

黄河下游长远安全研究——河口综合治理方案

张 曼,孙嘉悦,周建军

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:水是黄河流域、华北平原和河口三角洲的制约性资源,河口作为影响黄河下游长远安全的关键节点,需要统筹水沙综合治理。在河口格局优化的基础上,针对可回收淡水储存、保护、配置、利用的工程措施和可能带来的影响,提出在西河口附近干流建闸门控调枢纽、在莱州湾和渤海湾建大尺度海湾水库、在三角洲和海湾水库沿岸布局防护系统和相关服务系统的河口综合治理方案。研究表明:综合治理方案在保障防洪、减淤和河口稳定前提下,可稳定回收 100 亿 m³ 优质淡水,提供足够的调节库容和便捷的配置体系;有助于完善黄河水沙调控机制、维护下游输沙水量、保障河道长期减淤、繁荣河口湿地以及缓解泛三角洲缺水状况,为泛三角洲地区长远高质量发展创造基础条件。

关键词:河口三角洲;水沙调控;海湾水库;水资源;长远安全;黄河下游

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0066-11

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

Abstract: Water is restrictive resource in the Yellow River Basin, North China Plain and the estuary delta. As a key part affecting the long-term safety of the lower Yellow River, the estuary needs to be comprehensively controlled coordinating with water and sediment. On the basis of estuary outlet optimization, engineering measures and possible impacts for the storage, protection, allocation, and utilization of freshwater are proposed. An estuary comprehensive management plan is proposed, which includes building a gate control and regulation hub on the mainstream at Xihekou, constructing large-scale reservoirs in Laizhou Bay and along the west Bohai Gulf, and laying out protection systems and related service systems along the delta and gulf reservoirs. The research results show that the plan can stably recover 10 billion m³ of high-quality fresh water, provide sufficient regulating storage capacity and convenient water distribution system, while ensuring flood control, sediment reduction, and the delta stability. It helps to improve the water and sediment regulation mechanism of the Yellow River, maintain the downstream sediment transport water, ensure long-term siltation reduction in the river channel, promote prosperity of the estuarine wetlands, and alleviate water shortage in the pan delta area, creating basic conditions for high-quality development in the pan delta area for the future.

Key words: estuary delta; water and sediment regulation; gulf reservoir; water resources; long-term safety; the lower Yellow River

水资源是制约黄河下游安全及流域生产、生活、生态的关键资源^[1]。黄河下游河道输沙能力不足,易造成河道淤积,尤其艾山以下河段河道狭窄、坡降小、泄洪能力严重不足。另外,河道泥沙淤积还受到河口尾闾淤积外延和侵蚀基面抬高的影响。随着黄河中游水库拦沙能力逐渐减弱,河道淤积抬高将不断降低下游的泄洪能力并影响黄河下游长远安全^[2-3]。同时,受自然条件变化、人为工程调控和流域用水增加等方面的影响,黄河流域和河口三角洲的降水、径流和水资源条件都发生了很大改变,入海

水量和输沙水量减少成为必然趋势,进一步加重了河道淤积,使区域生态环境变得非常脆弱^[4-7]。径流减少和水资源短缺已经成为黄河下游长远安全将面临的严重问题,水问题制约着黄河流域生态保护和高质量发展。

黄河下游、河口三角洲及周边平原地区需水量巨大^[8-12],水资源供给主要依靠黄河干流和周边山区水库。除小浪底水库外,区域现有和可建的水库规模都较小,而且这些水库需要兼顾防洪功能,有效调蓄库容有限,使得当地大量的降水和洪水资源不

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202701)
作者简介:张曼(1986—),女,助理研究员,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhangman86@tsinghua.edu.cn
通信作者: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

能得到有效利用。未来除南水北调工程和国家水网^[13-14]建设外,黄河流域已建和可建工程已基本完成,水资源总量有限,并且主要水土流失区侵蚀条件不能根本改变。在此前提下,流域面向生态保护的高质量发展要有新思维,有效增加区域水资源应该在治理方式上有所创新^[15],其中黄河口出海水资源利用是值得研究的重要方向。

周建军等^[2]提出将黄河口按多口门格局进行优化,同步维持刁口河和清水沟两条泄洪排沙河槽,在三角洲上分别通过南、北方向的清水河网在小水期间分流分沙(兼修复三角洲的沉降和生态补水),通过集中蓄清排浑遏制河口尾间淤积延伸、维护三角洲稳定、抑制溯源淤积、抬高河道和提高下游防洪能力,同时通过提高河口出海径流的输沙效率化解水沙矛盾,在一定程度上为回收出海淡水资源创造条件。在此基础上,本文针对黄河口可回收淡水储存、保护、配置、利用的工程措施和可能带来的影响进行研究,提出在西河口附近干流建闸门控调枢纽、在莱州湾和渤海湾建大尺度海湾水库、在三角洲和海湾水库沿岸布局3套防护系统和相关服务系统的河口综合治理方案(简称综合治理方案),以期为黄河下游及周边地区长远水资源安全探索新的河口治理途径。

