

黄河下游长远安全研究——河口格局优化

周建军,张 曼,孙嘉悦

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:针对黄河下游水少沙多、输沙能力不足、河口延伸共同引起河道持续淤积抬高,造成河道溃堤、改道和泄洪能力不足,这种风险反过来又迫使河口不断改道,造成三角洲不稳定、干旱、弃水和生态缺水长期并存的问题,认为在中游防洪减淤工程体系不能持续控制泥沙的条件下,河口格局是影响长远安全的重要环节,提出采用同步维持多个出海口门的新格局替代传统的单一流路反复改道格局,并基于出口水沙条件的河口延伸公式对新格局河口情况进行了论证。研究表明,多个出海口门格局基本上可以长期抑制河口尾闾泥沙淤积延伸、控制相对侵蚀基面上升、维持三角洲稳定和控制干流洪水位不断上升、理顺下游水沙关系,从而为出海淡水资源利用、河口湿地繁荣和泛三角洲高质量发展创造条件。

关键词:黄河;河口三角洲;泥沙;洪水;水资源;长远安全

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0142-09

Research on long-term safety of the lower Yellow River: estuary outlet optimization//ZHOU Jianjun, ZHANG Man, SUN Jiayue(*Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The lower Yellow River (LYR) was silted and elevated continuously, owing to an inherent heavy sediment and small runoff with insufficient sediment transport capacity and successive estuarine outlet extension (EOE), resulting in the breaches of dyke, migrations of courses, decrease of flood conveying capacity, and these mentioned risks in turn can also force the estuary to change outlet with a long-term coexistence of instability, drought, water abandonment and eco-water shortage in the delta. Among the reasons, the authors think that the estuarine layout is a key segment affecting the long-term safety of the LYR under a premise when the flood-sediment control system in the river's mid-reach cannot sustain in trapping the sediment. A multi outlets scheme (MOS) is proposed to replace the traditional estuarine layout of single outlet and it is studied by applying a new proposed formula for the EOE as a function of flow and sediment condition. The results show that the MOS can inhibit the long-term alluvial accumulation of sediment in the estuary and control the rise of the relative erosion base level, to maintain a stable delta, to control the continuous rise of the main-channel and its flood levels, to rationalize the relationship between flow and sediment, creating conditions for utilizations of freshwater resources and prosperity of the estuarine wetlands and the pan-delta with high-quality development.

Key words: the Yellow River; delta; sediment; flood; water resources; long-term safety

黄河是全球泥沙最多的河流,水少沙多和下游河道长期持续淤积抬高,是影响黄河流域长远防洪和水资源安全的主要原因^[1-3]。

人民治黄以来,通过水土保持、防洪减淤工程和高标准堤防,当前和一定时期内下游泥沙剧烈减少、安全程度得到空前提高^[1,4-5]。然而,中游水库拦沙库容消耗很快,淤地坝等拦沙工程有效时间不长^[6],水土保持虽然发挥了较大作用^[7],但中游强侵蚀地貌与环境条件没有得到根本改变^[8],未来气候变化不确定性大,当前全球同期主要流域水土流失程度都在显著增大^[9],且中游多沙粗沙区范围很

小,库容消耗很快,而可建坝拦沙库容有限^[10],因此,未来泥沙恢复后,黄河下游继续淤积抬高的可能性很大。另一方面,黄河缺水且下游需要较大水量输沙,使水资源严重受制于泥沙。国家“87分水”和黄河流域综合规划^[1,11]分别要求预留 230 亿 m³/a 和 170 亿 m³/a 径流用于输沙出海。然而,2011—2020 年黄河平均出海水量 213 亿 m³/a,只输送了 1.41 亿 t/a 泥沙出海,6.62 kg/m³ 的输沙效率远低于 1950—1959 年的 27.64 kg/m³,下游输沙效率随水沙减少和工程调控不断降低。同时,河口尾闾淤积延长提高干流(西河口)河道基面,使河口不断被

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202701)
作者简介:周建军(1960—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhoujj@tsinghua.edu.cn

动改道、三角洲不稳定^[12-14]。三角洲大量弃水,干旱、盐渍度改善和生态环境受到淡水的严重限制^[15-17],三角洲持续淤积对下游河道持续抬高和长远安全产生严重影响,防洪、稳定和生态要求制约着三角洲经济社会发展。黄河流域规划预留备用流路^[1]在当前少沙时期可以延缓上述问题,但从现黄河下游抬升幅度已普遍接近和超过明清故道、西河口长期高水位运行、黄河下游防洪主要依靠水库堤防控制的现状看,河口可延伸余地已经不大。随着经济社会发展,进一步提高用水、生态和防洪安全是大趋势,为了黄河下游长远安全,河口治理需要在方略、格局和措施上有所突破。

本文提出一种新的河口格局和调控方式,替代长期以来单一流路的水沙出海格局,目标是抑制尾间延伸、减缓河流基面抬高及干流溯源淤积、降低洪水位,稳定三角洲,理顺下游水沙关系,为黄河出海淡水资源利用、三角洲生态保护和高质量发展创造条件,同时为后续进一步探索黄河下游治理提供参考。

1 黄河口淤积的作用及格局优化

1.1 黄河口淤积的作用

自公元前 602 年以来,黄河下游主要依靠在平原地区大范围改道维持^[18]。近代治黄通过堤防约束使两岸洪泛区范围大大减少,但河道淤积抬高速率仍在不断增大^[19]。对比明清故道(1194—1855 年)与现黄河东坝头以下河道(1855 年至今)的初始和最终河床高程(图 1),可见尽管不同历史时期水沙和社会条件相差很大,但黄河几乎塑造出完全一致的纵向剖面。图 1 中故道口门位置分别代表 1194 年初始、1578 年潘季驯治河、1677 年靳辅延长加强堤防和 1855 年最终的河口位置,期间黄河总共外延 187.5 km,相应东坝头以下河道全程平均抬高 18 m^[21],河道延长和抬高主要集中在最后 278 年,抬高

