

弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展

陆永军¹,赵雅慧^{1,2},左利钦¹,刘红军³,黄廷杰¹,吴攀¹,张旭辉¹,白玉川²

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210029;
2. 天津大学河流海岸工程泥沙研究所,天津 300350; 3. 江苏省灌溉总渠管理处,江苏 淮安 223200)

摘要:弱混合陆相河口易受流域来水来沙、外海动力及人类活动的多重影响,其水文连通性呈复杂的动态变化特征,而该类河口水文连通性研究尚缺乏系统总结。为此,以我国典型弱混合陆相河口三角洲——黄河三角洲为例,基于结构连通性和功能连通性分类,分析了黄河三角洲滩涂湿地水文连通性时空分布特征、演变趋势、影响因素等,重点探讨了水文连通性与水沙变化的互馈关系。指出了未来的研究方向:整合河流、潮沟及地表地下水系,构建覆盖滩涂湿地全域的多尺度融合水文连通性框架;强化实地观测与数学模型的协同分析,系统解析弱混合陆相河口三角洲水文连通性与水沙情势的互馈机制;探索基于自然-社会的水文连通性提升路径,构建适配水文连通性提升与湿地生态功能修复的协同优化方案,为基于自然-社会的河口综合治理提供实践范式。

关键词:弱混合陆相河口;水文连通性;结构连通性;功能连通性;黄河三角洲;河口滩涂湿地

中图分类号:TV148 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)05-0129-12

Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas//LU Yongjun¹, ZHAO Yahui^{1,2}, ZUO Liqin¹, LIU Hongjun³, HUANG Tingjie¹, WU Pan¹, ZHANG Xuhui¹, BAI Yuchuan²(1. *National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Institute for Sedimentation on River and Coastal Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*; 3. *General Irrigation Canal Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223200, China*)

Abstract: Weakly mixed land-dominated estuaries are susceptible to the combined influences of fluvial water-sediment fluxes, marine dynamics, and anthropogenic activities, resulting in complex dynamic changes in hydrological connectivity. However, a systematic synthesis of hydrological connectivity in such estuaries is still lacking. Therefore, taking the Yellow River Delta, a representative weakly mixed land-dominated estuary in China, as an example, based on the classification of structural connectivity and functional connectivity, the spatiotemporal patterns, evolutionary trends, and driving factors of hydrological connectivity in tidal flat wetlands were analyzed, and the bidirectional feedback mechanisms between the hydrological connectivity and water-sediment dynamics were emphatically explored. It is pointed out that future research should focus on three directions, including integrating rivers, tidal creeks, and surface-groundwater systems to establish a multi-scale hydrological connectivity framework for entire tidal flat wetlands, enhancing synergistic analysis of field monitoring and numerical models to systematically analyze the feedback mechanisms between hydrological connectivity and water-sediment dynamics in weakly mixed estuaries, exploring nature-based and society-based solutions to improve hydrological connectivity, and establishing synergistic optimization strategies that concurrently enhance hydrological connectivity and restore wetland ecological function, thereby providing practical paradigms for integrated estuary management.

Key words: weakly mixed land-dominated estuary; hydrological connectivity; structural connectivity; functional connectivity; Yellow River Delta; estuarine tidal flat wetlands

水文连通性源自“河流连续体”^[1]概念,表征水文过程中物质与能量的交换程度,涉及水文学、生态学、地理学等多门学科。作为当前研究的热点之一,其对于维持生态功能和优化水系格局具有重要作

用。对水文连通性进行量化评估,有利于理解湿地水文系统的变化过程,量化水文运输过程的关联程度,评估水文系统的修复潜力。因此,水文连通性研究对于优化水系格局、改善区域水沙调配、提升生态

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3204300);国家自然科学基金项目(U2443220)
作者简介:陆永军(1964—),男,研究员,博士,主要从事泥沙及河流海岸动力学研究。E-mail:yjlu@nhri.cn
通信作者:赵雅慧(1997—),女,博士研究生,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:zhao1060564527@tju.edu.cn

功能等具有重要意义。进入 21 世纪,Liu 等^[2-5]从水文连通性的应用需求出发,关注水文连通性与水文循环及生态过程的关系,开展了河湖水系连通性定性和定量研究,强调了河湖水系连通性的自然和社会双重属性。夏继红等^[6]从景观学、生态学、水文学及河流动力学等角度出发,考虑河湖水系的平面网状特征与功能性,提出了一系列水系连通性定量计算方法,并不断推动计算方法向多尺度、多维度及多要素耦合方向发展。这些方法的实际应用深化了人们对水文连通性的特征演变、影响机制、应用途径等的认识,并拓展了河湖水系连通性的研究方法^[7-8]。

河口三角洲滩涂湿地作为海陆交互地区,地理位置重要,水文条件复杂,自然资源价值高,人口集中且经济发展水平较高,对人类活动、地面沉降、区域水资源管理、全球海平面上升和极端气候带来的风险高度敏感^[9]。全球河口三角洲正面临海岸侵蚀、岸线退化、生态多样性破坏等威胁^[10],其中弱混合陆相河口是重要的河口类型之一。根据注入河口的径流水沙量与潮流水沙量之比的大小,将潮流作用相对较弱、径流作用相对较强、径流携带大量泥沙抬高河床而形成的河口三角洲称为弱混合陆相河口三角洲^[11]。弱混合陆相河口咸淡水混合程度较低,存在明显的交界面,如我国黄河口、珠江口,美国密西西比河河口等。强混合海相河口潮差显著,潮流作用较强,径流作用较弱,潮流挟沙成为塑造河床和物质输移的主导力量,例如我国钱塘江河口,由于潮流冲刷侵蚀作用强烈河口三角洲不发育。当径流输沙与潮流来沙共同参与河口造床时(如我国长江口、珠江伶仃洋河口等),这类河口属于缓混合陆海双相河口,其河床发育成熟,河槽容积较大,河床发育呈现“洪淤枯冲”的显著规律^[12]。从水文连通性的角度来看,由于弱混合陆相河口水流受径流和潮流共同影响,河口河床演变呈径流携沙塑造为主、潮流输沙为辅的特点,滩涂湿地内部及与周围环境之间持续进行着物质输移、能量流动、信息交换等,其水文连通发展具有独特性^[13-14]。区别于内陆河湖水系连通性,弱混合陆相河口三角洲滩涂湿地的水文连通性具有以下显著特性:径流主导型水沙输移导致河口周期性淤积延伸与摆动改道,咸淡水界面、水沙通量突变界面及水陆交互界面的三重临界作用导致水文连通性呈强时空动态特性,且与人类活动呈强关联性^[15]。

黄河三角洲是我国典型的弱混合陆相河口,具有复杂的水系网络,河流与海洋、水系与潮滩间持续进行着水沙、能量及物质的交换^[16],孕育了我国暖

温带地区新生湿地生态系统^[17]。近年来,黄河三角洲水文连通性变化特征及影响因素,以及水文连通性提升等问题逐渐成为研究热点。目前研究聚焦于以下 3 个方面:①空间大尺度潮沟形态的发育、演变、分布及多维度水文连通特征分析^[18-21];②基于水文、土壤和地形等特征的水文连通参数量化研究^[2,16-21];③从空间结构尺度探究水文连通的生态效应等。黄河水少沙多,河口海洋动力相对较弱,进入河口的泥沙难以全部输送到外海,致使河口长期处于淤积、延伸、摆动、改道的频繁变动状态。当前黄河三角洲面临潮滩面积周期性变化、水沙关系变化频繁、湿地破碎化显著、自然湿地比重逐渐减少等问题,认识并量化现有河网水系结构与水文连通情况,是应对未来来水来沙条件改变、合理配置黄河口水沙关系、维持地貌稳定与生态平衡的重要理论基础。