1 综合治理方案

综合治理方案的核心是同步维持两套用于泄洪排沙的浑水流路和分流分沙的清水流路,用于取代长期以来黄河单口门出海的三角洲格局^[2]。具体包括:①在西河口附近黄河干流建设闸门控调枢纽和多口门分流分沙体系,即一个水沙控调系统;②利用周边海湾地形建设莱州湾和渤海湾大型海湾水库,即两个储水、调节和供水综合系统;③布局河口水湿地、海湾水库前滞湿地和库岸污染隔离带用于三角洲补水补沙、污染隔离和淡水净化保护,即3套保护系统;④发展可用于支撑流域水资源利用、优化配置和更多发展的服务作用,即服务功能。

1.1 闸门控调枢纽

在西河口建立闸门控调枢纽调节出海水沙,包括2个流量规模为5000 m³/s的泄洪闸门和2个流量规模为1600 m³/s的分水闸门。泄洪闸门用于调控清水沟和钓口河浑水流路的泄洪排沙,分水闸门用于控制小流量时期黄河向莱州湾和渤海湾方向的湿地和水库引水。枢纽调控原则为:①清水流路,当干流利津站流量 $Q \leq 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 且含沙量 $S \leq 10\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,黄河经清水流路分流进入两个海湾水库,同时浑水流路各保留20 m³/s生态流量。②浑

水流路,当 $2\,000\text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,全部水流经一个浑水流路泄洪排沙,两个浑水流路均等切换使用。③联合流路,当干流发生洪水, $Q > 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,两个浑水流路均等泄洪;特别地,如遇特大洪水, $Q > 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,全部流路联合泄洪,最大泄洪能力为13200 m³/s,超过西河口设计流量11000 m³/s^[16]。

根据1950年以来利津站逐日水沙条件,在提出的调控原则下,利津站各级流量的发生概率如图1所示。由图1可见,1990年后几乎没有出现过 $Q > 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水情景, $Q \leq 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的概率平均超过95%,并且1950—2018年 $Q > 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 只出现1天(1958年)。在天然多水多沙时期(1950—1959年)和少水少沙时期(1990—2018年),清水流路开启运行的概率分别为75%和95%,黄河通过清水流路分流进入海湾水库将是常态。清水流路开启运行的概率与其设定的分流上限含沙量 S_m 有关,上限含沙量越大分水量越大。在天然多水多沙时期(1950—1959年)和少水少沙近期(2007—2018年)清水流路分水分沙量随上限含沙量的变化如图2所示。在天然多水多沙时期,引沙量增加很快;在少水少沙近期,当 S_m 超过7~10 kg/m³后,引水量和引沙量增加幅度都很小。因此,本文初步选用 $S_m = 10\text{ kg}/\text{m}^3$ 作为控制条件。在此条件下,多沙和少沙

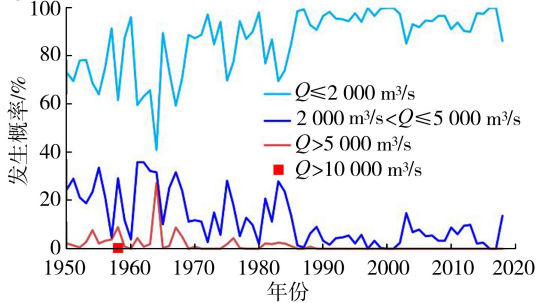


图1 1950—2019年利津站各级流量的发生概率
Fig.1 Probability of occurrence of various flow rates at Lijin Station from 1950 to 2019

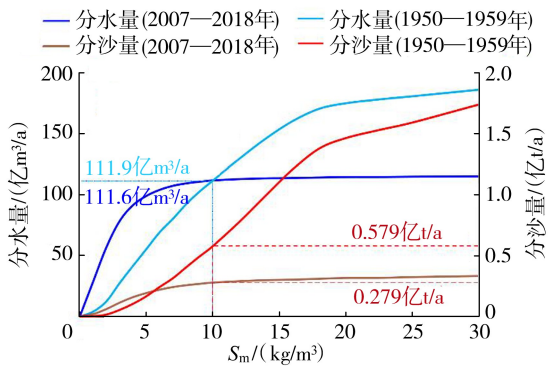


图2 不同时期清水流路分水分沙量随上限含沙量的变化
Fig.2 Variation of water and sediment in different time periods of clear water flow routes with upper limit of sediment concentration

时期可从黄河分得的清水量均为 110 亿 m³/a,而相应的分沙量分别为 5 790 万 t/a 和 2 790 万 t/a。考虑到莱州湾和渤海湾可建水库条件的差异,为平衡水资源配置、调节能力和泥沙淤积,在总分配原则下,进一步假设将其中流量大于 1 000 m³/s 或含沙量高于 5 kg/m³ 的水流分入莱州湾,反之分入渤海湾(南北分水的最小流量都不低于 40 m³/s)。相应条件下,上述多沙和少沙时段向渤海湾水库分水的比例分别为 45% 和 64%,分沙比例分别为 27. 2% 和 44. 6%,让莱州湾水库承担更多泥沙可协调淤积和让海湾水库更持久发挥调节能力。