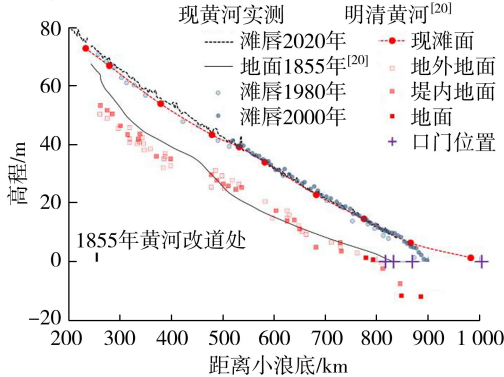
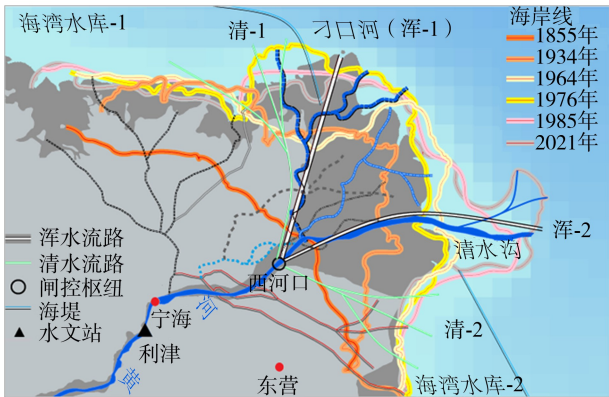


图 1 黄河明清故道与现行河道实测纵向剖面比较
Fig. 1 Comparison of the actual longitudinal section between the Ming and Qing Old outlet and the current outlet of the Yellow River

延伸比(18 m/187.5 km)与其纵向坡降(0.96/10000)几乎一致;现黄河实际行水 110 年,东坝头 200 km 以下的河道高程已与故道高程相当(其上游更高是因为近期发育的“二级悬河”),河口三角洲堆积扩大 2 210~2 423 km²,清水沟河口长度增加 50~62 km,东坝头—利津河道滩面平均坡降 1.1/10 000,利津以下 1.22/10 000,均与明清故道在东坝头以下的坡降大致相当。从简单几何关系看,明清故道河口外延和溯源淤积几乎平行抬高了黄河下游河道。

关于黄河下游持续淤积的决定因素长期存在严重争议^[22-27]。从原理上看,河流输沙依靠水流势能,在海平面不变条件下,输沙功率决定于河道长度或纵向坡降。从明清故道河口段上端(初始口门处)抬高 14 m,可以证明黄河河道的抬高与河流势能功率的减少有关。虽然现黄河下游受人工控制和水沙变化的影响,河道冲淤更复杂,但是黄河三角洲(图 2)仍以堆积扩张为主的情况没有改变。1855—2000 年黄河三角洲堆积扩大 2 210~2 423 km²,宁海以下 9 次大改道,尾间摆动遍及 6 000 km² 扇区^[28],尾间平均延长 50~62 km。1950—2004 年利津出海的 403.5 亿 t 泥沙中 68.1% 的泥沙堆积在三角洲和滨海区^[13]。尾间河道 10 年左右改道 1 次,淤积、延伸和再改道完成一个循环,每次河口改道引起的实测溯源淤积范围至少在济南(泺口)以下 200 km 有所体现^[23]。1855 年现黄河口门处滩面已高出海平面 7.8~9.0 m 和河道纵向坡降与故道相似度高等,都表明河口淤积延伸对黄河下游河道持续淤积抬高的作用不容低估。因此,在未来黄河下游来沙恢复后,河口淤积、三角洲扩张和相对侵蚀基面抬高,将进一步抬高黄河下游和影响防洪安全^[29],这是绕不



注:纵向线条代表 1855 年以来不同时期尾间河道(为简洁忽略存在时间),浑-1、浑-2 和清-1、清-2 代表浑水流路和清水流路。

图 2 黄河三角洲 1855 年以来的河口演化和本文建议的多出海口门格局示意图
Fig. 2 Diagram of outlet evolution of the Yellow River delta since 1855 and the proposed multi-outlets scheme (MOS)

开的问题,保障黄河下游长远安全必须高度重视河口淤积控制和加强三角洲治理。

1.2 黄河口优化格局

几十年来,黄河口一直采取预留备用河口适时改道的单一出海口门格局^[1]。由 1951—2020 年利津以下实测的河长变化情况^[30](图 3(a))可见,神仙沟和刁口河流路分别在延长 15.5 km 和 17.2 km 后被迫自然改道(1963 年)和人工改道(1975 年),清水沟流路在 1994 年延长 26.83 km 后西河口水位严重偏高,实施清 8 改汉,之后又在 2008 年因同样原因改新汉出海。1995 年前,清水沟延伸速率与早期流路很接近,表明水沙减少不能明显减缓尾间延伸。清水沟流路能加长延续至今,主要是由于西河口设防水位提高和 20 世纪 90 年代后来沙急剧减少(但 2018—2020 年平均沙量恢复到 2.9 亿 t/a,清水沟延伸又明显开始加快)。可见,长期维持单一河口不现实,以预留备用河口适时改道只能尽量短期延缓河口外移^[29],持续抬高河道相对侵蚀基面对黄河下游长远防洪安全严重不利,三角洲长期不稳定不利于地区发展^[31]。

“一主一辅”分洪分沙模式主张用导河束水驱沙和清淤结合维持清水沟河槽,用刁口河分洪来降低西河口水位;“双流路”轮流行河模式则建议在西河口建闸,整治刁口河流路,与清水沟互为分洪;分散流路模式建议用三角洲分散分流出海,泥沙淤垫三角洲,缓解干旱、污染和岸线侵蚀。上述模式对防洪、减淤、三角洲稳定和生态环境具有很强的针对性和重要的参考价值,但是,除预留备用河口外,其他模式的研究支撑都不足,均难以统筹河口治理在防洪、减淤、生态保护和三角洲发展等方面的综合要求。“一主一辅”分洪分沙模式最大的问题是没有充分考虑导河束水攻沙增加河长和大比降效应;“双流路”轮流行河模式对交替行水无具体方案,除疏浚外,没有能遏制尾间河槽萎缩的措施;分散流路模式只是在当前少沙时期具有合理性,在未来泥沙增加后很难防止主河槽淤积萎缩,影响防洪安全。初步看上述模式(包括“预留备用流路”)对多沙情况下河口侵蚀基面长期稳定的前景不明确,不能避免尾间小水淤积(这是黄河下游淤积固症^[33])和河槽萎缩,更不能在淤积控制的同时提高出海输沙水效率和利用出海淡水资源。