本文首先介绍了河口水文连通性的定义及研究方法,结合弱混合陆相河口三角洲特点,着重综述黄河三角洲水文连通性研究现状、变化特征及影响因素,针对目前黄河三角洲水文连通性研究的不足,提出未来研究展望,为变化环境下弱混合陆相河口三角洲水文连通性变化特征分析提供参考。

1 河口三角洲水文连通性的定义与研究方法

1.1 定义与分类

水文连通性是指河流水系以水文过程为媒介,实现物质、能量和生物运输的属性^[22],其在生态、景观、水文等学科中得到广泛应用。根据其定义与功能可以划分为两类^[7]:水文结构连通性(静态)与水文功能连通性(动态)。水文结构连通性即河道径流、水库、潮沟、湖泊等水体景观在空间尺度上的连续性,反映了物理空间结构的静态连续性^[20,23-29];水文功能连通性是指在时间尺度上,水文连通的空间格局和流域过程相互作用所形成的物质、能量及生物输移能力的动态变化,反映的是一种动态运输过程^[30-32]。从时空格局的角度看,水文连通性可以划分为 4 个维度^[33]:1 个时间维度和 3 个空间维度。从河口三角洲角度看,其水文连通性的空间维度可划分为三类:河漫滩/洪泛区-河流的横向连通、源头-径流/潮流-河口的纵向连通以及地表水-地下水的垂向连通。河口三角洲水文连通性如图 1 所示。

弱混合陆相河口三角洲滩涂湿地由于受到径流与潮流双重作用,人类活动影响剧烈,具有复杂的水文环境,水文连通动态性相对更强^[32]。滩涂湿地水文连通性与河湖水系的差异主要表现在以下三方面:①河口持续发生淤积延伸与周期性摆动改道,致

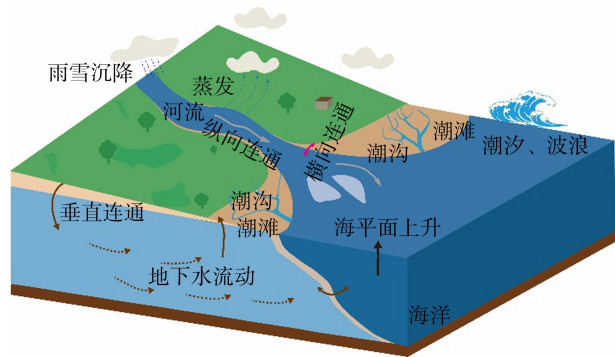


图1 河口三角洲水文连通性示意图

使河口地貌形态呈现剧烈的动态变化,输沙过程也表现出显著的不稳定性;②咸淡水交界面、径流与潮流汇流界面及水沙通量突变界面的多界面耦合作用,导致水文连通性呈现强烈的时空动态变化特征^[34-36];③滩涂湿地生境破碎化程度受人类活动影响显著,需要考虑湿地景观类型之间的相互连通^[32]。

1.2 研究方法与评价指标

水文连通性定量研究方法及评价指标见表1。结构连通性评价方法主要有图论法^[6]、连通性指数法^[7]、景观法等。其中,图论法需对河流潮沟系统进行点-边分割,选取分割算法,并确定节点与边的方向等^[6],在流向受潮汐影响且河流潮沟尺度差异较大的河口湿地中较难应用。结构连通性评价指标包括连通度、水系结构特征指数、经典连通性指数和景观连通性指数。由于结构连通性是一种静态的水文连通性,忽略了水系的流向与物质输运问题,因而功能连通性才是水文连通性的核心评价内容。功能连通性包括水、沙、碳、氮、磷等物质与能量的传递,以及垂向地下水与地表水的交换、土壤含盐量等的

变化过程。常用的评价方法有原位检测法^[28]、水文-水动力模型法^[35-36]等。评价指标有排水量、水体淹没频率、地表-地下水连通性、流量连通性、输沙连通性、SOC 质量分数以及 TN 质量分数等。

河口三角洲水文连通性的评估需依据评估对象、时空尺度等选取适配指标,且需综合运用多种指标与方法。为此,学者们常将图论法、连通性指数法的指标,应用于多尺度、多因素、多功能的水文连通性综合评价中。

现有研究存在两方面局限:一是评估方式较为单一,多依赖单一指标分析水系结构,忽视水流运动状态,难以全面反映连通性特征^[23];二是传统水力学方法数据需求大、获取困难且计算烦琐^[23-24]。近年来,学者们开始转向多方法集成研究,通过融合多学科视角、集成多技术手段、耦合多计算方法,结合河口三角洲多尺度、多要素特性,构建综合定量评价指标体系^[6,39,51]。针对弱混合陆相河口三角洲,需兼顾地貌特征与水文过程,筛选具有区域适配性的评价方法。

2 黄河三角洲水文连通性特征研究现状

2.1 河流水系和潮沟变化特征

文中黄河三角洲(37°20′~38°10′N, 118°20′~119°20′E)指1855年黄河改道以来,位于山东省东营市东北部黄河入海口处的新生潮滩部分,以宁海为顶点,西起套尔河口,南到支脉沟口,陆地面积约为5450 km²的近代黄河三角洲(图2)^[52]。黄河入海口处以上约30 km为黄河河口段,径流量与潮流量之比大于1.0,且泥沙主要来自流域,径流输沙量与潮流输沙量之比大于0.5,属于弱混合陆相型河

表1 水文连通性定量研究方法及评价指标

功能分类	研究方法	评价指标	用途
结构连通性	图论法	连通度 ^[37]	评估流域平面形态,适用于不同平面空间尺度,但计算较复杂,不适用于垂向连通性计算 ^[38-39]
	连通性指数法	水系结构特征指数:河网密度、水面率和河频率 ^[36] 、潮沟曲率、潮沟频数、潮沟密度、潮沟分汉率 ^[40]	计算平面空间尺度上水系潮沟的形态、结构复杂度,为区域纵向结构连通性的定量评估提供依据
		经典连通性指数:实际成环率 α 、边节点比 β 、实际连接率 γ ^[40]	基于水系形态结构的定量评估,计算水文结构连通性
功能连通性	景观法	景观连通性指数:哈拉里指数 H ^[41] 、景观巧合概率(LCP)、整体连通性指数(IIC) ^[42] 、可能连通性指数(PCI) ^[43] 和斑块重要性指数(dic) ^[44]	以景观斑块为单位,综合评估景观斑块间的结构连通性,从而判断景观斑块对于整体水文连通性的重要性
	原位监测法(示踪法)	排水量、水力示踪剂通量 ^[45] 、土壤有机碳(SOC)质量分数、土壤总氮(TN)质量分数、土壤含盐量 ^[46]	通过水力示踪剂或土壤因素的时空分布特征定量评估水体纵向、横向与垂向的功能连通性
	水文-水动力模型法	地表径流连接率、地形指数、网络指数 ^[27] 、水体淹没频率 ^[47] 、径流量、地表-地下水连通性 ^[48] 、流量连通性 Q 、输沙连通性 S ^[49]	考虑地表地貌、平面形态、水文过程、水流阻力、陆地与河流连接过程,定量评估水文纵向与横向功能连通性
综合评价	综合评价法	从形态、结构、功能多方面选取适宜指标构建综合定量评价指标体系 ^[50-51]	综合评价大区域水文连通性,为河流湿地综合管理决策提供依据 ^[6]