图 3 为不同时段清水流路的平均分水分沙量,图中 1950s 表示 1950—1959 年,以此类推。由图 3 可见,除典型多水多沙和少水少沙时段外,其他时段分水量不能达到 110 亿 m³/a,但这些时段的分沙量都远低于 5 000 万 t/a。考虑到三角洲在持续沉降^[17],分沙量需达到 5 000 万 t/a 才能保证河口 6 000 km² 扇区垫高速率达到 5 mm/a 和三角洲稳定。因此,以 5 000 万 t/a 作为三角洲分沙总量限制,可保证除 1990—2009 年外的时段分水量都基本达到 110 亿 m³/a。1990—2009 年黄河干旱少水是因为受上游龙羊峡水库 1986 年和小浪底水库 2000 年蓄水的影响,不完全属于自然情况。

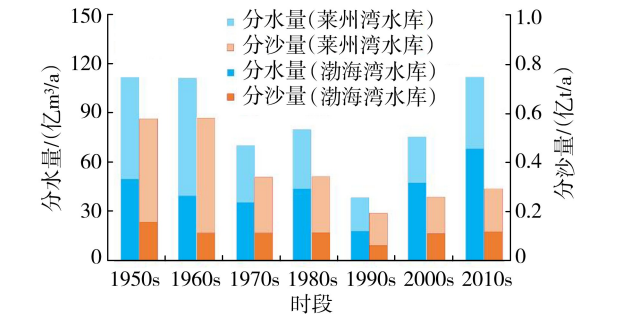


图 3 不同时段清水流路的平均分水分沙量

Fig. 3 Average water and sediment diverted to clear water flow routes in different time periods

图 4 为不同时段清水流路可分水量的统计特征及最大最小分水量,可见清水流路分水量存在年际变差大的问题。即使去除特殊的 1960 年(三门峡蓄水)和 1997—2002 年(上游很多新水库蓄水),1950—2018 年长系列分水量的变差系数仍然达到 0. 424,同期丰枯水量最大差异 200 亿 m³。因此,综合治理方案回收淡水需建设较大库容、较大调节和供水能力的水库。在河口三角洲的地貌条件下,海湾水库是唯一选择^[18]。

1. 2 海湾水库

海湾水库是储存、调节和供水的主体设施。华北地区缺水但更缺存水空间,当前津、冀、胶三地引

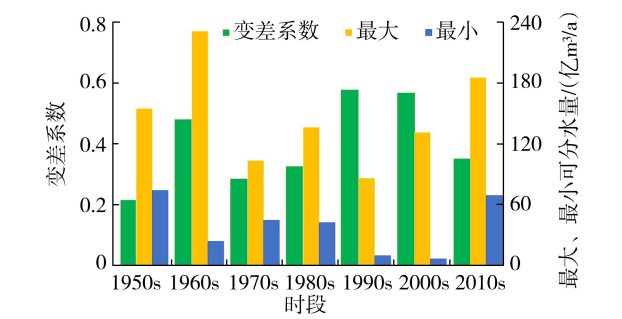
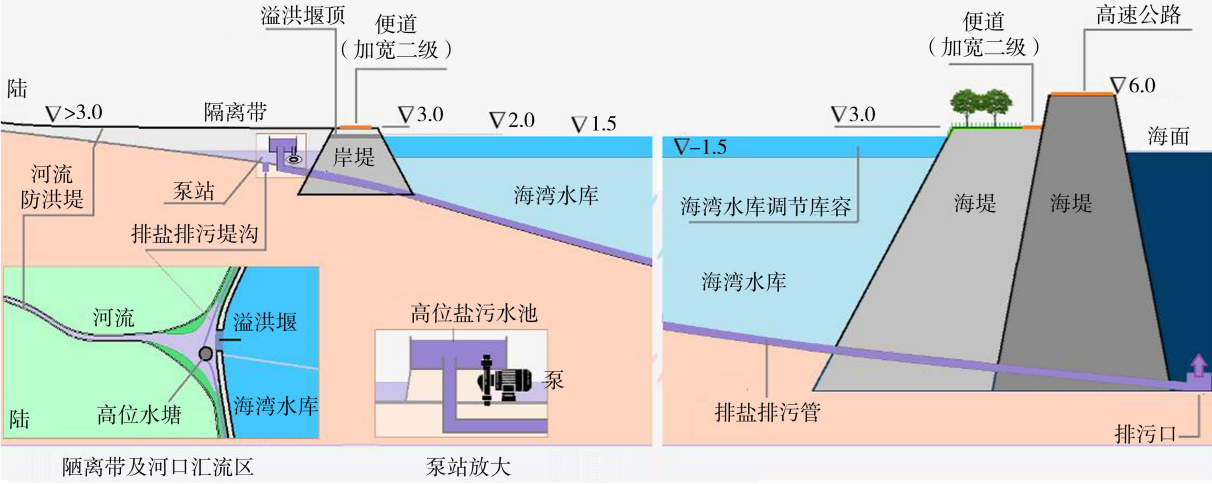


图 4 不同时段清水流路分水量的统计特征

Fig. 4 Statistical characteristics of water diverted to clear water flow routes at different time periods

