发展上升为国家重大战略, 明确提出“黄河三角洲要做好保护工作, 促进生态系统健康, 提高生物多样性”。然而, 与世界大河三角洲类似, 黄河三角洲也同样承受着来自河流、海洋和人类活动的多重压力, 目前已出现入海泥沙急剧变化的新现象^[7]; 河口由快速向海淤进到缓慢沉积, 水下三角洲局部出现侵蚀迹象, 正处于冲淤转型新时期^[8-9]; 尾间沟汊不断撕裂产

收稿日期: 2023-06-12; 网络出版日期: 2023-10-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231019.1237.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2243207); 河南省自然科学基金资助项目(232300421017)

作者简介: 凡姚申(1989—), 男, 河南项城人, 高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水沙动力地貌研究。

E-mail: fysmyself@126.com

通信作者: 窦身堂, E-mail: doushentang@126.com

生、孕育发展,拦门沙出露水面,河口前缘淤积延伸出现新状态^[10]。

在新情势下,黄河三角洲水文、地貌、生态演变与响应机制更加复杂。目前,国内外在黄河三角洲水文和地貌过程及生态现状等各个方面都取得了一系列重大研究成果,但对其演变与调控研究进展综述性文献却较少。本文就近30 a来黄河三角洲水文-地貌-生态演变与调控的相关研究进展进行归纳和总结,包括黄河三角洲子系统演变过程、耦合作用关系以及多维调控理论与技术等,探讨目前存在的主要问题,并对今后研究方向作出展望。

1 水文-地貌-生态子系统演变

1.1 入海水沙变化与水文条件

入海水沙是河口最典型的水文过程。20世纪50年代以来,随着河流建坝、采砂和引水等工程的建设,全球主要河流河口来水来沙量呈持续下降趋势,如红河流域 Hoa Binh 大坝建成后,泥沙通量较建坝前减少了约60%~70%^[11],人类活动使珠江口内泥沙淤积量减少约29%^[12]。与世界大河河口类似,黄河口入海泥沙也呈显著减少的趋势。1960年三门峡水库开始运行以前是黄河入海水文过程的“天然期”,据利津水文站20世纪50年代水沙资料显示,该时期黄河口年均入海水量为480亿m³、沙量为13.4亿t。1986年后黄河年均入海水沙进入枯水少沙期,水、沙量分别是天然期的35%和18%。20世纪90年代河口出现连年断流,小浪底水库调控运用以来(2002—2022年)黄河不再断流,但黄河水文情势仍处于水沙延续枯少期^[10]。黄河口入海水沙的这些变化势必会对河口地貌和生态演变造成影响,对于黄河口地区的管理和保护,需要综合考虑水沙输送的变化趋势,采取相应的措施来维护河口地貌稳定和生态系统健康发展。

河流入海泥沙输运扩散过程已成为河口海岸和近岸海洋学研究的前沿和热点问题。入海泥沙扩散机制是三角洲地貌演变的重要环节,但受区域动力特征及混合过程和流域、海洋动力过程相互作用的影响,探究河口泥沙扩散途径和范围一直是难点^[13-14]。黄河水沙入海上层径流与底层海流作用形成的切变锋面阻隔,是限制河口入海泥沙的重要因素和河口拦门沙形成的重要动力机制^[15]。季节性海水温度变化是影响水沙扩散的另一个重要因素,相比于冬季,夏季表层海水温度升高,水体分层强烈,上下层易形成温度切变锋,表层高含沙冲淡水向海外扩展更远。入海水沙在黄河口不同区域呈现输运沉积特征差异,但已有研究结果并不统一。有研究认为扩散范围限制在15 m等深线以浅区域^[16];另一部分研究则认为入海泥沙输运按一定比例沉积在拦门沙(河口)、水下三角洲(滨海)、外海,但不同研究中各区域比例存在较大差异,未能达成共识^[17]。

黄河口海域盐度1958—2000年总体呈上升趋势^[18],盐度升高对河口三角洲地下水位变化、土壤盐分分布产生影响,进而对河口三角洲湿地发育有较大影响。黄河三角洲区地下水主要为微咸水、咸水和卤水^[19],以往研究聚焦于黄河三角洲地下水淡咸水的形成和演化、地下水土壤空间分异规律、营养盐入海通量变化等^[20],但对地下水埋深、土壤盐分时空分布特征与黄河入海径流变化的相关性研究仍不充分。

1.2 尾间冲淤与三角洲地貌演变

黄河“善淤、善决、善徙”,其尾间入海流路历经10余次大规模改道后叠置形成复杂的三角洲叶瓣体系。随着叶瓣不断向海延伸,改道点有向上游移动的趋势^[21]。从水动力学机制来看,河床纵向坡度减小和回水效应是造成河流改道的重要原因^[22]。自1976年起入海流路改道至清水沟,对清水沟河道演变及影响因素研究成果颇丰。Zheng等^[23]将清水沟流路演变分为快速淤积(1976—1980年)、河道展宽(1980—1985年)、河道萎缩(1985—1996年)和河道下切加深(1996—2015年)4个阶段。Han等^[24]指出河道地形受水沙调控、尾间改道和三角洲前缘发育程度等因素制约,且河道在来水来沙量较小时萎缩变浅,在来水量较大时下切展宽。刘清兰等^[25]基于正交曲线网格建立利津站以下河道数字高程模型,发现调水调沙改变了入海水沙的年内分配,造成尾间河道的持续冲刷,2002—2017年累计冲刷泥沙量为6 240万m³;但经过多年冲刷,

受河床整体下切和河口淤积延伸影响,调水调沙的冲刷效率在持续降低。

黄河三角洲总体地貌演变特征为行河流路岸线淤积延伸、不行河流路岸段持续蚀退,三角洲地貌演变呈现显著的空间异质性和不平衡状态。陆上三角洲年代际地貌演变可归纳为4个连续阶段,分别为快速淤长期(1976—1981年)、缓慢淤长期(1981—1996年)、缓慢侵蚀期(1996—2002年)和缓慢淤长期(2003—2013年)^[26]。Cui等^[27]从三角洲平均高潮线的角度分析,也得出类似的三角洲演变阶段。Xu^[28]认为陆上三角洲的淤长与夏季东亚季风指数密切相关,但也有学者提出人为河流改道等人类活动是影响陆上三角洲岸线动态的重要因素^[29]。现行清8汊河(1996年开始行河)水下滨海区地貌冲淤演变特征可划分为中速淤积(1996—2002年)、快速淤积(2002—2007年)、缓速淤积(2007—2015年)和快速侵蚀(2015—2016年)^[30],从空间上来看口门滨海区呈淤积状态,而孤东近岸和1996年废弃的老河口区呈冲刷状态^[31]。Ma等^[32]分析了近年来黄河三角洲潮滩、低潮线和水下地貌的动态,认为12 m等深线是冲淤平衡转换带。

不行河的刁口河流路和神仙沟流路河口海岸侵蚀显著,1976—2000年岸线分别向陆后退约7 km和4.5 km。Chu等^[33]指出1976—2000年最大的侵蚀区出现在刁口河和神仙沟行河期间形成的向海堆积的凸角处。Li等^[34]提出刁口河流路河口的蚀退演变经历的主要3个阶段:1976—1985年的快速侵蚀、1985—1992年的缓慢侵蚀和1992—1996年的侵蚀淤积调整阶段。3个阶段刁口河口侵蚀速率逐渐降低,在1976年后刁口河流路水下三角洲被重塑成与1976年之前截然不同的缓坡形态^[35]。Zhang等^[36]认为尾间河道摆动、相对海平面变化、区域海洋水动力及地方工程建设是影响该区域岸线变化的重要因素。Fan等^[37]对黄河三角洲北部潮间带范围时空演变进行了分析,指出北部潮间带蚀退不仅受海洋动力影响,也受到人类围垦的影响。由此可见,黄河口地貌演变是一个复杂而多变的过程,受到河流水文泥沙、海洋水动力条件和人类活动等多种因素的综合影响,亟需从微观层面揭示各影响因素的耦合互馈与相互作用关系及其地貌变化机制,这是理解河口地貌演变的关键所在。