口。1855—1976 年入海流路为北部刁口河流路,1976 年入海流路改为南部清水沟流路,1996 年至今经清 8 汉河入海,形成现行入海流路。黄河水少沙多,长期处于淤积、延伸、摆动、改道的频繁变化状态,因而黄河三角洲河口湿地成为我国暖温带面积最大、增长速度最快的新生河口滩涂湿地^[32,53]。黄河三角洲河口湿地具有一系列独特特征:咸淡水混合程度较低且存在明显分界面;地貌演化速度快,沉积作用强烈;作为海陆过渡区,兼具陆地与海洋生态系统的双重属性;生态系统脆弱,易受自然与人为因素干扰。

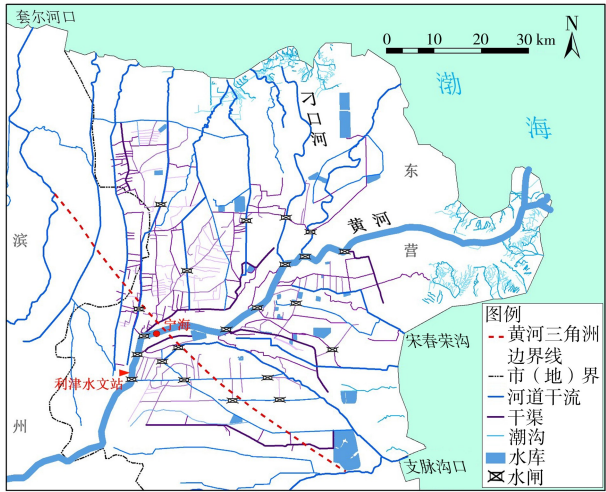


图 2 黄河三角洲主要河流水系及区域划分

除黄河现行流路外,流域面积 50 km² 以上的河流有 39 条,平均河网密度为 0.16 km/km²,包括黄河故道和小岛河、排水沟渠等人工河道^[23]。黄河河口区域自然水系多呈单一线型,沿河流纵向延伸入海。20 世纪七八十年代,通过人工开挖的排碱沟将这些自然水系进行横向连接,最终演变成如今的树状结构河流水网。黄河口湿地流域的河流水系除表现出陆地径流干枯季特征以外,还受海洋潮汐影响,潮汐特点为月中会出现大小潮交替,日中则存在涨落潮周期^[23]。河道径流量主要集中于汛期 7—9 月,其主要特征为汇流面积小,河源短,且地表径流含沙量和含盐量均较高^[54]。

黄河三角洲地势总体较为平缓,潮滩广阔,形成和发育了大量潮沟,这些潮沟纵横交错,网状结构明显。潮沟水系的等级与数量变化受黄河改道与流域来水来沙变化影响,呈现明显的时空差异^[55]。空间尺度上,潮沟聚集区域随黄河河道改道而迁移,河道两侧节点密集,潮滩区域水系网络均呈树枝状分布;北部刁口河黄河故道区域潮沟分布较为稀疏,潮沟密度较低^[39];南部现行入海口区域潮沟分布密集且分支众多,2022 年潮沟密度约为 1.1 km/km²^[56]。

时间尺度上,1986—2022 年间黄河三角洲潮沟水系总面积提升了 36.01%^[56]。

2.2 水文结构连通性变化

2.2.1 经典连通性指数

黄河三角洲作为新生湿地系统,因演化历史较短,湿地资料较少,学者们大多利用卫星遥感图像,结合野外观测资料,补充完善河网潮沟的水文、地形等数据。在经典连通性指数中, α 表征河网水系实际成环水平,取值范围 0~1,其值越大连通性越好; β 表征河网内部复杂程度,取值范围 0~3,其值越大河网内部结构越复杂; γ 表征河网水系不同节点之间的实际连通程度,取值范围 0.3~1.0,当 γ 无限接近 0.3 时,网络呈树状结构,当 γ 无限接近 1.0 时,网络为最大网络平面。

2022 年黄河三角洲区域整体河流水网的 α 、 β 、 γ 值分别为 0.14、1.28、0.43,根据平原水网的 α 、 γ 划分标准, $\alpha+\gamma$ 评分等级为“一般连通”水平^[56]。1976 年刁口河流路改道后,1985—2015 年水系连通复杂程度与结构连通性指数逐年增大,尤其是 2010—2015 年水文连通性改善最为显著。1985—2015 年水系节点数目和河道数目逐年增多,节点数从 61 个增加到 136 个,增长率为 123.0%;河道数目从 69 条增加到 178 条,增长率为 158.0%^[23]。区域整体河流水网的 β 、 γ 平均值大于南部现行入海口清水沟流域^[49]。1995—2019 年清水沟南部围垦导致潮滩面积减少了 11.3%,经典连通性指数呈波动下降趋势,但数值较小且变化率不大,表明潮沟发育初期呈单一线性发育,网络化程度不高,且潮滩面积的变化也在一定程度上降低了结构连通性^[56-57]。

2.2.2 景观连通性指数

景观法将流域各部分划分为不同性质的斑块,通过计算斑块间的连通性评估流域结构连通性^[58]。在各项景观连通性指数中,IIC 和 PCI 是评估黄河三角洲景观连通性的常用指标^[23,59],两者取值范围均为 0~1,数值越大连通性越好^[43]。 H 表征任意两节点的连通概率, H 值越大,两点之间的连通路径越多,水文连通性越好。LCP 为整个研究区景观巧合概率之和,LCP 值越大,表示随机选取的两条径流属于同一景观类型的可能性越高,即区域水文连通性越好。

1985—2015 年黄河三角洲区域景观连通性指数显著增大,其中 H 值从 352.25 提升至 1458.04;LCP 值从 0.10 提升至 11.78;IIC 值从 0.06 提升至 2.59。现行入海口区域景观指数年内变化趋势与水文变化趋势一致,随流量增大而提高,年内变化幅度较大,其中,IIC 值约为 0.1~0.4,PCI 值约为 0.1~

0.5^[59]。dIC 分布有明显的季节性变化,同时期不同湿地斑块的重要性指数跨度较大;枯季高重要性水体斑块集中于近海潮滩、主潮沟、二级次潮沟等区域;洪季以高重要性河道为中心,周围湿地水体斑块重要性均有所上升。空间尺度上,高重要性湿地主要分布在潮滩靠海区域和主潮沟,中重要性湿地分布在现行入海口南岸恢复区及近海潮滩,潮滩内部多为低重要性湿地。

综上,黄河三角洲滩涂湿地整体水文结构连通性为“一般连通”水平^[58],北部岸带区域略优于清水沟现行入海口。区域内水系潮沟网络多呈树状发育,以单线型连接为主,成环率较低^[39]。景观连通性呈现明显季节性变化,年际间逐年增强,且从内陆向近海潮滩区域逐渐提升。