本文提出以同步维持多个出海口门(以下简称“多口门”)优化格局集中蓄清排浑方式,拟在三角洲同时同规模维持清水沟和刁口河两个泄洪排沙流路(浑水流路),分别面向莱州湾和渤海湾的南北清水流路(河网)构成多口门并存的格局(图 2)。浑水流路集中较大流量交替泄洪排沙,清水流路在小水期间全面引流,以免浑水流路河槽淤积,为三角洲压咸、补沙、改善生态环境和回收淡水。此格局需要建西河口闸控枢纽和海湾水库,通过调控来维护多流路并存局面并回收淡水。调控核心是同时维护浑水流路过流能力与干流河槽平滩流量相同(建议 5000 m³/s),并消除浑水流路“小水淤积”河槽。浑水流路通过高标准堤防控制,只需维持主河槽,其中清水沟是现黄河尾间,刁口河是黄河流域规划^[1]备用流路。清水流路要维持过流能力 1400~1500 m³/s,北面与刁口河并行进入渤海湾,南面沿十八户方向进入莱州湾,进入国家公园湿地保护区后可按网状布局,分散促淤,最后汇入下游海湾水库。闸控枢纽运用方式是:①利津流量小于 2000 m³/s 且泥沙浓度较低时,全部水沙走清水流路(这时在浑水流路留 20 m³/s 生态流量,以保证尾间河道不断流);②流量 2000~5000 m³/s 或泥沙浓度较大时,全部水流集中于单一浑水流路,两浑水流路逐次轮换;③洪水流量大于 5000 m³/s 后,两浑水流路均等泄洪;④遇特大洪水(流量超过 10000 m³/s)全部流路联合泄洪,最大泄洪能力为 12800~13000 m³/s(超过设计流量 11000 m³/s^[1])。

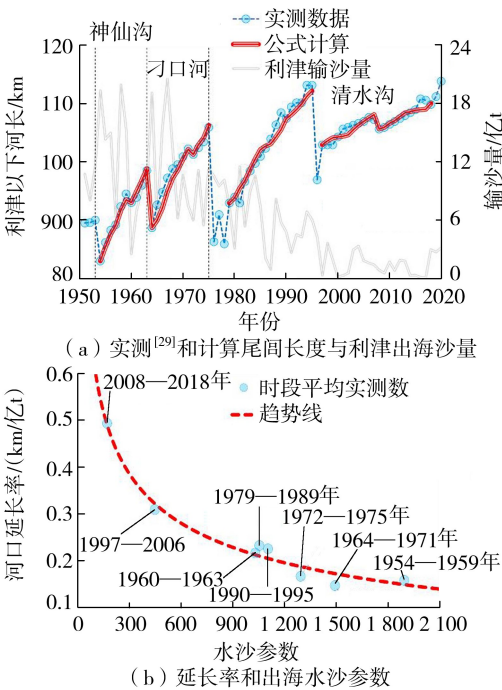


图 3 河口尾间长度、延长率与出海水沙参数($x=s_aQ_a^{0.53}$)关系

Fig. 3 Relationship between the delta outlet length, its extension rate and seaward flow-sediment parameter ($x=s_aQ_a^{0.53}$)

长期以来,关于河口格局已有较多的研究和建 议。除黄河流域规划采用的预留备用流路方式外,还提出过“一主一辅”分洪分沙^[31]、“双流路”轮流行河^[32]以及分散流路分流分沙^[17]等模式。“一主

2 优化口门格局的论证

2.1 河口尾间淤积延伸规律

为论证多口门格局具有抑制口门外延的作用,首先根据实际资料研究河口尾间淤积变化的规律。实测水量和沙量资料取自中华人民共和国水文年鉴,1951—2020 年利津水文断面逐日流量与悬移质输沙量数据来自黄河水利委员会,现下游东坝头以下滩面高程数据根据黄河实测大断面(2000 年)的最高滩面高程得到,三角洲利津以下河道长度来自河口实测和分析数据^[14,30]。

河口对下游和三角洲的影响主要体现在入海流路延伸和改道上,河口尾间长度变化是决定下游干流淤积、洪水基面和河口流路寿命及三角洲稳定的关键因素。吴保生等^[30]根据河道泥沙冲淤平衡,简化堆积几何关系,得到时段尾间延伸长度与利津沙量之间具有线性关系的结论(式(1)):

Δ = KW_s (1)

式中:Δ 为时段延伸长度,km;W_s 为利津断面的时段总输沙量,亿 t;K 为尾间延长率,km/亿 t。该公式体现出海泥沙对河口淤积延长的主要作用。

吴保生等^[30]据实测河长等资料分析得到延长率与综合水沙参数 W_s^{0.1}W^{0.82}(W 为利津断面的时段总水量)具有负相关线性关系,合理解释了近年水沙减少但河口延伸值仍然较大的原因,但是未能涵括 2008 年后严重少沙时段数据,同时,分析时段划分只考虑了流路或汊路差异,没有区分重大水沙变化(如 1960—1964 年三门峡蓄水拦沙期间,出海泥沙大量来自黄河下游冲刷出来的较粗泥沙,河口淤积机制应该有所不同)和各流路初期河道散乱、主要在陆上堆积、口门淤积明显与尾间正常发展时期存在机理差异等,因此,该研究公式的机制和拟合精度都需要进一步提高。