黄主要靠小浪底等上游水库,建海湾水库的另一个主要目标是要实现对上述三地引黄水量、储存和配置的基本替代,以更好地保证未来黄河下游的输沙水量。根据 1987 年《黄河可供水量分配方案》,三地分配引黄份额 90 亿 m³/a,考虑黄河长系列径流和清水流路可回收水量的变差系数较大,海湾水库总调节库容不应低于 100 亿 m³,且应具有较大的平面尺度以兼顾三地水资源配置和就地取水需求。结合海湾地形和海堤工程量等因素,初步提出在莱州湾和渤海湾各建一个海湾水库。海湾水库主要根据周建军等^[2]关于河口可分低含沙水量的平均规模(110 亿 m³/a)并留一定余地,兼备跨津冀胶的储水、配置和向区域输水功能,应利用海湾浅水地形尽量降低海堤填方量,并考虑便利未来交通和其他服务功能(包括一定时期内刁口河附近的东营港址),且海堤的高度需考虑最高风暴潮位。依据 2005—2015 年海图(主体精度 10 km)、莱州湾渤海湾浅水地形(精度 1 km)和河口附近地形(精度 2 km)、2018 年土地利用数据(精度 1 km)、2010 年 DEM 数据(精度 90 m)对海湾水库、库堤和滩涂等进行了初步规划。同时,还考虑了三角洲湿地、污染隔离、新增滩涂土地耗水用水配置以及道路交通和航道布局。图 5 为海湾水库垂向剖面示意图。

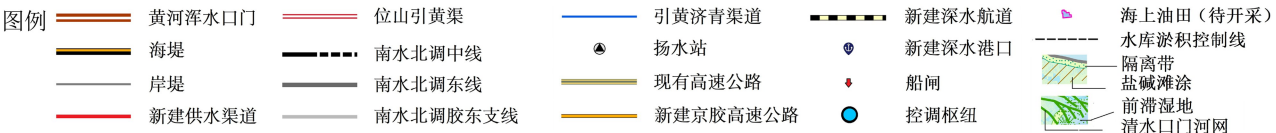
图 6 为综合治理方案平面布局及水资源配置情况,可见莱州湾水库通过连接黄河口的清水沟和莱州市太平湾长 71 km 的海堤形成,水库岸线涉东营、潍坊和烟台三市,面积 3 270 km²,平均水深 8. 8 m,库容 288 亿 m³,正常调节库容 95. 6 亿 m³,极限调节库容 126. 6 亿 m³(分别降低和加高最低、最高水位 0. 5 m)。渤海湾水库由连接刁口河口和独流减河口长 128 km 的海堤形成,水库顺海岸布局,岸线涉东营、滨州、德州、沧州和天津滨海新区,面积 1 900 km²,平均水深 4. 8 m,库容 91 亿 m³,正常调节库容 51. 9 亿 m³,极限调节库容 67. 9 亿 m³。表 1 为两个海湾水库的主要工程指标,其中分洪与排沙共



注:①海堤顶(高速公路)高程6m、宽42m(同京津唐高速公路),边坡为1/5;②海堤内侧套堤顶便道高程3m,宽10m(国二级公路标准),植被林荫带宽65m,边坡为1/10;③岸堤高程3m、顶宽15m(国二级公路标准),两侧林荫带各宽15m,边坡为1/10;④所有中小河口顺河防洪堤顶高程大于3m、岸堤溢洪堰顶高程2m;⑤污染隔离带宽1~4km,湿地地面高程-1~0m,通过排污排盐堤沟全部连通,堤沟底高程-2m,在河流出口堤沟汇流区设高位水塘(顶高程2m,洪水可部分自流排海)、泵站和排污排盐涵管跨越水库或顺岸出海。

图5 海湾水库垂向剖面示意图(单位:m)

Fig. 5 Schematic diagram of gulf reservoir vertical profile (unit: m)



注:①海堤与海上高速公路结合,岸堤顶是普通公路,海堤高速公路内外侧建10m宽便道和内侧65m宽林荫带;岸堤顶15m(加宽二级公路标准),两侧各建15m林荫带;②胶东供水主要依托潍坊峡山水库和兴建高位供水渠连接济南、引黄济青和南水北调胶东支线,峡山水库通过59km潍河连接莱州湾水库提水,落差为40m(扬程50m);③河北20~25m高程以下平原可沿渤海湾水库就近取水;④将天津北大港水库与渤海湾水库连通取水,进一步通过整治赵王新河和独流减河,两级提灌连接向雄安供水和白洋淀排洪;⑤海湾水库内部可建东营港、天津新港和扩大黄骅港深水港,水库与深水航道和港池结合,海堤上建船闸与外海连通。

图6 综合治理方案平面布局及水资源配置情况

Fig. 6 Comprehensive management plan layout and water resource allocation situation