1.3 河口生态条件与生态演化

黄河三角洲湿地是中国暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统,沿海滩涂广泛发育,湿地植物富集。根据水体类型和存续方式的不同,黄河三角洲湿地可分为淡水湿地、咸水湿地和半咸水湿地。淡水湿地多以河流为轴分布在河道两侧,咸水湿地主要分布于海岸带附近,半咸水湿地则主要分布于河流与海洋的交汇地带^[38]。黄河口湿地生境类型极为丰富,万千生物得以在此栖息繁衍。然而,黄河三角洲成陆时间较短,土壤发育年轻,生态发育层次低,适应变化能力弱,抵抗外界干扰能力差,属脆弱生态敏感区^[39]。近年来,对于世界大多数河口来说,高强度人类活动、海平面上升及风暴潮等引起的陆海水沙条件改变导致河口湿地已出现不同程度的退化、侵蚀或永久消失(如围垦),进而加剧了河口生境的脆弱性,危及河口生态安全。因此,最近10 a来关于河口湿地恢复的一系列成果不断出现,长江三角洲通过构建低矮堤坝以形成坝内植被恢复生态^[40],美国密西西比河三角洲试图将疏浚泥沙与沼泽恢复结合以稳定海岸^[41],荷兰则努力推行利用北海沉积物哺育潮滩,构建牡蛎礁防护海岸侵蚀等一系列措施以恢复河口湿地生态^[42]。

针对黄河三角洲滨海湿地严重退化的问题,学者们开展了大量修复研究和示范工作。前期,黄河三角洲退化滨海湿地的修复工作,多注重植被覆盖的恢复效果,且多简单采取围封和补充淡水相结合的方式,过分依靠自然恢复,人工重建发挥作用不足。这样的修复方式,不仅耗水量巨大,且导致恢复后的植被群落结构简单,生物多样性丧失,作为鸟类栖息地的重要生态服务功能被严重削弱,影响了湿地功能的正常发挥。近期,许多学者针对气候变化、工农业发展和外来物种入侵等因素共同影响下的植被动态进行研究,并取得了新进展,获得了新认识。例如,有学者发现黄河三角洲受人工干扰影响湿地植被景观破碎化程度剧烈,景观多样性指数呈下降趋势^[43],加之河口来水来沙减少、海岸侵蚀和海水入侵加剧致使湿地植被恢复和绿化受到更加严重的盐碱胁迫^[44],而修复水文连通和实施生态补水对盐沼植物和水生动物的生存以及生物多样性具有积极作用^[45]。综合来看,黄河三角洲湿地面临着严重退化的挑战,通过学者们的研究和努力,可以找到解决问题的新途径,修复工作需要更加注重湿地的生态功能,采取合适的措施来恢复植被和保护生物多样

性,以确保湿地生态系统的可持续发展。

2 水文-地貌-生态子系统耦合关系

2.1 水文条件对河口地貌的影响

水文条件(包括水动力与泥沙运动)引起河口三角洲地形地貌变化。径流入海后与潮流、波浪等相互作用下的泥沙扩散、沉积、起动、平流及底沙再悬浮是河口区的典型水沙动力过程,见图1^[46]。对于多沙河口而言,高含沙径流动力常以射流的方式入海^[47],泥沙沉积与侵蚀的不同模式塑造了不同形态的河口前缘地貌^[48]。Warrick^[49]研究发现在入海泥沙通量突然增多时,泥沙首先在河口沙嘴潮间带淤积,几个月后波浪再悬浮和余流输运作用将泥沙带到口门附近的洲滩形成堆积体,随着堆积体在沿岸方向不断延伸,三角洲几何形态逐渐呈扇形发育。在洪水期间,径流作用尤为突出,往往取代潮流成为控制泥沙输移的关键因素^[50],在强径流的作用下河床中形成双向螺旋流,掘蚀河床而将泥沙向河床两侧堆积,随后水下沙坝出露海面并逐渐将河道分汊^[51]。黄河调水调沙塑造了强径流入海条件,黄河口近岸落潮动力加强,涨潮动力减弱,含沙量显著增大^[52],入海泥沙普遍以异轻羽状流的形式在河口附近的有限区域内沉积^[53],在没有大风扰动的情況下河流入海悬沙浓度大于 29.0 kg/m^3 时会产生高密度泥沙异重流^[54]。调水调沙期间大量泥沙沉积促使河口口门地貌发生快速变化,进而引起入海主流的快速摆动^[55]。黄河入海泥沙还具有“夏储冬输”的特点,夏季在河口附近沉积的泥沙成为冬季泥沙输运的重要来源,冬季泥沙输运量远远大于夏季且有向外海输运的趋势^[56-57]。

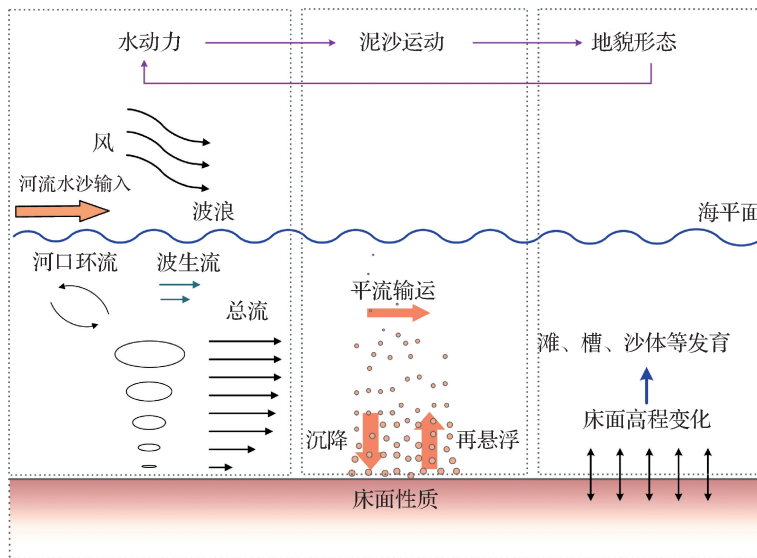


图1 河口区典型水沙动力过程

Fig.1 Typical water and sediment dynamic processes in the estuary

水沙供给的多寡是哺育河口三角洲地貌发育与否的充分条件。多沙时期遵循三角洲面上呈“大循环”及流路自身的“小循环”演变规律^[58]。此后,针对流路地貌稳定问题,提出了出汊是影响流路稳定的关键问题,并揭示了“淤积—延伸—出汊摆动—改道”流路演变的自然规律^[59]。在少沙情势下,行河口门造陆幅度趋于减缓,在个别来沙量较少年份甚至出现侵蚀^[60],局部逐渐呈现由河控型向海控型转变的趋势。黄河口海岸动态平衡的沙量阈值是当前研究的焦点,但研究成果差别较大(表1)。研究方法大多是建立描述某一时段内陆地面积变化特征的因变量与水沙条件自变量的统计关系,得到因变量为0时的平衡沙量或临界水沙组合关

系式。从反映流路淤积延伸、河海交汇作用最强、海岸侵蚀最剧烈的角度选择海岸线标准,研究三角洲陆地变化及海岸动态稳定沙量很有必要。

表1 维持黄河口海岸动态平衡的沙量阈值

Table 1 Critical sediment load to maintain the dynamic balance of the Yellow River estuary coast