虽然黄河出海水量相对较小,水流的惯性和浑水异重流等将泥沙向海域扩散的规模都很小,但是,在洪水和高浓度泥沙出现期间,这些出海水流和泥沙扩散的作用仍然较大,而且这些年因水沙减少、受海水盐水异重流反向顶托而加大的口门淤积作用也不可忽视。因此,在口门泥沙扩散和淤积的尺度上,淡水惯性动力和异重流仍是重要因素。本文选用时段平均含沙量 s_a 和流量 Q_a 为参数来反映洪水惯性和泥沙异重流的作用,进一步分析尾间延长率的变化规律。同时,时段划分上考虑流路、分汊和水沙变化等情况,将 1954—2018 年分成 8 个时段并去除改道初期流路散乱的年份(图 3(a)),而且,为突出大沙时段对河口冲淤的主导作用,按含沙量加权计算

平均流量:

Q_a = ∑ q√s / ∑ √s (2)

式中 s、q 分别为利津逐日含沙量和流量。含沙量和流量都与泥沙扩散具有正向关系,因此最终采用综合水沙参数(x=s_aQ_a^m)与时段延伸长度进行回归分析。根据相关系数最大原则进行逐次迭代回归,得到优化的综合指数 m=0.53 和延长率的统计关系:

K = 3.146s_a^{-0.3083}Q_a^{-0.1634} - 0.158 (R² = 0.975) (3)

以每个流路和汊道起始河长为初值,用公式(1)~(3)模拟计算利津以下逐年河长变化情况,与实测值对比的线性斜率(Δ_{计算}/Δ_{实测})、截距和相关系数(R²)分别达到 0.997、0.0 和 0.978,因此根据水沙资料预报计算的河口延长具有较高精度,公式(1)~(3)可用于研究未来在水沙调控下河口延伸的变化(图 3(b))。

2.2 天然水沙情景下的口门分流分沙特性

根据 1950—1959 年实测的逐日利津水沙资料,可以给出天然情景下从浑水流路泄洪排沙出海的水量、沙量和时间随清水流路分水上限含沙量(S_{max})的分布特征(图 4)。结果表明,在多口门格局下黄河的洪水和泥沙仍主要从浑水流路出海。随着 S_{max} 增大,浑水流路出海水沙量逐步减少,但 S_{max} > 10~15 kg/m³ 后,出海水沙量变化幅度减小。因此,清水流路分流分沙含沙量的上限 S_{max} 可以在此附近选取。本文后续计算初步选定 S_{max} = 10 kg/m³。

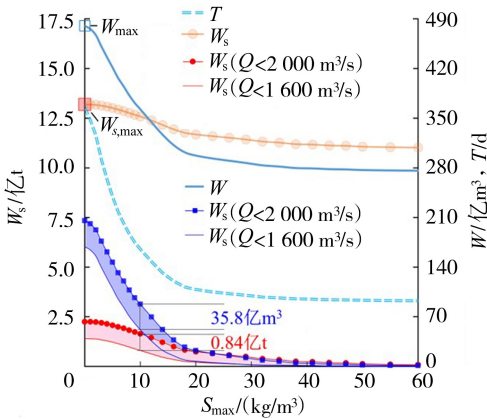


图 4 浑水流路年均出海天数 T、水量、沙量及 Q<2000 m³/s 水流带 S>S_{max} 输沙量与清水流路分沙上限含沙量的关系

Fig. 4 The annual running time T, sea discharged water and sediment through the flushingoutlet and it discharged sediment in S>S_{max} by discharge Q<2000 m³/s flows against the maximum clean outlet silt content

因浑水流路的控制原则没有完全排除小水带大沙^[33],所以当 $S_{\max}$ 较小时,经浑水流路随流量小于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 水流下泄出海的沙量仍较大。但是,当 $S_{\max}=10\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,这种沙量已从 2.3 亿 t/a 降低到 1.6 亿 t/a ,而且其中主要集中在流量 $1600\sim 2000\text{ m}^3/\text{s}$ 间(占51%)。因此,考虑到三角洲相对沉降等还需要更多泥沙修复,今后在实际运用中还需考虑分流流量在 $1600\sim 2000\text{ m}^3/\text{s}$ 之间的泥沙,以避免小水淤积浑水流路。

2.3 多口门与现状口门淤积延伸等的对比

式(1)和(3)表明河口尾间延伸不仅与利津总沙量成正比,且延伸强度随出海含沙量和流量变化而变化,尤其是含沙量的作用更明显。2010—2018 年利津平均含沙量为 $6.02\text{ kg}/\text{m}^3$,只有1954—1959 年 $31\text{ kg}/\text{m}^3$ 的20%,然而前者实测河口尾间平均延长率($0.48\text{ km}/\text{亿 t}$)却是1954—1959 年($0.159\text{ km}/\text{亿 t}$)的3倍,可见泥沙减少并不能相应程度地放缓河口淤积速度。因此,控制和降低下游小水和低浓度输沙机会更利于河槽减淤^[34]。集中泄洪排沙可以显著降低河口尾间延伸长度,这正是多口门格局可在浑水流路集中输沙、专设清水流路分流低含沙“清水”(蓄清排浑)和消除“小水淤河”^[34]的主要依据。

根据式(1)和1950—2018 年利津断面实测水沙资料,分别计算原单一口门方案和多口门方案逐年的口门分水分沙量(图5)和河口尾间延伸长度(图6,图中50s表示五十年代,其他一样),其中多口门方案两个浑水流路按平均机会泄洪排沙。在长系列(1950—2018 年)和近期系列(2010—2018 年),利津沙量分别为 6.62 亿 t/a 和 1.10 亿 t/a 、水量分别为 $294\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $183\text{ 亿 m}^3/\text{a}$,多口门方案从浑水流路总出海沙量分别为 6.25 亿 t/a 和 0.82 亿 t/a 、水量分别为 209 亿 m^3 和 68.5 亿 m^3 (其中包括约 $10\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 的生态流量),清水流路分走泥沙分别为 0.37 亿 t/a 和 0.29 亿 t/a 、分水分别为 $85.5\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $114\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。在长系列和近期系列两个相同时段,单一口门方案河口年均延伸分别为 1.24 km/a 和 0.45 km/a ,而多口门方案浑水流路的延伸长度分别降低到 0.46 km/a 和 0.10 km/a ,降幅分别为63%和78%。可见,在多口门方案下,因为两条浑水流路分担主要的利津沙量、集中在大水大沙期间出海和将小水分离黄河(蓄清排浑),所以河口尾间的淤积延伸得到显著减少,而且,由于清水流路引水消除浑水流路河槽小水淤积,其河槽内部的泥沙淤积也可得到显著减少,加上两个口门可同时利用海洋潮动力冲刷口门外淤积的泥沙,浑水流路延伸的幅度还会在上述减小幅度基础上进一步减小。