表 1 两个海湾水库的主要工程指标
Table 1 Main engineering indicators of two gulf reservoirs

海湾水库	分洪闸数	分洪闸过流能力/ (m ³ /s)	清水闸数	清水闸过流能力/ (m ³ /s)	1.5 m 高程 水库面积/ km ²	正常水位 以下库容/ 亿 m ³	最大 水深/m	正常 水位/m	最低 水位/m	极限高 水位/m	极限低 水位/m
莱州湾	1	5 000	1	1 600	3 270	287.8	13	1.5	-1.5	2.0	-2.0
渤海湾	1	5 000	1	1 600	1 905	90.7	8	1.5	-1.5	2.0	-2.0
海湾水库	调节库容/ 亿 m ³	极限调节库 容/亿 m ³	年均净蓄 水量/亿 m ³	海堤 长度/m	岸堤 长度/m	海堤 方量/ 亿 m ³	岸堤 方量/ 亿 m ³	改造盐碱 滩涂面积/ km ²	新增耕地 面积/km ²	库岸污染隔 离带湿地面 积/km ²	库岸污染隔 离带滞洪库 容/亿 m ³
莱州湾	95.6	126.6	50	71	135	2.1	0.21	1 882	1 478	465.1	9.3
渤海湾	51.9	67.9	50	128	104	2.5	0.17	2 184	1 912	419.4	8.4

用闸门,清水闸门与分洪排沙闸门分开,清水闸门必要时参与分洪;最大水深不包括航道维护水深;极限低水位为抗旱最低水位。两个海湾水库合计正常和极限调节库容分别 147.5 亿和 194.5 亿 m³,如果按年均 100 亿 m³ 利用淡水资源,海湾水库正常调节和极限调节库容分别是平均水量的 1.47 和 1.94 倍。因此,海湾水库可以多年调节,供水保证率高。

华北地区严重缺水^[10]而且调节能力有限,如此大规模回收淡水且调节性能高的海湾水库对降水变差较大、水资源很不稳定的华北地区而言非常难得。由图 6 可见,两个海湾水库直接将黄河口与天津、河北和山东半岛连接为一体,可为泛三角洲地区统筹配置水资源提供便捷设施;进一步利用其巨大的调节和供水能力,还可以为华北地区水资源配置和优化布局提供重要条件。黄河口可回收的淡水与海湾水库的储存资源结合,对缓解华北平原干旱具有重要作用。同时,海湾水库和库堤建设可改造盐碱滩涂、新增耕地和形成环渤海西岸的休闲旅游带。建设海湾水库最大的和最主要的工程是库堤,包括 199 km 海堤和 239 km 岸堤。根据海湾地形初步计算,海堤和岸堤建设需要的土石方量分别为 4.64 亿 m³ 和 0.38 亿 m³,其中库堤可与高速公路和等级公路结合建设,在海湾水库内部还可布局大型深水航道、港口等。

在黄河口建大型水库,泥沙淤积和水库寿命是重要问题。按天然多水多沙时期的情况,假设分沙量中只有 10%的泥沙淤积在三角洲湿地,则进入莱州湾水库和渤海湾水库的沙量分别为 3 800 万/a 和 1 400 万 t/a,预测 200 年后两个水库将分别淤积 58 亿 m³ 和 22 亿 m³,占其总库容的 20%和 24%,但这些泥沙主要淤积在库底,对水库调节库容影响较小。由于当前河口三角洲沉降、侵蚀、生态修复和水库净化等过程均需要泥沙,上述估算的水库淤积量还有很大余地。因此,考虑到生态和三角洲地貌修复,水库淤积在相当长时期内都不会明显影响海湾水库调节库容和库区的航道,工程可实现长期利用。

莱州湾及滨海地下卤水浓度较高^[19],海湾水库和沿岸滩涂淡化脱盐需要一个过程。由于海湾水库总库容(379 亿 m³)相对黄河出海径流量较小,特别是在未来几十年黄河沙少,几乎可以让黄河径流全部穿海湾水库出海驱盐。因此,估计在海堤施工期(按 5 000 万 m³/a 吹填能力,估计需要 10 a)内即可基本淡化海湾水库。

1.3 保护系统

黄河下游是外溢型河流,除东平湖和滩区,几乎没有污染汇入,河口水质与小浪底水库的水平相当,长期优良。但黄河泥沙含量较高,颗粒态碳氮磷浓度较高,海湾水库属于浅水型人工湖泊,透光度高,碳氮磷通量若不能有效控制,水体富营养化的风险较大,更重要的是海岸周边中小河流面源较多,海湾水库的水质需要加强保护。同时,海岸地区防洪和土壤排污排盐等问题都亟待解决。综合治理方案设计了激活河口三角洲湿地、构建海湾水库的前滞湿地和建设津冀胶海岸污染隔离带(湿地)的 3 套保护措施。

a. 三角洲湿地。三角洲湿地是黄河生态保护的重要内容之一,在三角洲稳定的前提下,保护湿地生态系统需要补水和补沙。目前关于湿地需水量研究很多^[20-23],但黄河泥沙富含氮磷等生源物质对河口湿地的影响研究长期被忽视。在气候变化和剧烈人类活动影响下,河口湿地淡水不足、面积萎缩、结构功能和生态退化、污染和盐碱化等问题严重制约河口地区的发展^[19-20]。清水河网穿越现有河口湿地增加了水量和营养补给,可配置生态用水 10 亿 m³,超过了连煜等^[20] 研究中给出的期待最高配置额 138%,可彻底结束干枯面貌,受淡水严重限制的湿地生产力水平可得到大幅提高,加上一定数量自然泥沙淤积,湿地生境可得到显著改善。更重要的是,几十公里流程的河网可在激活国家湿地公园^[24]湿地生态系统的同时,成为海湾水库营养和泥沙的重要过滤屏障,可显著降低碳氮磷的入库总量。