序号	空间范围	时间范围	研究资料	临界沙量/(亿 t · a ⁻¹)	文献
1	行河海岸	—	—	≈2	[61]
2	黄河陆上三角洲	1855—1976年	滨海区水深	2.45	[62]
3	黄河陆上三角洲	1955—1989年	海域海图	2.78	[63]
4	清水沟陆上三角洲	1976—1997年	滨海区水深	1.51	[64]
5	刁口河陆上三角洲	1953—1973年	滨海区水深	4.21	[64]
6	清8汉陆上三角洲	1996—2005年	遥感影像	1.63	[28]
7	清水沟陆上三角洲	1976—2005年	遥感影像	3.31	[28]
8	清水沟水下三角洲	1977—2005年	水深地形	1.29~1.79	[35]
9	清8汉陆上三角洲	2002—2015年	遥感影像	0.48	[37]
10	清8汉水下三角洲	1996—2016年	水深地形	0.414~0.623	[31]
11	黄河陆上三角洲	1976—2015年	遥感影像	1.76	[65]
12	清水沟水下三角洲	1997—2018年	水深地形	1.09~1.65	[32]

需要指出的是,即便黄河入海水沙发生了显著变异,黄河进入了枯水少沙期,但2002年实施调水调沙以来现行河道仍在淤积延伸,尾间河道依然处于不断出汉变动中。如2018年以来,黄河口各汉道交替成为行水主汉,河口泄洪排沙主通道不断变化(图2)。汉道频繁演变不仅严重威胁河口两岸防洪安全,而且可能破坏河势稳定、引起流路摆动。不仅如此,2020年多次洪水径流输沙入海后,河口河道呈现出明显的淤积趋势,河道前缘出现二级分汉,支汉淤积萎缩与拦门沙交互作用形势更加复杂。这些变化综合表明,在经历了近40a的黄河来沙减少后,黄河口地貌系统正在面临不同程度的转变,淤积和侵蚀共存,尤其是侵蚀型地貌,受前期沉积物特性、海洋常规/非常规动力和植被附着特征影响更为复杂,亟需从水文-地貌-生态系统的整体层面揭示河口地貌变化机制,这是理解地貌多维耦合响应机理与状态转化的关键所在。

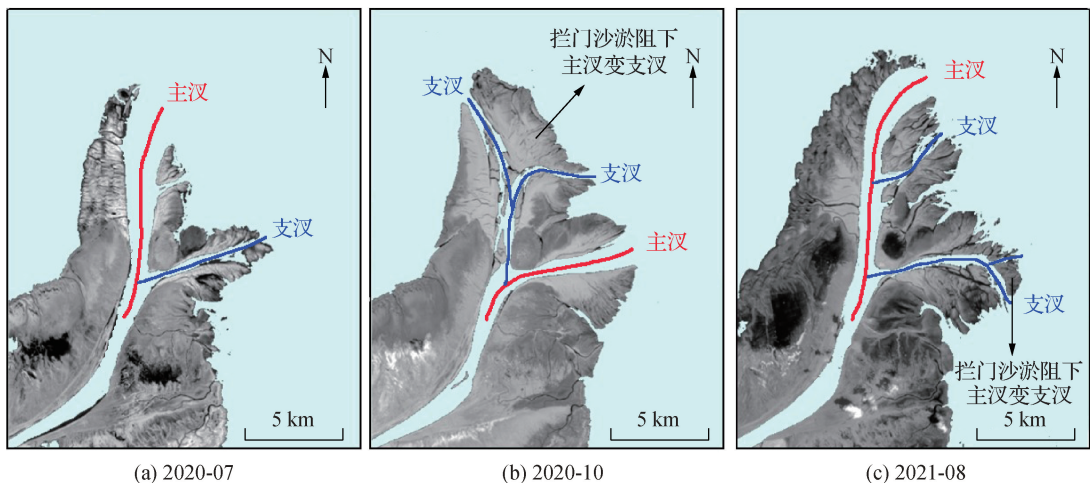


图2 黄河口主支汉道频繁演替

Fig. 2 Frequent succession of the main tributaries of the Yellow River estuary

2.2 河口地貌反馈影响水文条件

水文条件塑造河口地貌,而河口地貌是河口水文条件的地形边界,其响应水文条件的结果必定也会反馈影响水文条件,因此两者存在明显的耦合作用。河口拦门沙(沙坝)是河海动力相互作用后径流能量耗散、咸淡水混合泥沙絮凝加速沉积而成的堆积体^[66],也是河口地貌反馈影响水文条件最明显的区域。在黄河三角洲的各种沉积环境中,拦门沙的沉积速率最高,河流输送入海的沉积物中,约有30%~40%的入海泥沙沉积在拦门沙区域内^[67]。不同径流量对拦门沙形态发育影响不同,在高径流量时期形成双叶瓣单河道形式的拦门沙,在低径流量时期形成单叶瓣双河道形式的拦门沙。拦门沙的淤高和延伸可以影响河口一系列水沙运动过程,如Li等^[68]发现拦门沙的存在可以改变河口环流和床面剪应力,进而影响河口最大浑浊带的形成;Gong等^[69]指出河口拦门沙的水力控制在被背风跳跃阻挡的状态下,可以通过潮泵输运增强向陆地的盐输送,这表明拦门沙对盐的运移具有重要的控制作用。

细颗粒泥沙在黄河口不断淤积,口门拦门沙发育充分。拦门沙形成之后,侵蚀基面抬高,对河道泄水排沙十分不利,导致水位壅高,产生溯源淤积,加重下游河道抬升,是黄河口影响下游河道防洪安全的根源。学者们对于黄河口拦门沙淤积反馈的影响距离有不同看法,有的认为河口淤积延伸将导致整个黄河下游河道长期难以平衡^[70-71],有的则认为仅在感潮河段涨潮时才产生溯源淤积^[72],大多认为溯源淤积影响范围在泺口与艾山之间^[73]。曹文洪等^[74]基于概化河工模型研究发现黄河口拦门沙的形成与滞流点的关系非常密切,河口径流与潮流的交汇处(滞流点)的位置在拦门沙顶部变动。黄河口拦门沙出露水面后,河口沙嘴不断向外凸出,这导致现行河口外涨潮优势流呈舌状向南部莱州湾方向伸展,有利于泥沙的净输入^[75]。这些研究结果表明黄河口地貌与水文之间的关系是非线性、多元和时空变化的,由于获取准确、连续的水文和地貌数据仍然是一项挑战,缺乏高质量的观测数据限制了对黄河口水文-地貌互馈机制的深入研究。

2.3 河口生态与水文-地貌的相互作用

河口生态过程与水文-地貌之间存在复杂的耦合关系,水文是河口地貌演化、地下水及盐度等生境条件和生态演替的主要驱动因素,生态水量是各类生物生长的必要物质(水文的直接作用),水文作用引起地貌演变为生物提供稳定的基底(水文的间接作用)。为此,生态专家提出在潮滩湿地生态修复时应着重注意生物和物理缓解作用之间的相互作用,如盐沼植被的存在削弱了水动力,从而减少了滩面侵蚀,反过来水动力的削弱和沉积物稳定性的增加也有利于盐沼植被生长^[76]。