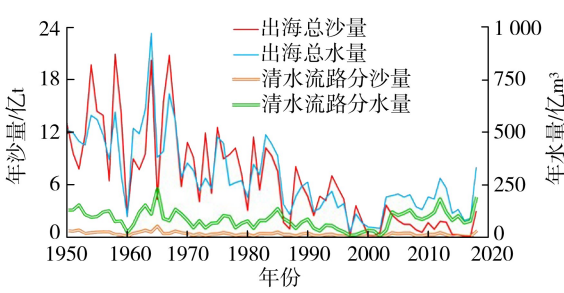


图5 1950—2018 年水沙条件下多口门方案下清水流路各年份分水分沙量情况

Fig.5 Water and sediment rate diverted each year through the clean outlet under the MOS for the flow-sediment conditions from 1950 to 2018

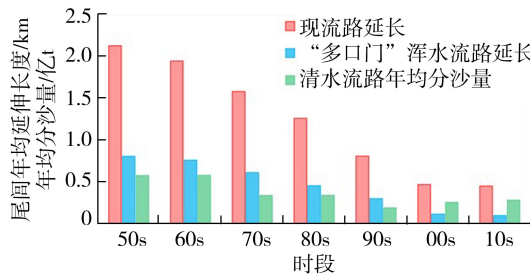


图6 现状单一口门与多口门方案下尾间平均延伸长度比较及多口门清水流路分沙量

Fig.6 Comparison of average outlet extension length between the present single outlet scheme and MOS, and diverted sediment through the clean outlet of MOS

按上述调控方式,多口门方案1950—2018 年平均出海水量的29%是通过清水流路,相应分沙比只有5.6%(沙量 0.37 亿 t/a)。尽管大量淡水改走清水流路,但黄河主要的泥沙仍从浑水流路排泄出海。在多沙时段(1950—1959 年)和少沙时段(2010—2018 年),单一口门方案中,出海的平均含沙量分别是 $27.5\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $6.02\text{ kg}/\text{m}^3$,而多口门方案中,从浑水流路排泄泥沙的平均效率分别提高到 $34.2\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $12\text{ kg}/\text{m}^3$,从清水流路引水的平均含沙量分别只有 $5.2\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $2.5\text{ kg}/\text{m}^3$ (图7)。多口门方案蓄清排浑,显著提高黄河出海输沙水的效率,同时使清水流路引水分沙含沙量较低、泥沙总量较少,这是清水流路分水可以比较简单处理泥沙、充分发挥水资源和生态环境效益的基础。

在多口门方案下,通过调控集中蓄清排浑可以显著提高黄河输沙用水的效率、缓解河口尾间淤积延伸,并且可以从河口分离出来大量低含沙淡水可资利用,使黄河下游长期不协调的水沙关系得到缓解。尤其是在当前和今后相当长的水沙减少条件下,新的河口格局对高效利用黄河有限的径流资源输沙减淤、节约水资源和修复改善三角洲生态环境都具有重要的意义。

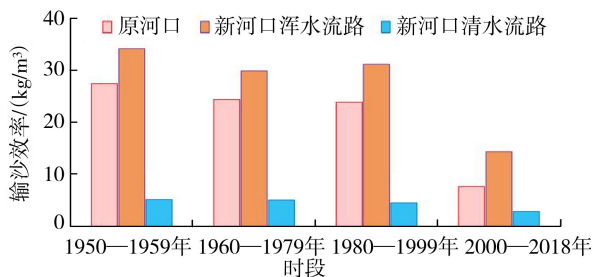


图7 现状单一口门与多口门方案的出海输沙效率比较和从清水流路引水的平均含沙量

Fig. 7 Comparison of flushing efficiencies between the present single outlet and MOS, and average silt content diverted through the clean outlet

3 新河口格局的作用和问题

新的河口格局具有改善三角洲和干流防洪安全、回收淡水资源、稳定三角洲和保护生态环境等作用。

3.1 新河口格局的作用

3.1.1 改善三角洲和干流防洪安全

新河口格局的重要作用在于保证三角洲干流防洪安全。通过减少河口延伸、尾间淤积和降低河槽最大泄洪流量来降低西河口水位,其中最主要的是多流路分洪将西河口以下单槽最大泄洪流量从原来 $11\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 设计流量降低到 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$,而总泄洪能力提高到 $13\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 。在原来设计洪水时的西河口水位降低到过 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时的水平,直接降低幅度约 2.5 m ,三角洲的防洪安全得到显著提高。

更进一步,西河口较低的基准水位可以得到长期维护。首先是两条浑水流路都基本避开了“小水淤河”^[34],尾间段河槽的过水断面容易得到持续维护。虽然,浑水流路在 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下仍有少量“小水带大沙”(图4)行水时间,但完全可以采取措施尽量避免,如,利用中游水库调节尽量减少 $1600\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 区间的流量和利用清水流路尽量引走含沙量较高的此区间“小水”,相应泥沙可用于修复垫高和维护三角洲与海平面的相对高差^[35](估计每年可消化泥沙 $0.5\text{ 亿}\sim 1.0\text{ 亿 t}$)。另外,两个浑水流路口门的淤积同时面对和利用潮流冲刷,使河口延伸的速率得到进一步控制。其次是西河口水位降低为适当延长河口提供了余地,借此可在岸线外人工构造“双堤导河”^[31],形成突出的尖嘴口门,加强潮流冲刷,从而进一步稳定口门。更重要的是,浑水流路的最大泄洪流量从 $11\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 降低到 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 后,尾间河道堤防的维护难度大大降低,加上西河口枢纽控制,河口尾间出现溃堤和被动改道的风险可显著降低,即使出现溃堤也不至于造成