2.3 水文功能连通性变化

本文以水体淹没频率、流量通量性和输沙通量性为功能连通性指标,表征黄河三角洲功能连通性的时空演变特征。图 3 为 2019 年黄河入海口水体淹没频率分布,图 3 表明黄河入海口水体淹没频率的空间分布呈现显著梯度:潮汐区从潮滩边缘向内部递减,潮滩边缘水文连通频率为 80%~100%;清水沟流路黄河南岸区域和主潮沟水体淹没频率较高,大部分区域在 45%~100%之间,南岸恢复区多为 100%;黄河故道靠近现行河道及恢复区的部分区域淹没频率亦达 100%^[59]。水动力数学模型计算结果表明,北部岸带潮滩淹没频率大于 80%,其水文连通性优于清水沟现行流路^[56]。以潮沟为尺度的水文连通梯度随潮沟形态变化而改变,潮沟断面流量大、潮滩高程低的区域水文连通性更好^[18]。

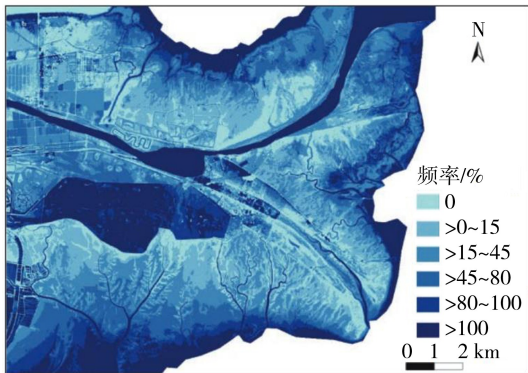
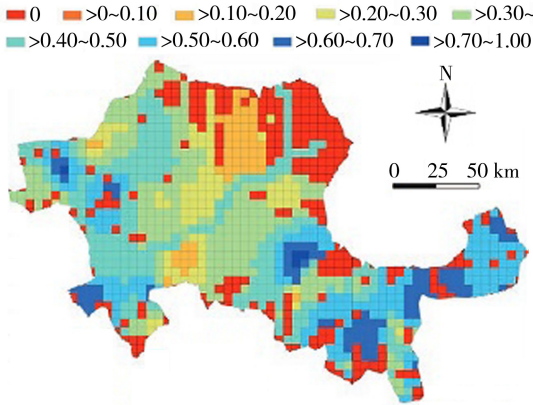


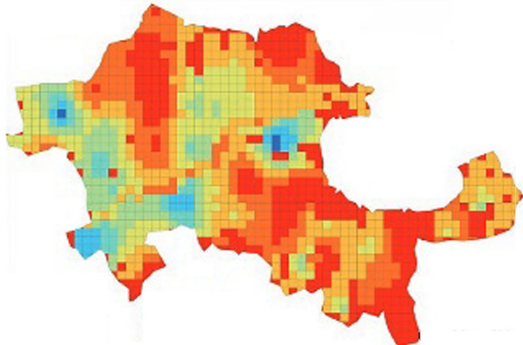
图 3 2019 年黄河入海口水体淹没频率分布

流量连通性与输沙连通性是通过网格划分研究区域,分别以年径流量、年输沙量的多年归一化值,在网格尺度上定量表征功能连通性的指标。图 4 给出了黄河三角洲流量连通性和输沙连通性的时空分布^[59]。2015 年黄河三角洲流量连通性均值为 0.12,输沙连通性均值为 0.16。北部刁口河故道区

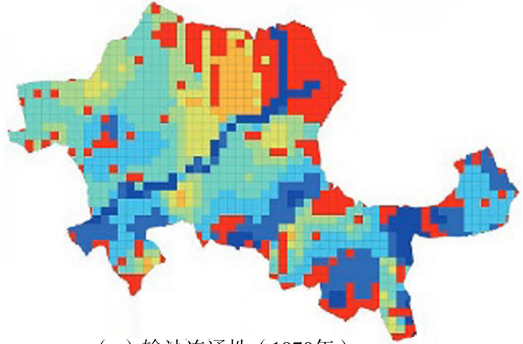
域,流量连通性网格数值及 60%的输沙连通性网格数值分布在 0.0~0.2 区间;现行入海口 55%的流量连通性网格数值分布在 0.1~0.2 区间,80%的输沙连通性网格数值分布在 0~0.2 区间^[49]。由此可见,空间尺度上,北部刁口河区域与现行入海口功能连通性差异不大,南部现行入海口的功能连通性略大于北部刁口河区域;时间尺度上,功能连通性呈下



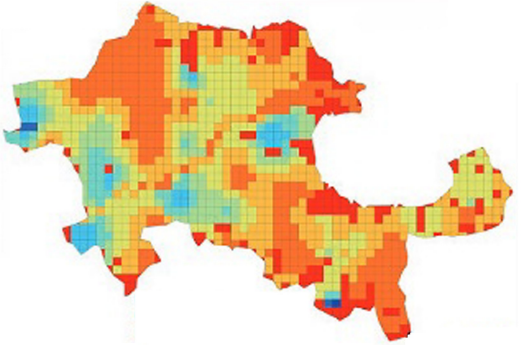
(a) 流量连通性 (1970年)



(b) 流量连通性 (2015年)



(c) 输沙连通性 (1970年)



(d) 输沙连通性 (2015年)

图 4 流量连通性与输沙连通性时空变化

降趋势,且年际间差异较大,1970 年、1985 年、2005 年和 2015 年流量连通性均值分别为 0.31、0.19、0.10、0.12;输沙连通性均值分别为 0.36、0.21、0.13、0.16。

黄河三角洲垂向连通性主要体现在土壤碳、氮、盐等物质通量随土壤深度的变化上。通过现场采样及原位监测法,在清水沟潮滩按 10 cm 间隔分层采集 0~40 cm 土壤样品,以确定相关因子通量的变化,并将其变化作为垂向连通性的评估指标。SOC 质量分数和 TN 质量分数计算结果表明,随着土层深度的增大,SOC 质量分数呈减小趋势,TN 质量分数也逐渐减小,0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层的 TN 质量分数下降率分别为 71.03%、58.76%、29.19%和 46.86%^[46]。可见,功能连通性在空间垂向尺度上随土壤深度的增大而降低。

综上,黄河三角洲功能连通性时空差异显著,随潮沟形态与潮滩高程呈梯度递减趋势,垂向连通性随土层深度呈非线性衰减,流量连通性与输沙连通性年际波动剧烈。现有研究存在以下不足:垂向连通性的评估多依赖单一物质通量指标,缺乏多因子耦合评估模型;评价方式以静态景观参数为主,缺乏对水沙动力过程的动态反馈;流域-河口-海洋系统的多尺度物质传输机制,以及径流-潮汐互馈作用下的泥沙输移机制模拟精度有待提高。

3 黄河三角洲水文连通性影响因素

3.1 流路变迁

“善决善徙”是黄河口的显著特征之一,流路频繁变迁对水文连通性的影响较大。1855—1934 年,黄河发生 6 次较大规模的自然改道,1964 年、1976 年和 1996 年又经 3 次人工引导改道,最终形成并维持清水沟流路,此为现行入海通道^[60]。目前研究多聚焦于这几次大的人工改道对黄河三角洲水文连通性的影响^[55,61]。流路变迁导致滩涂湿地面积变化,进而使水文连通性呈现区域性差异。1976 年黄河从刁口河改道清水沟,1996 年又从清水沟入海口附近向东北方向改汉,形成了北部黄河故道区域和南部现行入海口两大典型区域。其中,北部刁口河黄河故道区域湿地形成时间较长,潮滩及潮沟发育成熟;而现行清水沟流路在 1996—2015 年间节点数增长 122.95%,河道数增长 157.97%^[23],水系复杂程度提升,水文结构连通性增强。1976 年改道后形成的现行入海口区域,因历史较短,潮沟发育尚不成熟,且受人工改道影响剧烈^[46],水文连通性仍处于“一般连通”水平。目前关于流路变迁对