地貌高程(影响水位)和盐度是决定滨海湿地植物存活和分布的最关键环境因子^[77],不同植物对高程和盐度的要求不同,水-盐环境(一般指水位和盐度环境)对不同的盐沼植物存在一个临界值,一旦水-盐环境胁迫超过盐沼植物的耐受阈值,将直接影响植物的生长及存活^[78-80]。受水-盐胁迫影响,黄河三角洲湿地植被从海向陆呈连续带状分布格局,主流植被类型依次为碱蓬、芦苇、怪柳。植物根系促淤,会抬高地表高程,是生物反馈地貌的集中体现。互花米草盐沼繁殖能力强、根系茂密,黄河三角洲于1990年首次引种互花米草,最初目的是用于保滩促淤,然而近年来却成为入侵物种,导致黄河口滨海湿地生态失衡;2011年后,黄河三角洲地区互花米草开始进入快速扩散期,并迅速入侵土著植被栖息地;到2020年,现行河口区互花米草分布面积达52.7 km²,占总盐沼面积的31%^[43]。互花米草具有较强繁殖能力,其形成的盐沼植被丰度较高,增强了局部沉积,黄河三角洲湿地互花米草群落的地表高程变化速率为58.8±19.4 mm/a,远高于土著植被碱蓬和怪柳^[81]。互花米草增加了地表高程,也降低了黄河口自然湿地淹水频率^[82]。

河口生物与水文-地貌环境的相互作用不仅在时间尺度上不断累积,也会通过空间尺度上的交流影响河口地貌形态。河口潮滩生物出现的规律性的斑图形态,是盐沼在不同尺度上对水动力和泥沙沉积作用的响应,也称为自组织斑图^[83-84]。黄河三角洲潮滩微地貌斑图呈现季节性变化,每年4—6月伴随着滩涂上泥螺生物量的增加,微地貌斑图逐渐减弱,受泥沙扩散、水流再分配过程交互作用的影响,高丘上的底栖微藻生物量明显高于洼地^[85]。随着对生物-地貌耦合关系的认识,在研究河口水沙地貌变化时,越来越多的学者考虑在传统地貌模型的基础上引入生物过程^[86-87]。以基于水沙动力过程的数学模型为主流,通过较准确地还

原水动力、泥沙输运、生态和地貌的复杂过程,在径流和海洋动力作用下的河口生物地貌模拟方面发挥了重要作用^[88-90]。然而,这些模型在深入研究水沙过程时,需要采用复杂的数学方程来描述,将不同时空尺度的动力过程耦合到同一模型中是一项具有挑战性的任务。

3 水文-地貌-生态多维调控策略

黄河三角洲是由水文、地貌和生态3个子系统相互作用、耦合形成的复合系统,其中,水沙是河口地貌与生态演化的基础,黄河河道与引黄水系是输送水沙的通道。水沙资源优化配置是通过调控水量和泥沙的分配和利用,均衡水沙时空分布以实现对水文-地貌-生态系统的调控和管理,是黄河三角洲水文-地貌-生态多维调控的最直接策略。下文在综述水沙配置理论与技术的基础上,提出黄河三角洲水文-地貌-生态多维协同的水沙配置研究框架,进而展望基于水沙资源优化配置的多维调控策略。

3.1 水沙资源优化配置理论与技术

河流系统是以水沙运动为联系纽带、自然流域和人类工程相互影响的复杂系统,水沙资源优化配置是一项难度很大的复杂系统工程,它涉及产水产沙、水土保持、水库运用、水沙运动、河床演变和河道治理等多方面的理论^[91]。水沙资源优化配置的概念是逐渐形成并发展起来的,最初水沙配置是分开的,且水配置已经进行了半个多世纪,研究范围从最初仅限于小区域,逐渐扩展到大流域,甚至跨越流域边界;配置模式从最初的“以需定供”或“以供定需”逐步演变为综合考虑供需的“可持续发展模式”^[92]。随着研究的深入,人们逐渐认识到水流和泥沙在运动过程中是密不可分的2个方面,它们既具有独立性,可以分别进行配置,又相互制约、相互影响,对水沙进行联合配置更具有科学合理性。

黄河泥沙问题突出,多年来黄河水沙调控实践极大地丰富了水沙资源优化配置的理论和技术研究^[93]。钱宁等^[94]是较早提出黄河水沙配置的学者之一,认为通过水库调水调沙可以改造黄河下游河道,提高河道输沙能力,创造漫滩机会,进而改善泥沙淤积部位。廖义伟^[95]提出了对黄河实施水库群水沙资源化联合调度管理的理念,以及水沙一体化、科学拦蓄、调排有序、挖放结合、分滞兼顾等调度管理思想。练继建等^[96]采用多目标规划的思想,成功应对了动态多目标规划中的“维数灾”问题,结合遗传算法和神经网络方法,构建了基于非线性整体求解理论的多目标规划模型,用于优化三门峡水库的水沙联合调度。胡春宏等^[97-100]建立了流域水沙资源多目标优化配置层次分析表,提出了流域水沙资源联合多目标优化配置理论模型。江恩慧等^[101]提出的基于系统科学的多协同论,为多目标协同的黄河水沙配置提供了理论指导。在国外,也有大量水沙资源利用的研究成果和典型事例。美国华盛顿州拆除埃尔瓦河上游大坝后,将泥沙分配到河口三角洲,利用泥沙资源治理三角洲海岸侵蚀^[102];Nardin等^[103]在美国路易斯安那州蜡湖三角洲发现湿地植被恢复工程可以影响河流泥沙的分配,水沙配置的有效性得到一定提高,进而可以高效恢复被侵蚀破坏的三角洲。虽然有多位学者提出了水沙资源优化配置的理念和思想,但整体上缺乏系统性和综合性的研究框架,无法全面考虑黄河水沙调控的多个方面和复杂性。

在水沙资源优化配置理论基础上,通过对水库的蓄水和放水调度,黄河已开展了多种水沙配置实践。如黄河河口生态调度使三角洲沿岸的地下水位抬升,近海生态环境得到了一定程度的改善及恢复。需要指出的是,有关黄河调水调沙已有研究关注的重点仍然是下游防洪减淤。随着综合国力的提升和国家区域经济发展战略以及生态安全战略的推进,黄河流域“防洪安全-社会经济发展-生态环境改善”之间的关系亟待平衡与协调。特别是,受复杂约束条件和边界条件制约,未来黄河“水少沙多、水沙关系不协调”等问题将更加突出,单依靠传统的水沙资源配置理论和技术将无法实现黄河三角洲地区多因子发展平衡的协同目标。

3.2 多维协同的水沙配置研究框架

黄河三角洲来水来沙条件是动态变化的,三角洲海岸-河道边界约束条件是动态调整的,河口生态健康维持的需求是动态增长的,特别是针对河口水少沙多、水沙变动频繁的现实状况,黄河三角洲基于水沙配置

的多维调控不仅要注重水沙量的适应性调度, 更要突出三角洲生态保护与区域高质量发展, 实现水沙输移-地貌稳定-生态环境等河口三角洲系统功能多维协同的目标。综合黄河流域水沙优化配置研究^[104-105]和黄河三角洲自身演变特点, 提出黄河三角洲水文-地貌-生态系统多维协同的水沙配置研究总体框架(图 3)和与之相对应的目标函数。

总体框架的基本内涵可以表述为, 黄河三角洲水沙配置多维调控取决于一定时空条件下各子系统治理效益和彼此间的耦合协调情况达到最优, 且又受制于黄河河口系统所能承受的约束条件。提出多维协同水沙配置技术的系统效益、约束条件和耦合协调 3 个模块(图 3)。在系统效益模块, 采用非线性多目标优化配置模型, 确定各水沙条件情形下黄河三角洲地区各子系统的优化配置结果; 在约束条件模块, 综合考虑黄河三角洲地区水沙供给边界条件、水沙需求条件、水沙最低保障红线约束条件和子系统间的水沙协同条件, 确定模型的约束条件; 在耦合协调模块, 引用物理学中的耦合度和耦合协调度的概念, 耦合度表示两系统之间通过动态相互作用而彼此产生影响的现象。