b. 前滞湿地。前滞湿地是降低河湖库氮磷等营养物质通量最有效的方式^[25-27]。加拿大 Winnipeg 湖

通过上游小水库群拦截了 92% 的磷和 68% 的氮,使主湖区水华得到显著控制^[27]。天然的黄河泥沙颗粒态磷占总磷的 99.8%,泥沙吸附沉降可以有效降低水体溶解磷浓度^[28],这是黄河大型水库显著改善水质的主要原因。因此,清水流路进入海湾水库后,在进口段划定浅水区域培植水生植物等定向促淤和吸收营养;一段时期后,一定规模的两栖浅水湿地可成为海湾水库避免水华的第二道保护屏障。在有效管控之下,前滞湿地可以逐步促进入库营养的收支平衡。随着海湾水库前滞湿地淤积范围的增加,河口和前滞水库湿地将成为鸟类天堂。由于前滞湿地自然淤积较慢,建议在开挖深水航道时在河口一侧堆砌低坎,促进水库前滞湿地形成的同时也利于库区深水航道保护。

c. 库岸污染隔离带。库岸污染隔离带是沿岸中小河口防洪、海湾水库污染隔离和滨海生态保护的重要设施。两个海湾水库跨津冀胶海岸带的岸线长度为 237 km,大量中小河流被海湾水库挡住出海通道,必须重新考虑防洪、排污和排盐措施。因此,在加强沿岸地区污染防治基础上,综合治理方案考虑将滨海滩涂 1.5 m 高程以下、距岸堤 1~4 km(面积 885 km²) 范围规划为库岸污染隔离带,用于承担防洪滞洪、排污排盐和改善滨海生态环境面貌的任务。同时,这里也可成为大型的滨海休闲旅游带。库岸污染隔离带整体景观是岸上湿地,主要工程包括各河口加高防洪堤(近海堤防高程不低于 3 m)、跨水库岸堤溢洪堰(顶高程 2 m)、顺岸旱渠、排污染堤沟、盐污汇集区、高位水塘(泵站)和盐污排海涵管。顺岸旱渠(渠底高程-0.5 m)将湿地连通一体,成为滞洪水库,初步估算滞洪库容为 17.7 亿 km³。一般洪水先在库岸污染隔离带滞洪,汛后逐步排海;水位超过 2 m 后洪水进入海湾水库。虽然洪水对海湾水库水质或有一定影响,但因滞洪库容较大,支流同时发生大洪水概率不大,防洪安全不会出现问题;而且海湾水库挡潮,有效避免风暴潮影响,中小河口泄洪条件优于天然情况。排污堤沟顺岸布置,沟底高程-2 m,可将耕地和滩涂面源污染和土壤灌溉等释放的盐集中排海,同时保护湿地环境景观。高位水塘水位建议高于最高海平面(6 m 高程),涵管尺寸根据排污排盐洪的需要设计。因此,岸库污染隔离带是集防洪、排污排盐、生态和环境面貌改善于一体的工程。

当前河口沿岸滩涂受海水影响区间总面积为 5098 km²,如考虑地下盐水入侵,则面积更大,坑塘和盐碱滩涂面积为 4066 km²。海湾水库和库岸污染隔离带可将滩涂盐源切断,加上排污排盐设施,奠定了滩涂淡化的基础。通过自然降水、增加灌溉冲洗

和排污排盐,津冀胶海岸现有的坑塘、沼泽和盐碱滩涂等有希望在一定时期内变成耕地,初步估算可增加耕地 3393 km²。沿海地带自然降水较多,海湾水库保障灌溉,这些耕地可以改造成为旱涝保收的高标准农田。同时,在岸堤外布局 8.85 万 hm² 的滨水生态湿地也将成为休闲旅游区。渤海西侧滨海地区彻底改善生态环境面貌对改善华北地区人居环境非常重要。

1.4 服务功能

综合治理方案除对河口和泛三角洲水资源作用外,还可通过与黄河中游工程体系互动和多目标利用襄助完善黄河水沙调控机制、优化更大范围的水资源配置和改善区域交通运输等发展基础条件。

1.4.1 襄助完善黄河中游水沙调控

黄河流域已建水库库容超过 700 亿 m³,中游防洪减淤工程和高标准堤防等将下游防洪能力提高到 1000 年一遇以上水平,但是缺水和泥沙问题没有彻底解决,中游工程体系不能切实用于“拦粗排细”。巨大的水资源压力迫使小浪底等工程在汛期降低水位防洪减淤难度极大,实际运行中普遍超汛限运行,不惜降低防洪能力和浪费拦沙库容,甚至挤压输沙水量致使下游河槽萎缩。另外,受防洪减淤目标限制,中游水库不得不大量弃水用于下游低效排沙,工程长期偏离规划目标运行,对黄河下游当前和长远安全都不利。