黄河三角洲水文连通性的影响机制,仍需进一步研究。

3.2 来水来沙条件

3.2.1 水沙变化

流域来水来沙量通过物质通量的变化主导着水文连通过程,水沙变化将直接影响湿地径流结构与径流物质输移能力。黄河整体水少沙多,受流域气候变化和人类活动影响,近 70 年入海水沙量持续减少,呈现“枯水少沙”趋势。20 世纪 60 年代三门峡、刘家峡水库投入使用后,1960—1985 年黄河入海水沙量急剧减小^[62-63],但来沙系数增大了 29.9%,含沙量上升^[64];1986 年入海径流量出现变异,至 2022 年水沙量持续下降,维持“枯水少沙”状态^[65]。研究显示,现行入海口区域结构连通性与含沙量负相关,与径流量正相关。自然条件下来沙系数增大可能导致潮滩面积扩大、水面率降低,进而使水文连通性下降。目前,水沙通量变化主导的功能连通性影响机制仍需深入研究。

3.2.2 降水量

流域水文连通性的时间变化受主河道上游集水区降水量的影响^[66]。以 2019 年为例,1—6 月为枯水期,降水量与径流流量较低,流域水文连通性较弱;5 月及 12 月受短期降水影响,在径流流量小且有少量稳定降水的情况下,流域水文连通性波动较大,可变性较高^[59]。2019 年 6 月下旬至 10 月为汛期,黄河下游出现洪水,8 月受台风“利奇马”影响,降水量和径流量显著增大,黄河河道两侧及潮滩的大面积斑块数量增多,斑块间结构和功能连通紧密,流域现有以及潜在水文连通性都较高^[67]。长期来看,全球气候变化引起大气环流和水文循环过程变化,导致水资源时空重新分配,加之海平面上升,造成地表径流、地下水储量和潮汐淹没范围波动,影响湿地水文条件和循环过程,进而影响水文连通性。

3.3 海洋动力

黄河口滩涂地位于海陆交互地带,属弱混合陆相型河口,其大潮平均潮差约为 1.6 m,多年平均潮差为 0.7~1.2 m,感潮段较短(潮区界一般不超过 30 km),潮汐类型主要为不正规半日潮,且存在潮汐不对称现象。黄河口海洋动力包括潮汐作用及波浪作用。潮汐的涨落潮过程影响主河道流量及潮滩淹没频率,从而影响滩涂湿地水文连通性。横向连通性方面,潮下带常年处于淹没状态,水文连通性较强;潮间带潮汐作用频繁,潮沟系统复杂,水文连通性中等;潮上带潮沟较细,淹没频率与斑块重要性较低,水文连通性较弱^[59]。垂向连通性方面,海水淹没会增大土壤孔隙水含盐量^[56],从而增强垂向连通

性,而孔隙水含盐量与垂向高程负相关,淹没频率越高的光滩区域,垂向连通性越好。目前,关于波浪作用影响下的岸滩侵蚀对水文连通性的影响机制研究相对较少。

3.4 植被覆盖

黄河三角洲滩涂湿地的典型植被包括芦苇、互花米草、翅碱蓬等。植被覆盖对水文连通性的影响首先体现在水动力环境的改变上;植被覆盖的区域水动力减弱,泥沙输移速度降低,阻碍了咸淡水等物质与能量的交换^[68-69],不利于潮滩与潮沟的发育,因而会降低结构连通性。但同时,植被可通过根系孔隙改善土壤渗透性,为生长区域地下蓄水层补充水源,对垂向水文连通起到积极作用^[46]。研究表明,互花米草入侵碱蓬群落后,不利于自然湿地斑块之间的连通性^[46],其群落面积、密度与潮沟长度呈显著负相关关系($P<0.05$),表明互花米草群落的扩张会抑制水沙传导,导致潮沟长度和密度减小,对潮沟发育有一定的阻碍作用。但植被覆盖率对功能连通性的影响需结合多指标综合分析,寻求使水文连通性最优的相对稳定的植被覆盖环境。目前,区域尺度上三角洲滩涂湿地植被与水文连通性的相互影响已明确^[70],但景观尺度(如植被景观、生态系统层次)上,植被覆盖对水文连通性的影响还需进一步研究。

3.5 人类活动

3.5.1 调水调沙

调水调沙对水文连通性的影响,主要体现在调水调沙前后高、中、低流量的出现频率与持续时间。径流量和输沙条件的变化直接影响水沙传输效率,即影响功能连通性的优劣^[71];通过调水调沙影响来沙系数,可改变黄河入海口冲淤及地貌,进而影响水系格局和结构连通性。2002年首次调水调沙后,河床过流能力增强,水流挟沙能力降低。2000—2017年黄河汛期平均入海水量、沙量相比1977—1985年分别减少了64.3%和88.6%,沙量减少更明显;2002—2018年年平均来沙系数由0.0661大幅降至0.0177,较自然阶段减小了8.8%,水沙配置大幅优化^[72]。2003年黄河入海口河道泥沙淤积得到缓解,河槽受到显著冲刷,河床高程降低,为潮沟发育提供了更强的水动力条件和更大的潮滩淹没空间,潮沟发育迅速,当年黄河三角洲全区域 α 、 β 和 γ 均显著偏小,表明潮沟发育初期连接环路少、分汊多,呈高线性连接和低环状连接网络特征,水文连通性仍较低^[39,46,73]。可见,通过调节流域内水沙条件,可使入海水文过程趋于平缓,促进潮沟及河流发育,

短期内结构连通性变化较小,功能连通性得到一定提升。

3.5.2 生态补水

生态补水是现有的水文连通性提升的主要途径,通过针对性工程,生态补水能有效缓解人类活动对水生态系统的压力,并在短期内显著提升功能连通性。黄河三角洲自然保护区于2003—2011年分阶段设立1.2万 hm^2 湿地恢复区,结合2008—2020年实施的生态补水工程(年均补水量3137万 m^3),生态补水流量达10~15 m^3/s ,引水时间为10~30d,实现水文良性循环^[74],使整体景观连通性有较大提升。后续实施的湿地、河流、滩涂、海洋多界面水文连通工程,可提高黄河三角洲区域水文连通性。但生态补水措施的长期有效性及其对水文连通性的提升效应,仍需进行长期监测。

3.5.3 道路堤坝建设

道路堤坝的建设会阻碍水系水文连通,不同的道路堤坝走向对水文连通的影响不同。道路堤坝的建设常伴随植被的破坏,会直接影响水系网络的发育以及地表、地下水的流动,进一步破坏结构及功能连通性。1995—2019年现行黄河入海口道路总长度为531.92~1460.52km,道路网络密度为0.71~2.09 km/km^2 ^[46]。Pearson相关性分析显示,道路长度、密度与潮沟长度显著负相关^[46],相关性系数分别为-0.818、-0.864;道路长度、密度与潮沟密度显著负相关,相关性系数分别为-0.893、-0.921,表明道路修建越多,潮沟发育越差。如图5所示,道路长度增大,清水沟流路结构连通指数略有降低,说明道路扩建会阻断潮沟连通,阻碍湿地与海域间的水沙交换及水文连通过程。