目标函数包括水文、地貌和生态 3 个子系统独立效益最佳的权重。系统和各子系统有一些刚性约束条件(边界条件、子系统红线与底线、子系统间容斥关系等)。此外, 还考虑了子系统间的耦合协调程度。利用大数据和人工智能技术, 构建非线性多目标优化配置模型目标函数, 对黄河三角洲水沙的时空变化进行更精准的预测, 可以分析不同条件下的水沙资源优化配置方案, 优化水沙调度策略, 提高水沙资源的利用效率。

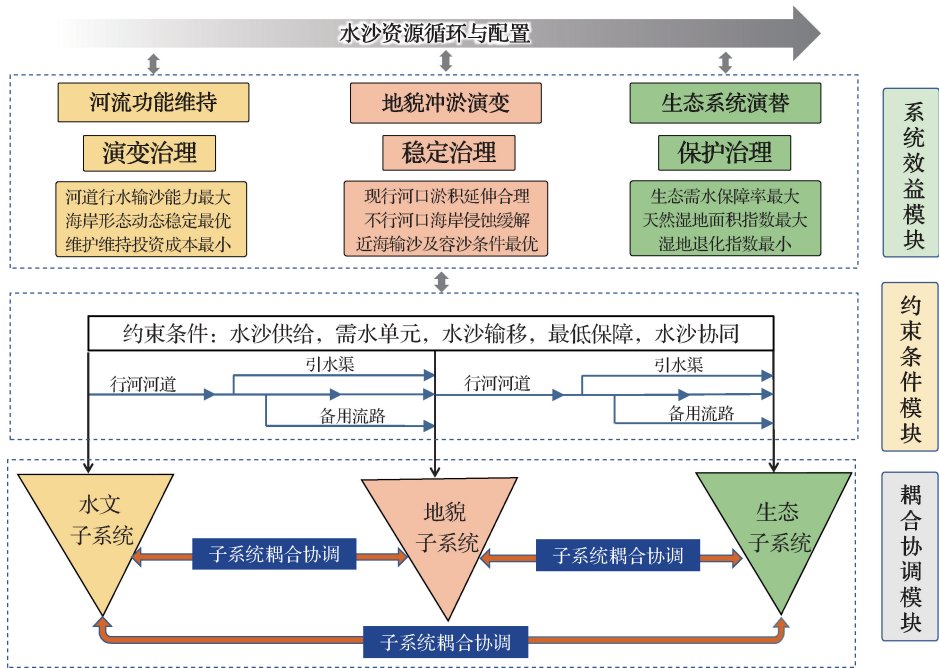


图 3 黄河三角洲多维协同的水沙配置研究框架

Fig. 3 Research framework on the multidimensional regulation of water and sediment in the Yellow River Delta

4 结论和展望

20 世纪 50 年代以来, 河流入海水沙量减小叠加海平面上升和极端气候事件, 引起了世界上大多数河口三角洲出现岸滩侵蚀、土地淹没、生态环境破坏等一系列问题。围绕黄河三角洲演变, 国内外研究者针对水文、地貌、生态子系统演化及主控因素开展了大量研究, 已开展的工作对于理解多重压力下的子系统自适应调整与状态特征具有重要贡献, 加深了对水文条件与河口地貌-生态系统互馈关系的认识, 可为未来开展理

论分析、模拟方法和多维调控等方面研究提供借鉴和参考。然而,由于黄河三角洲水文过程和地貌-生态响应内在机制极其复杂,加之未来黄河“水少沙多、水沙关系不协调”等问题将更加突出,仍需要从流域、河口和海洋等多尺度角度,从动力条件、泥沙输移、地貌塑造和生境变化等多过程角度,从行洪输沙维持、地貌演变稳定和生态良性发展多目标协同角度,进一步探究黄河三角洲系统演变机制与多维调控研究。未来研究可以从以下3个方面进行探索:

(1) 加强对黄河三角洲系统层面的连续性现场观测。建立完善的黄河三角洲水文-地貌-生态实时大数据监测平台,加强对水动力、泥沙输运、生境变化等外界扰动指标,以及冲淤量、生物多样性和生态系统状况等可表征系统状态指标的中长期时间尺度持续性观测,为现有系统耦合分析结果提供更多现实依据。

(2) 发展多时空尺度的水文-地貌-生态全过程量化模拟。在高质量连续观测资料基础上,建立水文-地貌-植被全过程动态模式,考虑水文-地貌-生态过程在不同时空尺度的耦合效应,实现不同水沙边界条件下地貌演变和生态系统响应的数值模拟,预测地貌失稳区和生态功能退化区扩张的风险与时空变化,为水沙优化配置提供重要手段。

(3) 深化多维协同的水沙优化配置理论与技术研究。突破“就水论水、就生态论生态”的思路限制,从河口系统整体性出发,针对系统治理中存在水文要素分布不均、地貌形态演化失衡和生态系统演替失调等问题,开展多学科交叉、多过程耦合、多尺度集成的系统多维水沙优化配置理论与技术研究,确立多维协同的水沙配置思路与方法。

参考文献:

- [1] 陈吉余, 陈沈良. 中国河口研究五十年: 回顾与展望[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 481-486. (CHEN J Y, CHEN S L. China estuarine research for 50 years: retrospect and prospective[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(6): 481-486. (in Chinese))
- [2] MURRAY N J, PHINN S R, DEWITT M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [3] van der STOCKEN T, CARROLL D, MENEMENLIS D, et al. Global-scale dispersal and connectivity in mangroves[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(3): 915-922.
- [4] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: protect the world's deltas[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 31-33.
- [5] 凡姚申, 窦身堂, 王广州, 等. 黄河口治理发展回顾与展望[J]. 水利发展研究, 2022, 22(5): 48-53. (FAN Y S, DOU S T, WANG G Z, et al. Review and prospect of Yellow River Estuary management[J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(5): 48-53. (in Chinese))
- [6] 徐丛亮, 陈沈良, 陈俊卿. 新情势下黄河口出汊流路三角洲体系的演化模式[J]. 海岸工程, 2018, 37(4): 35-43. (XU C L, CHEN S L, CHEN J Q. Evolution mode of channel bifurcation delta system at the Yellow River Estuary under the new situation[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 37(4): 35-43. (in Chinese))
- [7] 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 黄河下游与河口对2015—2017年调水调沙中断的沉积响应[J]. 科学通报, 2021, 66(23): 3059-3070. (WU X, FAN Y Y, WANG H J, et al. Geomorphological responses of the lower river channel and delta to interruption of reservoir regulation in the Yellow River, 2015—2017[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(23): 3059-3070. (in Chinese))
- [8] JI H Y, CHEN S L, JIANG C, et al. Damming-induced hydrogeomorphic transition in downstream channel and delta: a case study of the Yellow River, China[J]. *Water*, 2022, 14(13): 2079.
- [9] 陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙情势下黄河口的地貌演变[J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 61-67. (CHEN S L, GU S, JI H Y, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(5): 61-67. (in Chinese))
- [10] 凡姚申, 窦身堂, 王万战, 等. 新入海水沙情势下的黄河口沙嘴动态响应[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 63-75. (FAN Y S, DOU S T, WANG W Z, et al. Dynamic response of the Yellow River estuarine sandspit to new water and sediment