改道和动荡。三角洲的防洪安全局面可以得到长期维持。

对于黄河下游而言,西河口防洪基准水位降低(至少降低 2.5 m),可直接使利津、济南(泺口)以下河道的平均水面坡降分别提高 42% 和 12.5% 。即使在定床河槽的条件下,根据谢才公式,利津、济南(泺口)相应河段的平滩流量也可分别提高 21% 和 6.2% 。同时,根据挟沙能力公式可得河道输沙能力几乎与水面坡降成正比。因此,可以计算,在给定流量下,上述河段的输沙能力可分别提高 40% 和 12% ,河槽淤积量可以显著减少,从而提高平滩流量和防洪能力,使洪水漫滩引起大幅度淤积的机会减少。考虑到实际的黄河下游是动床河流,其冲刷和淤积的溯源效应决定上述河段坡降、挟沙能力和平滩流量提高的范围都可以超出泺口。虽然,迄今关于河口相对侵蚀基面变化对黄河下游大范围淤积抬高的作用存在争议^[22-27],持续维持较低西河口水位更大范围的作用需要等待进一步的事实证明。但是,持续控制尾间延伸和维持西河口低水位,消除河口不断循环改道引起河道反复冲淤^[24-25]和泺口以下泄洪能力影响的作用完全可以肯定,至少艾山以下河道的平滩流量、防洪能力和输沙能力可以得到提高。黄河下游上宽下窄、上陡下缓,中段“豆腐腰”和全下游防洪安全严重受制于山东窄河段的泄洪能力,上述作用对黄河下游长期安全十分重要。

3.1.2 稳定三角洲

河口尾间改道,岸线侵蚀和地面绝对、相对沉降,是当前影响黄河三角洲稳定的主要问题。即使按规划方式预留备用流路,相关区域长期闲置也严重限制当地农业生产和油田等设施建设,改道对三角洲道路交通、基础设施和生态环境都会造成严重破坏^[31];闲置的备用流路口门长期缺乏泥沙补给而产生岸线蚀退(1976年以来,刁口河口外海岸冲刷和岸线蚀退范围很大^[36-37]);在过去几十年间,黄河三角洲地面沉降居全球前列,相对于海平面的上升,地面相对沉降的速率高达 $8\sim 23\text{ mm/a}$ ^[35]。

在多口门格局下,三角洲两条浑水流路同时存在,泄洪规模显著降低,河槽淤积和流路延伸得到基本控制。即使浑水流路仍有所延长,也不至于显著影响西河口洪水位,河口状况与西河口以上黄河干流的防洪基本脱钩,而且,通过工程措施^[31]加强口外导河约束,增强潮动力输沙,从而逐步形成稳定口门的可行性更大^[38]。因此,浑水流路溃堤、被动改道的风险和主动改道的必要性都可显著降低。尾间稳定和防洪安全可为三角洲的长期稳定奠定基础。

同时,通过清水流路可形成一个持续向三角洲

湿地及周边岸线全面补水补沙的机制。持续补充淡水和泥沙是修复三角洲地面绝对沉降和海岸线侵蚀的基本条件,也可以进一步抵御因海平面上升引起的三角洲地面相对沉降。在当前全球气候变暖和海平面上升的大背景下,预期黄河口周边海平面在 21 世纪末可能上升约 1 m^[39],三角洲可能面临部分淹没和大量水土流失的风险。从当前开始未雨绸缪,积极利用多口门格局逐步加大幅度向三角洲分流分沙^[6],是一个值得研究和高度重视的重大课题。

3.1.3 改善三角洲生态环境

黄河水沙是造就和决定河口三角洲生态系统和湿地健康的主要条件。几十年来,由于黄河水沙减少导致三角洲干旱、海岸侵蚀、地面沉降、地下水位降低和盐水入侵等,河口湿地的初级生产力、植被生态功能、物种多样性降低,土地贫瘠、盐渍化和海岸上下污染问题凸显^[15-17],湿地生态系统持续逆向演替^[40],尤其是在刁口河备用流路扇区,当前的生态环境面貌更差。在更大的泛三角洲,山东和河北等莱州湾和渤海湾岸线地区,因受水资源限制和气候变化的影响,农业缺水和农田盐渍化区域越来越大,海岸带长期处于荒漠状态,部分滩涂利用海水养殖但粗放开发,使海岸地貌受到严重破坏。造成这些生态和环境问题的关键,是三角洲长期水沙不足和泛三角洲地区干旱缺水。清水流路主要承担三角洲补水补沙等生态功能^[17]和回收淡水,河网不需太过大水断面,淤积对干流防洪和河口淤积基面没有影响。清水流路可以根据回收淡水、三角洲修复和生态保护需求不断渐次调整,使图(6)所述的分流分沙规模在三角洲尽量缓慢分散堆积垫高。按前述调控结果,清水流路完全可以弥补三角洲的水沙供给不足,并有能力向周边生态环境保护提供较多的水资源,不仅可以在自然保护区驱盐、驱污、补充生源物质,而且可以通过充足的淡水滋润和泥沙营养补充,显著提高湿地初级生产力、修复海岸带和三角洲,从而塑造和维护一个更繁荣的黄河口自然景观和湿地生态系统。这一激活的湿地生态系统同时也可净化和保护从黄河回收的淡水,为周边地区提供优质的淡水资源。安全、稳定和繁荣的三角洲可以促进黄河口国家湿地公园成为更具生态价值的自然遗产。

3.2 需要进一步研究的问题

本文对所提出的河口格局和调控方式只进行了粗线条研究,关于回收淡水利用方式、西河口闸控枢纽、新格局下河口长远变化及其对黄河下游长远安全的影响、对三角洲及周边海域更大范围的生态环境影响等,都还需要进一步深入研究,口门格局和调控方式还有较大的优化余地^[41]。