防洪减淤工程发挥作用的必要条件是控制汛限水位。只有在较低汛期水位情况下水库才能“拦粗排细”和实现规划要求的防洪能力。采用河口多口门集中蓄清排浑方式化解三角洲水沙矛盾后,海湾水库较大的蓄水能力可为中游防洪减淤工程汛期调度产生的弃水兜底,一定程度上减少小浪底等工程的水资源约束和黄河向山东、河北等地直接分水的限制,从而大幅提高汛期调度的自由度,尽量按原规划要求的“拦粗排细”原则调控。山东、河北、天津引黄水资源配额为 90 亿 m³/a,占输沙水量(200 亿~240 亿 m³/a)比例很大,通过海湾水库部分置换水源后,沿岸引黄水量减少,从而更大限度保障下游输沙水量,尤其是汛期“引黄淤河”^[29]的现象可得到明显改善。水沙调控的优化有利于小浪底等水库在汛期更多排洪排沙,提高防洪能力,稳定扩大下游河槽和降低“二级悬河”的风险,以促进中游防洪减淤工程体系更长时期为下游减淤和保障长远安全。

1.4.2 区域水资源配置

假设海湾水库没有耗水,将平均每年从黄河回收的 110 亿 m³ 淡水用于增加生态用水、新增土地灌溉用水和净增水资源 3 个方面。三角洲面积约 6000 km²,其中河口湿地重点保护区面积 1841 km²

(陆域 634 km²);莱州湾水库和渤海湾水库岸边污染隔离带湿地总面积 885 km²。根据华北地区平均降水量估算和连煜等^[20]的研究,湿地年均需要增加耗水量 10 亿 m³。按华北地区 1998—2015 年亩均需水量 250 m³^[22]配置,对沿岸滩涂改造新增加的耕地需要提供 12.6 亿 m³ 的灌溉用水。综合治理方案可为地区新增加 87.4 亿 m³ 水资源,作为初步设想,上述新增资源可为天津、河北、山东分别提供 15.0 亿、36.2 亿、36.2 亿 m³ 水资源(表 2),表中黄河分水调整量为通过黄河取水增加山东在黄河以北地区的水资源量。天津增水量超过其 2017—2019 年平均用水量(28.5 亿 m³)的 50%,河北和山东增水量达到常年地表水资源总量的 30%和 20%。另外,海湾水库还可在持续干旱年份增加供水,可降低 0.5 m 水位再取水 21.3 亿 m³,以作为工程水资源韧性,对水资源十分紧张和储水能力较低的华北地区^[30]增加抗旱能力十分重要。

表 2 综合治理的初步水量分配方案

Table 2 Preliminary water allocation in comprehensive management plan					
					单位:亿 m ³
地区	从海湾水库分水量	黄河分水调整量	湿地生态耗水量	改造滩涂耕地灌溉量	净增水资源量
黄河南	46.9	-6	5.2	5.5	30.2
黄河北	63.1	6	4.8	7.1	57.2
合计	110.0	0	10.0	12.6	87.4

初步考虑,莱州湾水库主要分担胶东半岛(青岛、烟台、威海)、潍坊、东营、淄博、济南和滨州部分地区的农业供水;渤海湾水库主要分担天津和河北沧州、衡水、保定(包括雄安)、廊坊以及山东滨州、德州部分地区的城市和农业用水。黄河南、北分别可净增加水资源 30.2 亿、57.2 亿 m³。山东主要从莱州湾水库提水,以潍坊峡山水库(总库容 14 亿 m³,坝顶高程 44 m,距莱州湾潍河挡潮闸 59 km)为中心,提水约 25 亿 m³/a,再建连接济南和青岛的高位渠道与引黄济青和南水北调胶东干线联网,自流覆盖除烟台和威海外的主要受水区;烟台和威海直接从莱州湾水库提水;聊城和德州通过引黄指标调整直接从黄河补充 6 亿 m³。河北 30 m 高程以下地区可直接从渤海湾水库提水,按供水、排涝和航道统筹,整治 120 km 赵王新河至独流减河河段向雄安供水。天津直接从渤海湾和北大港水库取水 15 亿 m³,原南水北调中线改为天津和雄安备用水源。河北、山东等滨海地区滩涂区改良农田直接从海湾水库提水。华北地区增加的水资源中,平原水资源主要来自周边山区,在总量增加前提下根据“高水高用”原则进一步优化当地水资源配置,海湾水库供水的辐射范