- regimes[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 63-75. (in Chinese))
- [11] WOODROFFE C D, NICHOLLS R J, SAITO Y, et al. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change [M] // HARVEY N. *Coastal Systems and Continental Margins*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 277-314.
- [12] WU Z Y, SAITO Y, ZHAO D N, et al. Impact of human activities on subaqueous topographic change in Lingding Bay of the Pearl River Estuary, China, during 1955—2013[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37742.
- [13] HASHIMOTO K, SHIMOZONO T, MATSUBA Y, et al. Unmanned aerial vehicle depth inversion to monitor river-mouth bar dynamics[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 412.
- [14] 张龙军, 姜波, 张向上, 等. 基于泥沙中碳含量的变化表征黄河调水调沙入海泥沙的扩散范围[J]. *水科学进展*, 2008, 19(2): 153-159. (ZHANG L J, JIANG B, ZHANG X S, et al. Study of carbon content tracing sediment diffusion bound after water-sediment regulation in the Yellow River Estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2): 153-159. (in Chinese))
- [15] BI N S, YANG Z S, WANG H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 352-362.
- [16] 胡春宏, 吉祖稳, 王涛. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散[J]. *泥沙研究*, 1996(4): 1-10. (HU C H, JI Z W, WANG T. Characteristics of ocean dynamics and sediment diffusion in the Yellow River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 1996(4): 1-10. (in Chinese))
- [17] LI G X, TANG Z S, YUE S H, et al. Sedimentation in the shear front off the Yellow River Mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(6/7): 607-625.
- [18] 吴德星, 牟林, 李强, 等. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(2): 191-195. (WU D X, MOU L, LI Q, et al. Long-term variation characteristics of salinity in Bohai Sea and possible dominant factors[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(2): 191-195. (in Chinese))
- [19] 王开荣, 李平, 郑春梅. 黄河河口泥沙输移分布特性及其回归计算[J]. *海洋科学*, 2004, 28(12): 22-25, 30. (WANG K R, LI P, ZHENG C M. Regression analysis on sediment transportation-deposition pattern in Huanghe River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(12): 22-25, 30. (in Chinese))
- [20] TANIGUCHI M, ISHITOBI T, CHEN J Y, et al. Submarine groundwater discharge from the Yellow River Delta to the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C6): C06025.
- [21] MOODIE A J, NITTROUER J A, MA H B, et al. Modeling deltaic lobe-building cycles and channel avulsions for the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(11): 2438-2462.
- [22] GANTI V, CHU Z X, LAMB M P, et al. Testing morphodynamic controls on the location and frequency of river avulsions on fans versus deltas: Huanghe (Yellow River), China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 7882-7890.
- [23] ZHENG S, HAN S S, TAN G M, et al. Morphological adjustment of the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta and factors controlling its avulsion[J]. *Catena*, 2018, 166: 44-55.
- [24] HAN S S, RICE S, TAN G M, et al. Geomorphic evolution of the Qingshuigou channel of the Yellow River Delta in response to changing water and sediment regimes and human interventions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(10): 2350-2364.
- [25] 刘清兰, 陈俊卿, 陈沈良. 调水调沙以来黄河尾间河道冲淤演变及其影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 139-152. (LIU Q L, CHEN J Q, CHEN S L. Spatiotemporal evolution of Yellow River estuarine channel and its influencing factors since the water-sediment regulation scheme[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 139-152. (in Chinese))
- [26] WU X, BI N S, XU J P, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) Delta lobe (1976—2013): dominant roles of riverine discharge and sediment grain size[J]. *Geomorphology*, 2017, 292: 115-127.
- [27] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River Estuary and its response to the sediment and runoff (1976—2005)[J]. *Geomorphology*, 2011, 127(1/2): 32-40.
- [28] XU J X. Response of land accretion of the Yellow River Delta to global climate change and human activity[J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 4-11.
- [29] CHI Y, SHI H H, ZHENG W, et al. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the

- Yellow River Delta in the last 30 years[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 880-892.
- [30] JI H Y, CHEN S L, PAN S Q, et al. Morphological variability of the active Yellow River Mouth under the new regime of riverine delivery[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 329-341.
- [31] 韩香举, 陈沈良, 付作民, 等. 现行黄河口滨海区冲淤时空演变及其影响因素[J]. *海洋通报*, 2020, 39(5): 567-580. (HAN X J, CHEN S L, FU Z M, et al. Spatiotemporal evolution of erosion and deposition in the Yellow River submerged delta and its influencing factors[J]. *Marine Science Bulletin*, 2020, 39(5): 567-580. (in Chinese))
- [32] MA Y Y, LI G X. Evolution history and trend of the modern Huanghe River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(2): 40-52.
- [33] CHU Z X, SUN X G, ZHAI S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: based on remote sensing images[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(1/2): 13-30.
- [34] LI G X, ZHUANG K L, WEI H L. Sedimentation in the Yellow River Delta: Part III: seabed erosion and diapirism in the abandoned subaqueous delta lobe[J]. *Marine Geology*, 2000, 168(1/2/3/4): 129-144.
- [35] 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. (WANG H J, YUAN X J, WANG Y, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 51-60. (in Chinese))
- [36] ZHANG X D, ZHANG Y X, JI Y, et al. Shoreline change of the northern Yellow River (Huanghe) Delta after the latest deltaic course shift in 1976 and its influence factors[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 74: 48-58.
- [37] FAN Y S, CHEN S L, ZHAO B, et al. Monitoring tidal flat dynamics affected by human activities along an eroded coast in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(7): 396.
- [38] 牟晓杰, 刘兴土, 阎百兴, 等. 中国滨海湿地分类系统[J]. *湿地科学*, 2015, 13(1): 19-26. (MOU X J, LIU X T, YAN B X, et al. Classification system of coastal wetlands in China[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(1): 19-26. (in Chinese))
- [39] 张少华, 徐腾飞, 王海洋, 等. 黄河三角洲湿地保护现状与管理新思路[J]. *湿地科学与管理*, 2022, 18(6): 69-73. (ZHANG S H, XU T F, WANG H Y, et al. Current status of wetland protection in the Yellow River Delta and new thoughts of management[J]. *Wetland Science & Management*, 2022, 18(6): 69-73. (in Chinese))
- [40] LI X Z, BELLERBY R, CRAFT C, et al. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration[J]. *Anthropocene Coasts*, 2018, 1(1): 1-15.
- [41] LOVELOCK C E, CAHOON D R, FRIESS D A, et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise[J]. *Nature*, 2015, 526(7574): 559-563.
- [42] de VRIEND H J, van KONINGSVELD M, AARNINKHOF S G J, et al. Sustainable hydraulic engineering through building with nature[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2015, 9(2): 159-171.
- [43] 张晨宇, 陈沈良, 李鹏, 等. 现行黄河口保护区典型湿地植被时空动态遥感监测[J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 125-136. (ZHANG C Y, CHEN S L, LI P, et al. Spatiotemporal dynamic remote sensing monitoring of typical wetland vegetation in the current Huanghe River Estuary reserve[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(1): 125-136. (in Chinese))
- [44] 张心茹, 曹茜, 季舒平, 等. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 56-69. (ZHANG X R, CAO Q, JI S P, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamic changes in the Yellow River Delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 56-69. (in Chinese))
- [45] WANG Q, XIE T, NING Z H, et al. Enhancement of lateral connectivity promotes the establishment of plants in saltmarshes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145484.
- [46] CALDWELL R L, EDMONDS D A. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: a numerical modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(5): 961-982.
- [47] ZĂINESCU F, ANTHONY E, VESPREMEANU-STROE A. River jets versus wave-driven longshore currents at river mouths[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 708258.
- [48] REYNOLDS A D. Variability in fluvially-dominated, fine-grained, shallow-water deltas[J]. *Sedimentology*, 2022, 69(7): 2779-2813.
- [49] WARRICK J A. Littoral sediment from rivers: patterns, rates and processes of river mouth morphodynamics[J]. *Frontiers in*