在清水流路总体按流量 2 000 m³/s 上限分流的前提下,具体南北分流比例还需要根据水资源利用方式、能力和湿地生态系统需要进一步确定。同时,大量实测资料揭示刁口河口门外近海 M₂ 无潮点周边潮流速度大、输沙能力强,这里的口门更利于向远海排沙,相比之下,清水沟口外潮流较弱,泥沙容易就近堆积口门,刁口河(神仙沟)口门向海外海输沙比例 38%,而 1976 年以来清水沟只有 21%泥沙输向远处^[14],因此,为达到同步减缓泄洪排沙、浑水流路淤积延伸目标,两个浑水流路还需要根据口外海潮流输沙能力进一步优化两条泄洪排沙浑水流量的运用时间比例。

4 结 论

黄河长远泥沙淤积问题尚未解决,河口尾间淤积延伸和三角洲扩张是下游河道持续淤积抬升的主要原因之一。为探索保障黄河下游长远安全的途径,本文提出并研究了同步维持多个出海口门的新河口格局。研究结果表明:

- a. 在新的格局下,两条浑水流路尾间延伸速率可以降低到原来单一河口情况的 22%~37%,多沙条件下的淤积延长率与 2000 年以来少沙时期的实际水平相当。
- b. 通过完全切换泄洪排沙,加上清水流路分流全面免除浑水流路小水淤积和加强堤防约束,可以保证和维持两条泄洪排沙浑水流路都能达到流量 5 000 m³/s 的泄洪能力。
- c. 遇大洪水,多个流路联合泄洪可将西河口洪水位控制在当前 5 000 m³/s 洪水流量的水平,而三角洲的安全泄洪能力提高到 13 200 m³/s,超过当前设计水平。
- d. 西河口洪水位降低可提高山东河段防洪能力,同时彻底解除河口延伸和设计洪水位 12 m 对下游防洪的制约作用。因此有条件允许尾间口门适当外延,逐步形成突出沙嘴,以加强和进一步充分利用双口门潮动力冲刷,减少口门堆积,逐步形成长期共存、平衡和稳定的泄洪排沙通道。
- e. 多口门格局可通过调控减少约 100 亿 m³ 的输沙水量,为回收低浓度输沙淡水、为三角洲湿地大量补水补沙提供了可能性。
- f. 通过河口格局调整和调度优化,实现集中较大流量输沙出海、避免小水淤积河道和节约输沙水量的多重目标,化解水沙矛盾。
- g. 防洪和水资源安全、稳定和健康生态可为三角洲长远安全和高质量发展建立起重要的基础,也可为进一步改善黄河水沙调控和优化华北水资源配

置开辟新的途径和手段。

黄河口综合治理事关全局,建议高度重视。当前要抓住黄河安全这一千载难逢的时间窗口,以理顺河口口水沙关系为突破口,利用现代技术创新治理方略,保障黄河长治久安。

参考文献:

[1] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划:2012—2030[M]. 郑州:黄河水利出版社,2013.

[2] 钱宁,王可钦,阎林德,等. 黄河中游粗泥沙来源区及其对黄河下游冲淤的影响[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:光华出版社,1980:195-184.

[3] 徐建华,林银平,吴成基,等. 黄河中游粗泥沙集来源区界定研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.

[4] 唐克旺,石秋池. 黄河治理要有新思维[J]. 水资源保护,2021,37(1):86,89. (TANG Kewang, SHI Qiuchi. New thinking on harnessing the Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 86, 89. (in Chinese))

[5] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024,52(3):25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3): 25-33. (in Chinese))

[6] 李景宗,刘立斌. 近期黄河潼关以上地区淤地坝拦沙量初步分析[J]. 人民黄河, 2008, 40(1):1-6. (LI Jingzong, LIU Libin. Analysis on the sediment retaining amount by warping dams above Tongguan section of the Yellow River in recent years[J]. Yellow River, 2018, 40 (1): 1-6. (in Chinese))

[7] 胡春宏,张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1):1-11. (HU Chunhong, ZHANG Xiaoming. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1):1-11. (in Chinese))

[8] 张金良. 黄河流域河湖生态环境复苏研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):141-146. (ZHANG Jinliang. Eco-environment recovery of rivers and lakes in the Yellow River basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 141-146. (in Chinese))

[9] SYVITSKI J P M, VÖRÖSMARTY C J, KETTNER A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science, 2005, 308 (5720): 376-380.

[10] 周建军,林秉南. 关于黄河治理的一些看法[J]. 科技导报, 2003(6):3-8. (ZHOU Jianjun, LIN Bingnan. Notes

on the training of the Yellow River [J]. Science & Technology Review, 2003(6):3-8. (in Chinese))

[11] 国务院办公厅转发国家计委和水电部关于黄河可供水量分配方案报告的通知[R]. 北京:国务院办公厅, 1987.

[12] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.

[13] 黄河水利委员会勘测规划设计院. 黄河入海流路规划报告[R]. 郑州:黄河水利委员会勘测规划设计院, 1989.

[14] 王开荣,茹玉英,郑春梅,等. 黄河口现行流路长期稳定性与使用年限研究[R]. 郑州:黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2009.

[15] 连煜,王新功,黄翀,等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. 地理学报, 2008, 63(5):451-461. (LIAN Yu, WANG Xingong, HUANG Cong, et al. Environmental flows evaluation based on eco-hydrology in the Yellow River delta wetlands[J]. ACTA Geographica Sinica, 2008, 63(5):451-461 (in Chinese))

[16] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报, 2002, (2):219-224. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, (2): 219-224(in Chinese))

[17] 王万战,雷坤,江恩惠,等. 黄河三角洲及附近海域综合治理战略研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(2):91-97. (WANG Wanzhan, LEI Kui, JIANG Enhui, et al. Study on creating an integrated management strategy for the Yellow River delta and its ambient sea area[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(2):91-97. (in Chinese))

[18] 徐福龄. 黄河下游河道历史变迁概述[J]. 人民黄河, 1982(3):46-49. (XU Fuling. A historical perspective on the river course evolution in the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 1982(3):46-49. (in Chinese)).