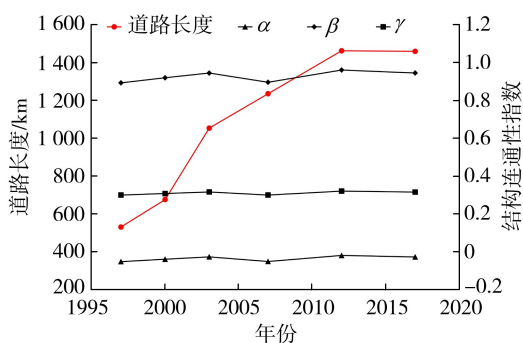


图5 清水沟流路道路长度与结构连通性指数变化趋势

3.5.4 水利设施建设

黄河三角洲水利设施修建主要包括灌渠开挖、围海造地以及农业开垦等。大量水利设施如沟渠、水库等的修建,可以使结构连通性得到提高,但由于区域间水利设施修建的不均衡,结构连通性的上升趋势呈波动特征,如人工设施的修建会阻断部分区

域水沙等物质的输移,使结构连通性呈下降趋势^[49]。研究表明,黄河改道为清水沟流路后,1985—2015年北部刁口河故道区域河湖水系的结构连通性指数总体呈波动上升趋势,其中 β 由1.13增大至1.30。这一变化与东营市大力开凿水渠密切相关。2005年之后,受经济发展影响,小型水库、闸坝等水利设施修建增多,使得水系网络的 α 、 β 、 γ 持续上升,改变了水系网络的结构连通性^[23]。

3.5.5 围海造地活动

围海造地活动对黄河口水文连通性的影响形式多样,主要分为保留河流-逐步侵占潮沟型、保留潮沟干流-切断支流型、河流干流支流间隙围填型、切断末端潮沟型和短期全面侵占型5种模式^[57]。其中,短期全面侵占型破坏性最大,只留下一些潮沟痕迹,水流通道基本消失;切断末端潮沟型对纵向水文连通网络扰动较小,如1990年黄河口北部围海大坝建设导致区域内连通性下降,但2010—2015年 β 有所上升,表明切断末端潮沟型对纵向水文连通网络的影响有限。

综上,黄河三角洲水文连通性受多因素耦合影响,且不同区域的影响因素存在时空异质性。流路变迁直接改变区域地质地貌条件,塑造区域水系格局,是影响区域水文连通性的首要驱动因素,主要体现在近代黄河三角洲陆地区域和现行入海口;自然条件和人类活动影响下的来水来沙条件通过水沙通量的变化主导功能性变化,是调控物质传输过程的关键因素;水文条件、植被覆盖与水利设施建设等其他人类活动为重要的干扰因素,不同环境因素的变化可产生抑制或促进水文连通性的复杂效应,其中黄河三角洲陆地区域与北部岸带受人类活动影响相对较大。

4 结论与展望

采用遥感解译、现场监测、水沙数学模型、水网形态分析等手段,对黄河三角洲的水文连通性及其影响因素等开展了大量研究。结果表明,黄河三角洲河流水网多呈单一线型,沿河流纵向入海,潮沟水网结构连通性为“一般连通”水平,多为树枝状发育,且北部刁口河结构连通性略优于清水沟流路入海口。流路变迁、来水来沙条件、植被覆盖、人类活动等是影响该区域径流水系及潮滩水文连通性的重要因素,其驱动机制存在时空异质性。

然而,既有研究存在明显局限:空间尺度上多聚焦单一空间层次,难以揭示河流水系-潮沟-地下水多维度体系的互馈机制;现有模型对水沙动力-地貌演变-生态响应的多因素耦合影响研究尚不明晰,尤

其是变化环境下受来水来沙条件、城市化发展等影响,弱混合陆相河口三角洲滩涂湿地水文连通性在功能和结构层面上可能会发生较大变化,需采用现场监测、遥感监测、指数计算和模型模拟等多技术手段,探明其变化机理。此外,现有研究对生态补水的水量-水质-水深阈值与湿地长期生态效应的动态耦合机制解析不足。

未来可从以下几方面进行深入研究:①整合河流、潮沟及地表地下水系,构建覆盖滩涂湿地全域的多尺度融合水文连通性框架。聚焦人类活动与变化环境双重胁迫下的时空演变机理,建立区域特征导向的定量评估体系,优化多尺度融合模型以模拟水文连通过程的动态响应,揭示多尺度协同下的时空演变规律与趋势。②强化实地观测与数学模型的协同分析,系统解析弱混合陆相河口三角洲水文连通性与水沙情势的互馈机制,并量化水沙条件变化、岸滩冲淤及工程调控的阈值效应,以揭示新水沙情势下的驱动机制。③探索基于自然-社会的水文连通性提升路径。评估生态补水等水文连通方案的长期可持续性,结合对湿地生态补水的水量、水深和水质阈值以及湿地生态系统演变规律的科学认识,构建适配水文连通性提升与湿地生态功能修复的协同优化方案,为基于自然-社会的河口综合治理提供实践范式。

参考文献:

[1] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37 (1): 130-137.

[2] LIU Jiakai, ENGEL B A, WANG Yu, et al. Multi-scale analysis of hydrological connectivity and plant response in the Yellow River Delta [J]. Science of the Total Environment, 2020, 702: 134889.

[3] HARVEY J, GOMEZ-VELEZ J, SCHMADEL N, et al. How hydrologic connectivity regulates water quality in river corridors [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2019, 55 (2): 369-381.

[4] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119: 17-34.

[5] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊 [J]. 地理科学进展, 2012, 31 (1): 26-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 26-31. (in Chinese))

[6] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及计

- 算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787. (XIA Jihong, CHEN Yongming, ZHOU Ziyue, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))
- [7] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594. (GAO Changjun, GAO Xiaocui, JIA Peng. Summary comments on hydrologic connectivity[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(3): 586-594. (in Chinese))
- [8] PRINGLE C M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective [J]. Ecological Applications, 2001, 11(4): 981-998.
- [9] TESSLER Z D, VÖRÖSMARTY C J, GROSSBERG M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. Science, 2015, 349: 638-643.
- [10] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: protect the world's deltas [J]. Nature, 2014, 516: 31-33.
- [11] 白玉川. 河口泥沙运动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011.
- [12] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [13] O'CONNOR M T, MOFFETT K B. Groundwater dynamics and surface water-groundwater interactions in a prograding delta island, Louisiana, USA [J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 15-29.
- [14] ROZAS L P, MARTIN C W, VALENTINE J F. Effects of reduced hydrological connectivity on the nursery use of shallow estuarine habitats within a river delta [J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 492: 9-20.
- [15] 李宗礼, 李原园, 王中根, 等. 河湖水系连通研究: 概念框架[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 513-522. (LI Zongli, LI Yuanyuan, WANG Zhonggen, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese))
- [16] XIE Chengjie, CUI Baoshan, XIE Tian, et al. Hydrological connectivity dynamics of tidal flat systems impacted by severe reclamation in the Yellow River Delta [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139860.
- [17] YU Junbao, ZHOU Di, YU Miao, et al. Environmental threats induced heavy ecological burdens on the coastal zone of the Bohai Sea, China [J]. Science of The Total Environment, 2021, 765: 142694.
- [18] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 17-24. (LUO Meng, WANG Qing, QIU Dongdong, et al. Hydrological connectivity characteristics and ecological effects of a typical tidal channel system in the Yellow River Delta [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(1): 17-24. (in Chinese))
- [19] NEWTON A, CARRUTHERS T J B, ICELY J. The coastal syndromes and hotspots on the coast [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 96: 39-47.
- [20] SMITH M W, BRACKEN L J, COX N J. Toward a dynamic representation of hydrological connectivity at the hillslope scale in semiarid areas [J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): W12540.
- [21] COOK B J, HAUER F R. Effects of hydrologic connectivity on water chemistry, soils, and vegetation structure and function in an intermontane depressional wetland landscape [J]. Wetlands, 2007, 27(3): 719-738.
- [22] PRINGLE C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2685-2689.
- [23] 李冬雪, 谢湑, 马旭, 等. 1985—2015年刁口河黄河故道区域河流水文连通时空演变规律[J]. 环境生态学, 2020, 2(1): 10-16. (LI Dongxue, XIE Tian, MA Xu, et al. Temporal and spatial pattern evolution of hydrological connectivity of the old track of Yellow River in Diaokouhe from 1985 to 2015 [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(1): 10-16. (in Chinese))
- [24] 高玉琴, 汤宇强, 肖璇, 等. 基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 33-37. (GAO Yuqin, TANG Yuqiang, XIAO Xuan, et al. Evaluation model of river network hydrologic connectivity based on improved graph theory and hydrological simulation [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 33-37. (in Chinese))
- [25] 陈星, 许伟, 李昆朋, 等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价: 以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 26-29. (CHEN Xing, XU Wei, LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 26-29. (in Chinese))
- [26] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 776-781. (XU Guanglai, XU Youpeng, WANG Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 776-781. (in Chinese))
- [27] LANE S N, REANEY S M, HEATHWAITE A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index [J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): W08423.
- [28] COHEN M J, CREED I F, ALEXANDER L, et al. Do geographically isolated wetlands influence landscape functions? [J]. Proceedings of the National Academy of