- Earth Science, 2020, 8: 355.
- [50] MESELHE E, SADID K, KHADKA A. Sediment distribution, retention and morphodynamic analysis of a river-dominated deltaic system[J]. *Water*, 2021, 13(10): 1341.
- [51] TAN C, HUANG B S, LIU F, et al. Recent morphological changes of the mouth bar in the Modaomen Estuary of the Pearl River Delta: causes and environmental implications[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 181: 104896.
- [52] 刘锋, 陈沈良, 周永东, 等. 黄河2009年调水调沙期间河口水动力及悬沙输移变化特征[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 1-8. (LIU F, CHEN S L, ZHOU Y D, et al. Effect of water-sediment regulation in Yellow River on hydrodynamics and suspended sediment transport in its estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 1-8. (in Chinese))
- [53] 于永贵, 石学法, 迟万清, 等. 调水调沙期间黄河河口羽状流的逐时变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 41-51. (YU Y G, SHI X F, CHI W Q, et al. Hourly change in sediment plume at the Yellow River Mouth during the water-sediment regulation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 41-51. (in Chinese))
- [54] 李庆余, 王爱美, 吴晓, 等. 调水调沙影响下黄河河口泥沙异重流过程[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(8): 52-63. (LI Q Y, WANG A M, WU X, et al. Water and sediment regulation of the Yellow River and its impact on hyperpycnal flow in the estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(8): 52-63. (in Chinese))
- [55] 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, 50(23): 2656-2662. (WANG H J, YANG Z S, BI N S, et al. The rapid swing of the mainstream of the estuary into the sea during the water and sediment regulation of the Yellow River in 2005[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(23): 2656-2662. (in Chinese))
- [56] YANG S L, MILLIMAN J D, LI P, et al. 50 000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1/2): 14-20.
- [57] WANG H J, WANG A M, BI N S, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17-32.
- [58] 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变初探[J]. *人民黄河*, 1979, 1(3): 30-42. (PANG J Z, SI S H. Preliminary study on the evolution of the Yellow River Estuary[J]. *Yellow River*, 1979, 1(3): 30-42. (in Chinese))
- [59] 李泽刚. 黄河口治理与水沙资源综合利用[J]. *海岸工程*, 2000, 19(4): 26-32. (LI Z G. Yellow River Mouth regulation and comprehensive utilization of water and sand resources[J]. *Coastal Engineering*, 2000, 19(4): 26-32. (in Chinese))
- [60] PENG J, CHEN S L. Response of delta sedimentary system to variation of water and sediment in the Yellow River over past six decades[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 613-627.
- [61] 李泽刚, 梁国亭. 建设西河口水利枢纽稳定黄河口入海流路[C]//第九届全国海岸工程学术讨论会论文集. 青岛: 海洋出版社, 1999, 45-82. (LI Z G, LIANG G T. Constructing the Xihekou water conservancy hub to stabilize the Yellow River Estuary's flow into the sea[C]//Proceedings of the 9th National Symposium on Coastal Engineering. Qingdao: China Ocean Press, 1999, 45-82. (in Chinese))
- [62] 李希宁, 刘曙光, 李从先. 黄河三角洲冲淤平衡的来沙量临界值分析[J]. *人民黄河*, 2001, 23(3): 20-21, 45. (LI X N, LIU S G, LI C X. Analysis of critical value of inflow sediment for keeping the erosion and sedimentation balance in the Yellow River Delta[J]. *Yellow River*, 2001, 23(3): 20-21, 45. (in Chinese))
- [63] 许炯心. 黄河三角洲造陆过程中的陆域水沙临界条件研究[J]. *地理研究*, 2002, 21(2): 163-170. (XU J X. A study of thresholds of runoff and sediment for the land accretion of the Yellow River Delta[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 163-170. (in Chinese))
- [64] WANG S J, HASSAN M A, XIE X P. Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River Delta[J]. *Catena*, 2006, 65(3): 302-314.
- [65] 郭文. 基于遥感的黄河三角洲海岸带淤蚀变化及其水沙阈值研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (GUO W. Research on the change of erosion and siltation in the coastal zone and threshold of water and sediment of Yellow River Delta based on remote sensing[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese))
- [66] FAGHERAZZI S, EDMONDS D A, NARDIN W, et al. Dynamics of river mouth deposits[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 642-672.
- [67] LI G X, WEI H L, YUE S H, et al. Sedimentation in the Yellow River Delta: part II: suspended sediment dispersal and depo-

- sition on the subaqueous delta[J]. *Marine Geology*, 1998, 149(1/2/3/4): 113-131.
- [68] LI H W, YANG Q S, MO S H, et al. Formation of turbidity maximum in the modaomen estuary of the Pearl River, China: the roles of mouth bar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(12): C018766.
- [69] GONG W P, ZHANG G, ZHANG H, et al. The effects of mouth bar on salt intrusion in a partially mixed estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128261.
- [70] 王恺忱. 黄河河口与下游河道的关系及治理问题[J]. *泥沙研究*, 1982(2): 1-10. (WANG K C. Relation between the Lower Yellow River and the estuary and its regulation[J]. *Journal of Sediment Research*, 1982(2): 1-10. (in Chinese))
- [71] 王恺忱, 王开荣, 陈孝田, 等. 黄河河口对下游河道反馈影响研究[J]. *人民黄河*, 2008, 30(1): 18-21, 80. (WANG K C, WANG K R, CHEN X T, et al. Study on influence of the Yellow River Estuary to feedback of the lower channel[J]. *Yellow River*, 2008, 30(1): 18-21, 80. (in Chinese))
- [72] 曹文洪. 黄河口三角洲演变及其反馈影响的研究[J]. *泥沙研究*, 1997(4): 1-6. (CAO W H. Study on evolution of the Yellow River Delta and its reactions[J]. *Journal of Sediment Research*, 1997(4): 1-6. (in Chinese))
- [73] 王崇浩, 张世奇, 曹文洪. 黄河口演变对下游河道反馈影响的计算研究[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(9): 16-20, 31. (WANG C H, ZHANG S Q, CAO W H. Study on response of evolution of Yellow River Mouth on its trail channel[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(9): 16-20, 31. (in Chinese))
- [74] 曹文洪, 胡春宏, 姜乃森, 等. 黄河口拦门沙对尾间河道反馈影响的试验研究[J]. *泥沙研究*, 2005(1): 1-6. (CAO W H, HU C H, JIANG N S, et al. Experimental study on reactions of mouth bar of the Yellow River on the upstream river channel[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(1): 1-6. (in Chinese))
- [75] 杨洋, 陈沈良, 徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13-25. (YANG Y, CHEN S L, XU C L. Morphodynamics and tidal flow asymmetry of the Huanghe River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 13-25. (in Chinese))
- [76] WANG C, TEMMERMAN S. Does biogeomorphic feedback lead to abrupt shifts between alternative landscape states: an empirical study on intertidal flats and marshes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(1): 229-240.
- [77] XUE L, LI X Z, YAN Z Z, et al. Native and non-native halophytes resiliency against sea-level rise and saltwater intrusion[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 806(1): 47-65.
- [78] KIRWAN M L, GUNTENSPERGEN G R. Feedbacks between inundation, root production, and shoot growth in a rapidly submerging brackish marsh[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(3): 764-770.
- [79] ZHENG Z S, ZHOU Y X, TIAN B, et al. The spatial relationship between salt marsh vegetation patterns, soil elevation and tidal channels using remote sensing at Chongming Dongtan Nature Reserve, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(4): 26-34.
- [80] GE Z M, WANG H, CAO H B, et al. Responses of eastern Chinese coastal salt marshes to sea-level rise combined with vegetative and sedimentary processes[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28466.
- [81] 冯虹毓. 互花米草入侵扰动下滨海湿地地表高程变化的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2020. (FENG H Y. The study on the surface elevation change with the spartina alterniflora invasion in coastal wetlands of China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2020. (in Chinese))
- [82] FAN Y S, YU S B, WANG J H, et al. Changes of inundation frequency in the Yellow River Delta and its response to wetland vegetation[J]. *Land*, 2022, 11(10): 1647.
- [83] RIETKERK M, van de KOPPEL J. Regular pattern formation in real ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(3): 169-175.
- [84] 葛振鹏, 刘权兴. 整体大于部分之和: 生态自组织斑图及其涌现属性[J]. *生物多样性*, 2020, 28(11): 1431-1443. (GE Z P, LIU Q X. More than the sum of its parts: self-organized patterns and emergent properties of ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28(11): 1431-1443. (in Chinese))
- [85] 周怡, 张荷悦, 孙涛, 等. 底栖生物影响下的潮滩微地貌演化数值模拟[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2024-2033. (ZHOU Y, ZHANG H Y, SUN T, et al. Numerical simulation of micro-geomorphic evolution under the influence of benthic organisms in a tidal flat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 2024-2033. (in Chinese))
- [86] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼滩生物动力地貌演变研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 470-484. (ZHOU Z,