[19] ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Coarse sediment and lower Yellow River siltation[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2012, 6(4):267-273.

[20] 张仁,谢树楠. 废黄河的淤积形态和黄河下游持续淤积的主要成因[J]. 泥沙研究, 1985(3):1-10. (ZHANG Ren, XIE Shunan. The depositional profile of the abandoned channel and the main cause of continuous aggradation of the lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 1985(3):1-10. (in Chinese))

[21] 钱意颖,叶青超,周文浩. 黄河干流水沙变化与河床演变[M]. 北京:中国建材工业出版社,1993.

[22] 谢鉴衡. 关于黄河下游河床演变问题(上)[J]. 黄河建设, 1957(6):4-11. (XIE Jianheng. Regarding the issue of riverbed evolution in the lower reaches of the Yellow River [J]. Yellow River Construction, 1957 (6): 4-11. (in Chinese))

[23] 庞家珍,司书亨. 黄河河口演变:Ⅲ. 河口演变对黄河下

- 游的影响[J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(3): 218-224. (PANG Jiazhen, SI Shuheng. Fluvial process of the Huanghe River estuary: III. Influence of the evolution of the Huanghe River estuary on the lower reach[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1982, 13(3): 219-224. (in Chinese))
- [24] 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 Kaichen. Relation between the lower Yellow River and the estuary and its regulation[J]. Journal of Sediment Research, 1982(2): 1-10. (in Chinese))
- [25] 尹学良, 陈金荣. 黄河下游河道纵剖面形成概论及持续淤积的原因[J]. 人民黄河, 1993, 15(2): 1-4. (YIN Xueliang, CHEN Jinrong. An introduction to longitudinal profile formation and reasons for continued siltation in the lower Yellow River course[J]. Yellow River, 1993, 15(2): 1-4. (in Chinese))
- [26] 周文浩, 范昭. 黄河下游河床近代纵剖面的变化[J]. 泥沙研究, 1983(4): 14-25. (ZHOU Wenhao, FAN Zhao. Changes of the recent longitudinal profile of the lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 1983(4): 14-25. (in Chinese))
- [27] 师长兴. 河口河道延伸对黄河下游河道淤积影响分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 20-25. (SHI Changxing. Analysis of effects of mouth channel extension on siltation in the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 20-25. (in Chinese))
- [28] 余欣, 张原锋, 于守兵, 等. 黄河口演变与流路稳定综合治理研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 1-6. (YU Xin, ZHANG Yuanfeng, YU Shoubing, et al. Study on both morphological changes of Yellow River estuarine course and integrated management for its stability[J]. Yellow River, 2018, 40(3): 1-6. (in Chinese))
- [29] 谢鉴衡. 黄河下游纵剖面变化及其治理问题[J]. 人民黄河, 1986(6): 3-8. (XIE Jianheng. Changes in longitudinal profile of the lower Yellow River and problems related to its improvement[J]. Yellow River, 1986, (06): 3-8. (in Chinese))
- [30] 吴保生, 郑珊, 王开荣, 等. 黄河口尾闾河长的变化特点及计算方法[J]. 泥沙研究, 2021, 46(4): 75-80. (WU Baosheng, ZHENG Shan, WANG Kairong, et al. Processes and calculation method of tail channel length in the Yellow River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(4): 75-80. (in Chinese))
- [31] 李殿魁, 杨玉珍, 程义吉, 等. 巧用海动力输沙建设黄河口双导堤工程技术研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [32] 刘曙光, 李希宁, 郑永来, 等. 建设清水沟和刁口河两条流路轮换使用工程, 保持黄河河口长治久安[C]//黄河河口问题及治理对策研讨会专家论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 223-231.
- [33] 尹学良, 王延贵. 关于分流淤积的一些问题[J]. 水利学报, 1988(3): 65-73. (YIN Xueliang, WANG Yangu. Some issues regarding diversion and sedimentation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988(3): 65-73. (in Chinese))
- [34] 尹学良. 黄河口的河床演变[J]. 泥沙研究, 1986, 11(4): 13-26. (YIN Xueliang. The fluvial processes of the Yellow River mouth[J]. Journal of Sediment Research, 1986, 11(4): 13-26. (in Chinese))
- [35] SYVITSKI J P M, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(10): 681-686.
- [36] 彭俊, 陈沈良, 李谷祺, 等. 黄河三角洲岸线及现行河口区水下地形演变[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 368-376. (PENG Jun, CHEN Shenliang, LI Guqi, et al. Evolution of coastline and subaqueous geomorphology off the survived river mouth in the Yellow River delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 368-376. (in Chinese))
- [37] 牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River delta based on landsat remote sensing image[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 26-33. (in Chinese))
- [38] 侯阿飞, 陶建峰, 朱思雨. 椒江河口输沙过程和机制转变研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 124-134. (HOU Afei, TAO Jianfeng, ZHU Siyu. Research on sediment transport process and mechanism change in the Jiaojiang River Estuary, China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4): 124-134. (in Chinese))
- [39] IPCC. Climate change 2007: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report. Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007: 104.
- [40] 杨玉珍. 建设黄河口生态水利枢纽工程研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(5): 7-8, 26. (YANG Yuzhen. Study on building ecological-type hydraulic projects at the Yellow River estuary[J]. Yellow River, 2005, 27(5): 7-8, 26. (in Chinese))
- [41] 朱翰林, 何国华, 赵勇, 等. 1956—2022 年黄河入海水量演变特征及其归因分析[J]. 水资源保护, 2025, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250407.1632.010>. (ZHU Hanlin, HE Guohua, ZHAO Yong, et al. Evolution Characteristics and Attribution Analysis of Yellow River Runoff into the Sea from 1956 to 2022[J]. Water Resources Protection, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.TV.20250407.1632.010>. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-01-23 编辑: 彭桃英)