- Sciences of the United States of America, 2016, 113(8): 1978-1986.
- [29] RECKENDORFER W, FUNK A, GSCHÖPF C, et al. Aquatic ecosystem functions of an isolated floodplain and their implications for flood retention and management[J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(1): 119-128.
- [30] MERENLENDER A M, MATELLA M K. Maintaining and restoring hydrologic habitat connectivity in mediterranean streams: an integrated modeling framework [J]. Hydrobiologia, 2013, 719(1): 509-525.
- [31] TURNBULL L, WAINWRIGHT J, BRAZIER R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. Ecohydrology, 2008, 1(1): 23-34.
- [32] 崔保山, 蔡燕子, 谢湑, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 738-746. (CUI Baoshan, CAI Yanzi, XIE Tian, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: problems and prospects [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(6): 738-746. (in Chinese))
- [33] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1989, 8(1): 2-8.
- [34] 马巧珍, 张婷婷, 赵峰, 等. 长江口湿地潮沟连通程度对鱼类群落的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(4): 913-921. (MA Qiaozhen, ZHANG Tingting, ZHAO Feng, et al. Effects of tidal creek connectivity on fish communities in the Yangtze River estuary wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(4): 913-921. (in Chinese))
- [35] 茹彪, 陈星, 张其成, 等. 平原河网区水系结构连通性评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 9-12. (RU Biao, CHEN Xing, ZHANG Qicheng, et al. Evaluation of structural connectivity of river system in plain river network region[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 9-12. (in Chinese))
- [36] FREEMAN M C, PRINGLE C M, JACKSON C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 5-14.
- [37] 赵进勇, 董哲仁, 翟正丽, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 537-543. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, ZHAI Zhengli, et al. Evaluation method for river floodplain system connectivity based on graph theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 537-543. (in Chinese))
- [38] 陈月庆, 武黎黎, 章光新, 等. 湿地水文连通研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 26-38. (CHEN Yueqing, WU Lili, ZHANG Guangxin, et al. Review of wetland hydrological connectivity [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 26-38. (in Chinese))
- [39] 于小娟, 张仲胜, 薛振山, 等. 1989 年以来 7 个时期黄河三角洲潮沟的形态特征及连通性研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(4): 517-523. (YU Xiaojuan, ZHANG Zhongsheng, XUE Zhenshan, et al. Morphological characteristics and connectivity of tidal channels in the Yellow River Delta for 7 periods since 1989[J]. Wetland Science, 2018, 16(4): 517-523. (in Chinese))
- [40] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等. 淮河流域水系连通状况评估[J]. 中国水利, 2013(9): 21-23. (DOU Ming, ZHANG Yuandong, ZHANG Yazhou, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River Basin[J]. China Water Resources, 2013(9): 21-23. (in Chinese))
- [41] RICOTTA C, STANISCI A, AVENA G C, et al. Quantifying the network connectivity of landscape mosaics: a graph-theoretical approach [J]. Community Ecology, 2000, 1(1): 89-94.
- [42] PASCUAL-HORTAL L, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(7): 959-967.
- [43] LIANG Jie, HE Xinyue, ZENG Guangming, et al. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 22-29.
- [44] JAEGER J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation[J]. Landscape Ecology, 2000, 15(2): 115-130.
- [45] MCDONOUGH O T, LANG M W, HOSEN J D, et al. Surface hydrologic connectivity between Delmarva bay wetlands and nearby streams along a gradient of agricultural alteration[J]. Wetlands, 2015, 35(1): 41-53.
- [46] 贺怡. 黄河口湿地水文连通关键受阻因素辨识及其阻隔效应研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
- [47] XIE Tian, WANG Qing, NING Zhonghua, et al. Artificial modification on lateral hydrological connectivity promotes range expansion of invasive *Spartina alterniflora* in salt marshes of the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144476.
- [48] SAWYER A H, EDMONDS D A, KNIGHTS D. Surface water-groundwater connectivity in deltaic distributary channel networks [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(23): 10299-10306.
- [49] 刘烨凌, 郝斌, 王青, 等. 1970—2015 年黄河三角洲高效生态经济区河湖沿水系水文连通时空演变[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 2-11. (LIU Yeling, HAO Bin, WANG Qing, et al. Temporal and spatial