- CHEN L, LIN W B, et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 470-484. (in Chinese)
- [87] 张荷悦,周怡,孙涛,等. 潮滩生物-物理互馈机制与系统稳态效应研究进展[J]. *科学通报*, 2023, 68(5): 457-468. (ZHANG H Y, ZHOU Y, SUN T, et al. Advances in biophysical feedbacks and the resulting stable states in tidal flat systems [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(5): 457-468. (in Chinese))
- [88] KIRWAN M L, MURRAY A B. A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(15): 6118-6122.
- [89] LE HIR P, MONBET Y, ORVAIN F. Sediment erodability in sediment transport modelling: can we account for biota effects? [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(8): 1116-1142.
- [90] 侯庆志,陆永军,王建,等. 河口与海岸滩涂动力地貌过程研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 286-294. (HOU Q Z, LU Y J, WANG J, et al. Advances in morphodynamics of estuarine and coastal mudflats[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 286-294. (in Chinese))
- [91] 胡春宏,张治昊. 水沙过程变异条件下黄河口拦门沙的演变响应与调控[J]. *水利学报*, 2006, 37(5): 511-517, 524. (HU C H, ZHANG Z H. Evolution and control of estuary sandbar in Yellow River responding to variation of flow-sediment condition[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5): 511-517, 524. (in Chinese))
- [92] 赵海镜,胡春宏,陈绪坚. 流域水沙资源优化配置研究综述[J]. *水利学报*, 2012, 43(5): 520-528. (ZHAO H J, HU C H, CHEN X J. Summarization of researches on optimal deployment of water and sediment resources in basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(5): 520-528. (in Chinese))
- [93] 陈绪坚,胡春宏,陈建国. 黄河干流泥沙优化配置综合评价方法[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 585-592. (CHEN X J, HU C H, CHEN J G. Method for comprehensive evaluation of sediment optimal allocations in the mainstream of Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 585-592. (in Chinese))
- [94] 钱宁,张仁,赵业安,等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. *地理学报*, 1978, 33(1): 13-24. (QIAN N, ZHANG R, ZHAO Y A, et al. Water and sediment regulation in river regulation from the evolution law of the Lower Yellow River bed[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(1): 13-24. (in Chinese))
- [95] 廖义伟. 黄河水库群水沙资源化联合调度管理的若干思考[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2004, 2(1): 1-7. (LIAO Y W. New concept and practice in joint regulation of reservoir groups on the Yellow River by regarding flood and sediment as resources[J]. *Journal of China Institute of Water*, 2004, 2(1): 1-7. (in Chinese))
- [96] 练继建,胡明罡,刘媛媛. 多沙河流域水沙联调多目标规划研究[J]. *水力发电学报*, 2004, 23(2): 12-16. (LIAN J J, HU M G, LIU Y Y. Research of multi-objective operation of water and sand in reservoir on sandy river[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2004, 23(2): 12-16. (in Chinese))
- [97] 胡春宏,陈绪坚. 流域水沙资源优化配置理论与模型及其在黄河下游的应用[J]. *水利学报*, 2006, 37(12): 1460-1469. (HU C H, CHEN X J. Optimal deployment theory and mathematical model of water and sediment resources in basin and their applications in the Lower Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(12): 1460-1469. (in Chinese))
- [98] 胡春宏,陈绪坚,陈建国,等. 黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅰ):理论与模型[J]. *水利学报*, 2010, 41(3): 253-263. (HU C H, CHEN X J, CHEN J G, et al. Research on optimal spatial allocation of sediment in main channel of Yellow River: I: theory and model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(3): 253-263. (in Chinese))
- [99] 胡春宏. 黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅱ):潜力与能力[J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 379-389. (HU C H. Research on optimal spatial allocation of sediment in main channel of Yellow River: II: potential and capacity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 379-389. (in Chinese))
- [100] 胡春宏,陈绪坚,陈建国,等. 黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅲ):模式与方案[J]. *水利学报*, 2010, 41(5): 514-523. (HU C H, CHEN X J, CHEN J G, et al. Research on optimal spatial allocation of sediment in main channel of Yellow River: III: allocation modes and schemes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(5): 514-523. (in Chinese))
- [101] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1026-1037. (JIANG E H, WANG Y J, TIAN S M, et al. Exploration of watershed system science[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1026-1037. (in Chinese))

- [102] WARRICK J A, STEVENS A W, MILLER I M, et al. World's largest dam removal reverses coastal erosion[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13968.
- [103] NARDIN W, EDMONDS D A, FAGHERAZZI S. Freshwater vegetation influence on sediment spatial distribution in river delta during flood[C]//*The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*. San Diego, USA: World Scientific, 2015: 765-775.
- [104] 王煜, 彭少明, 尚文绣, 等. 基于水-沙-生态多因子的黄河流域水资源动态配置机制探讨[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 534-543. (WANG Y, PENG S M, SHANG W X, et al. Study on the dynamic allocation mechanism of water resources in the Yellow River basin considering runoff, sediment and ecosystem[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 534-543. (in Chinese))
- [105] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 614-624. (WANG Y, PENG S M, ZHENG X K. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 614-624. (in Chinese))

Research progress on hydrology-geomorphology-ecology system evolution and multidimensional regulation in Yellow River Delta *

FAN Yaoshen¹, DOU Shentang¹, YU Shoubing¹, WANG Guangzhou¹, WU Yan¹, XIE Weiming²

(1. *Key Laboratory of Yellow River Channel and Estuary Regulation of MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China*; 2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China*)

Abstract: The estuarine delta is a complex system formed by the coupled interactions of hydrology, geomorphology, and ecology. The evolution of the estuarine delta is characterized by strong spatiotemporal fluctuations, high sensitivity to disturbances, significant edge effects, and high environmental heterogeneity, making it a typical unstable region. From the perspectives of the evolution process of hydrology-geomorphology-ecology system, the coupling relationships, multidimensional regulation theories and techniques of the Yellow River Delta, this study elucidates the adaptive adjustment and state characteristics of the hydrology-geomorphology-ecology subsystem under multiple pressures. This study also summarizes the mutual feedback relationship between hydrological conditions and the evolution of the estuarine geomorphology-ecology system. In addition, this study establishes a multidimensional collaborative research framework for water and sediment allocation and proposes a multidimensional regulation strategy based on optimized water and sediment allocation. In response to current research gaps, key directions for future research are proposed, including the construction of continuous monitoring platforms, the building of whole-process models, the prediction of imbalance risks, and the study of multidimensional regulation theories and techniques. These efforts aim to provide scientific support for optimizing the use of limited water and sediment resources to maintain the stability of the estuarine system.

Key words: hydrology-geomorphology-ecology; evolution process; coupling relationship; mutual feedback relationship; multidimensional regulation; Yellow River Delta

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2243207) and the Science Foundation of Henan Province, China (No. 232300421017).