- evolution of hydrological connectivity in River-Lake-Swamps in high efficiency eco-economic zone at the Yellow River Delta from 1970-2015[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2021,57(1):2-11. (in Chinese))
- [50] 孟祥永,陈星,陈栋一,等.城市水系连通性评价体系研究[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):24-28. (MENG Xiangyong,CHEN Xing,CHEN Dongyi,et al. Evaluation system of urban water system connectivity[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(1):24-28. (in Chinese))
- [51] 方红卫,何国建,黄磊,等.国家重点研发计划项目“长江中游新水沙情势下水文连通变化机理及其生态效应研究”研究进展报告[R].北京:清华大学,2024.
- [52] 于守兵,李高仑,管春城,等.黄河三角洲生态保护修复制度研究[J].人民黄河,2022,44(3):80-84. (YU Shoubing,LI Gaolun,GUAN Chuncheng,et al. Research on ecological protection and restoration institutions of the Yellow River Delta[J]. Yellow River,2022,44(3):80-84. (in Chinese))
- [53] ZHAO Qingqing, BAI Junhong, HUANG Laibin, et al. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration [J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 442-452.
- [54] 崔保山,贺强,赵欣胜.水盐环境梯度下翅碱蓬(*Suaeda salsa*)的生态阈值[J].生态学报,2008,28(4):1408-1418. (CUI Baoshan, HE Qiang, ZHAO Xinsheng. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1408-1418. (in Chinese))
- [55] 牟奎南,宫兆宁,邱华昌.黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程[J].地理学报,2021,76(9):2312-2328. (MOU Kuinan, GONG Zhaoning, QIU Huachang. Spatiotemporal differentiation and development process of tidal creek network morphological characteristics in Yellow River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2312-2328. (in Chinese))
- [56] 左利钦,陆永军,黄廷杰,等.国家重点研发计划课题“黄河三角洲湿地生态水网演变与布局优化”2023年度科技报告[R].南京:水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院,2023.
- [57] 满颖,王安东,周方文,等.围填海活动对黄河口滨海湿地纵向水文连通网络影响[J].环境生态学,2020,2(4):57-64. (MAN Ying, WANG Andong, ZHOU Fangwen, et al. Influence of sea reclamation on coastal wetlands longitudinal hydrological network in the Yellow River Estuary[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(4): 57-64. (in Chinese))
- [58] 王永丽,于君宝,董洪芳,等.黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J].地理科学,2012,32(6):717-724. (WANG Yongli, YU Junbao, DONG Hongfang, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 717-724. (in Chinese))
- [59] 冯久格,李谦维,梁晨,等.基于景观指数的黄河口湿地水文连通动态分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(1):12-21. (FENG Jiuge, LI Qianwei, LIANG Chen, et al. Landscape index analysis of hydrological connectivity dynamics in the Yellow River Delta [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 12-21. (in Chinese))
- [60] 王开荣,吴漫,杜小康,等.黄河现行入海清水沟流路十大标志性事件概略[J].中国水利,2018(23):41-45. (WANG Kairong, WU Man, DU Xiaokang, et al. Top ten landmark events for the flow path of the Yellow River to the sea [J]. China Water Resources, 2018(23): 41-45. (in Chinese))
- [61] 李贺,黄翀,张晨晨,等.1976年以来黄河三角洲海岸冲淤演变与入海水沙过程的关系[J].资源科学,2020,42(3):486-498. (LI He, HUANG Chong, ZHANG Chenchen, et al. Coastal erosion and sediment dynamics of the Yellow River Delta and their responses to the runoff-sediment flux since 1976 [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 486-498. (in Chinese))
- [62] 韩广轩,栗云召,于君宝,等.黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J].应用生态学报,2011,22(2):467-472. (HAN Guangxuan, LI Yunzhao, YU Junbao, et al. Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 467-472. (in Chinese))
- [63] 杨卓媛,夏军强,周美蓉,等.黄河口尾闾段来沙组成及其与河床形态调整的关系[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(10):985-992. (YANG Zhouyuan, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Sediment composition and its relationship with the riverbed morphology adjustment in the tail reach of the Yellow River Estuary [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(10): 985-992. (in Chinese))
- [64] 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 Yaoshen, DOU Shentang, WANG Wanzhan, 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))
- [65] 陈沈良,于守兵,凡姚申.现行黄河口区的水沙动力与汊道演变[J].人民黄河,2022,44(4):25-30. (CHEN Shenliang, YU Shoubing, FAN Yaoshen. Water and sediment dynamics of the active Yellow River mouth and its evolution of distributary channels [J]. Yellow River,

2022,44(4):25-30. (in Chinese))

[66] SENDROWSKI A, PASSALACQUA P. Process connectivity in a naturally prograding river delta [J]. Water Resources Research,2017,53(3):1841-1863.

[67] 吴晶晶,栗云召,高猛,等. 四种河流水系阻力下的黄河三角洲湿地生态网络构建及对比研究[J]. 湿地科学, 2018,16(4):493-501. (WU Jingjing, LI Yunzhao, GAO Meng, et al. Construction of wetland ecological networks under four kinds of resistance of rivers in the Yellow River Delta and their comparison[J]. Wetland Science,2018,16(4):493-501. (in Chinese))

[68] MITCHELL M G E, BENNETT E M, GONZALEZ A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps [J]. Ecosystems,2013,16(5):894-908.

[69] 吴玉琴,李玉凤,刘红玉,等. 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响综述[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(1):57-65. (WU Yuqin, LI Yufeng, LIU Hongyu, et al. The impact of hydrological connectivity on wetland ecosystem service function:current progresses and research gaps [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition),2020,20(1):57-65. (in Chinese))

[70] 刘佳凯. 黄河三角洲滨海湿地水文连通及其对植被结构的影响[D]. 北京:北京林业大学,2020.

[71] 韩广轩,牛振国,栾兆擎,等. 河口三角洲湿地健康生态圈构建:理论与方法[J]. 应用生态学报,2018,29(8):2787-2796. (HAN Guangxuan, NIU Zhenguo, LUAN Zhaoqin, et al. Construction of healthy wetland ecosphere in estuarine delta:theory and method[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (8): 2787-2796. (in Chinese))

[72] 韩沙沙,谈广鸣,赵连军,等. 黄河入海水沙情势变化分析[J]. 中国农村水利水电,2022(2):1-5. (HAN Shasha, TAN Guangming, ZHAO Lianjun, et al. An analysis of the latest variations of incoming water and sediment in the Yellow River Delta [J]. China Rural Water and Hydropower,2022(2):1-5. (in Chinese))

[73] 韩震,宗全利,金凯,等. 黄河三角洲典型潮沟发育演变过程分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):38-44. (HAN Zhen, ZONG Quanli, JIN Kai, et al. Evolution process analysis of typical tidal creeks in the Yellow River Delta[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):38-44. (in Chinese))

[74] 易雨君,徐嘉欣,宋劫,等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. 水资源保护,2022,38(1):133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 133-140. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-11 编辑:骆超)

+++++

(上接第55页)

[79] DONG Zhihong, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Simulation of whole movement process of Muzhuping landslide with DDA and prediction of surge [J]. Advanced Materials Research,2014,989-994:2254-2257.

[80] JIAO Yuyong, ZHANG Huanqiang, TANG Huiming, et al. Simulating the process of reservoir-impoundment-induced landslide using the extended DDA method [J]. Engineering Geology,2014,182:37-48.

[81] KATZ O, MORGAN J K, AHARONOV E, et al. Controls on the size and geometry of landslides: insights from discrete element numerical simulations [J]. Geomorphology,2014,220:104-113.

[82] LI Ji, CAO Zhixian, CUI Yifei, et al. Barrier lake formation due to landslide impacting a river: a numerical study using a double layer-averaged two-phase flow model[J]. Applied Mathematical Modelling,2020,80:574-601.

[83] 徐文杰. 滑坡涌浪流-固耦合分析方法与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(7):1420-1433. (XU Wenjie. Fluid-solid coupling method of landslide tsunamis and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(7):1420-1433. (in Chinese))

[84] 李东阳,年廷凯,吴昊,等. 滑坡-堵江-涌浪灾害链模拟的DEM-CFD耦合分析方法及其应用[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):141-149. (LI Dongyang, NIAN Tingkai, WU Hao, et al. Coupled DEM-CFD method for landslide-river blockage-impulse wave disaster chain simulation and its application[J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):141-149. (in Chinese))

[85] NIAN Tingkai, WU Hao, TAKARA K, et al. Numerical investigation on the evolution of landslide-induced river blocking using coupled DEM-CFD [J]. Computers and Geotechnics,2021,134:104101.

[86] 司鹏飞,田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(6):28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(6):28-32. (in Chinese))

[87] WU Hao, SHI Anchi, NI Weida, et al. Numerical simulation on potential landslide-induced wave hazards by a novel hybrid method[J]. Engineering Geology,2024,331:107429.

(收稿日期:2025-06-30 编辑:俞云利)