围更大,安全程度更高,对区域生态环境改善和地下水漏斗修复也可发挥作用^[31-32]。

1.4.3 改善区域发展基础条件

京津冀协同发展和黄河流域高质量发展聚焦点在河口三角洲。京津冀人口密度超过全球主要非城市经济体和国内其他经济区,但区域对外开放和对内协同发展程度明显低于其他地区。除水资源外^[9-10],地理、生态和人口也限制着区域经济社会发展^[11,33]。渤海西侧淤泥质滩涂和浅水环境是大型港航建设主要障碍^[34],现有港口受航深严重限制,胶东优质港口受交通限制了辐射范围和发展规模,黄河流域几乎不通航^[33]。而且,沿海环境质量、滩涂和休闲旅游资源等也是重要短板。综合治理方案可改善航运、道路交通、海岸带生态和人居环境。

a. 形成包括龙口和海湾水库的超大型深水港口群,与曹妃甸、旅顺等结合,构成我国北方大湾区发展需要的航运体系。海湾水库完全隔断外来泥沙,深水航道维护便利,通过跨海堤大型低水头船闸可使水库同时成为深水航道和超大港池,预计可满足 5 万 t 级海轮双向满载的 12.5 m 航深要求,使库岸市县直接通航;在东营建新港拉近与城市距离,还可作为未来黄河通航发展基点;降低黄骅港等深水航道维护成本,扩大港池规模和停泊条件;天津大港建设高标准新港的发展规模和潜力更大,逐步替代天津港,可显著改观滨海新区环境面貌。

b. 依托海堤岸堤形成便捷交通。海堤高速公路可将北京至东营(425 km)和烟台(697 km)的 G228 高速公路分别缩短 89.3 km 和 134 km,使京津冀胶更紧密结合,为环渤海大湾区对外开放和对内协同发展创造更好基础条件。

c. 构建优质的华北海岸休闲旅游带。天津至胶东半岛海岸带气候优越、水陆空间大、地貌多样。海湾水库除将滩涂转变成耕地外,还可造就 8.85 万 hm² 滨海湿地。通过交通体系将滨海湿地、国家湿地公园(9.6 万 hm²)和威海烟台等优质旅游资源连成一体,这一多样化景观和滨海休闲旅游带是区内特大城市和人口密集地区尤为需要的资源,充分发展可显著提升区域人居环境和发展势能。

2 综合治理面临的主要问题及对策

2.1 周边海域及河口潮动力响应

为考察海湾水库对周边海域的影响,特别是对河口附近潮流动力输沙能力的影响,本文计算了黄渤海水动力学条件变化情况,并研究了改进措施。计算基于 Delft3D-Flow 平面二维水动力学模型^[35-36],范围是北纬 34.38° 以北的部分黄海和全部

渤海,网格尺度为 0.02°(1.5~1.6 km)、时间步长 5 min,模拟了包括大中小潮的 1 月连续过程。根据潮挟沙能力与水流强度关系,采用连续 2 d 大潮平均潮动力为指标度量潮流强度,既可比较潮流紊动强度也能间接反映潮流扩散泥沙和污染物能力的变化,计算公式为

$$T_s = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} v_i^3 dt \tag{1}$$

式中: T_s 为平均潮动力; v_i 为潮流速; t_n 为统计时间长度。

模拟渤海及黄河口在现状、海湾水库、增加改进措施等不同情况下平均潮动力空间分布,结果如图 7 所示,这里改进措施为在建海湾水库基础上再在浑水流路口外加导河。由图 7(a)可见,现状海湾潮动力较强区域主要分布在辽东半岛、龙口、曹妃甸和刁口河口门(原 M_2 无潮点)附近,清水沟口门相对较弱,这与胡春宏等^[37]研究结果基本一致。由图 7(b)可见,海湾水库围占导致渤海湾(尤其是西侧)潮流强度整体减弱,曹妃甸附近水域也会受到影响,刁口河附近潮动力指标降低超过 50%,清水沟幅度更大。造成潮动力减弱主要是因为海湾水库弱化了原口门突出淤积地形的作用,这对海域污染扩散会有一定影响,也不利于河口泥沙扩散。当然,随着海

堤将排污口沿岸外移和水深加大,污染扩散能力不一定会显著降低。对黄河口淤积而言,为提高泥沙向外海的扩散能力,可借助多口门格局带来的防洪减淤优势^[2],采用双堤导河措施主动将浑水流路口门外延(15~20 km)形成新的口门绕流突体或让大沙洪水优先选择潮流较强的刁口河排海,通过工程和管理措施营造局部强绕流,增强口门输沙和冲刷能力,构造稳定的浑水流路口门^[38]。计算了 15 km 和 20 km 两种导河长度,图 8 为不同情况下平均潮动力与周边海域半径的关系,可见导河口门外延可显著提高口门周边潮动力强度,减少口门淤积和外延。虽然河口略外延或会抬高相对侵蚀基面,但因西河口以下浑水流路最大泄洪流量从原来 10 000 m³/s 降低到 5 000 m³/s,预计不会影响干流防洪和西河口水位。

渤海湾潮流强度降低是海湾水库可能带来的最大不利影响,其作用还需要进一步评估。另外,近年水沙剧烈减少已经使河口冲淡区范围和功能严重退化,由于多口门格局实质上可加强黄河输沙水量和出海泥沙,因此综合治理方案的影响应该有限。但是,黄河口高含沙浑水冲淡区的生态价值独特,是周边海洋鱼类的重要生境。因此,黄河口综合治理对冲淡区生态影响和修复、改善和保护措施还需要深入研究。

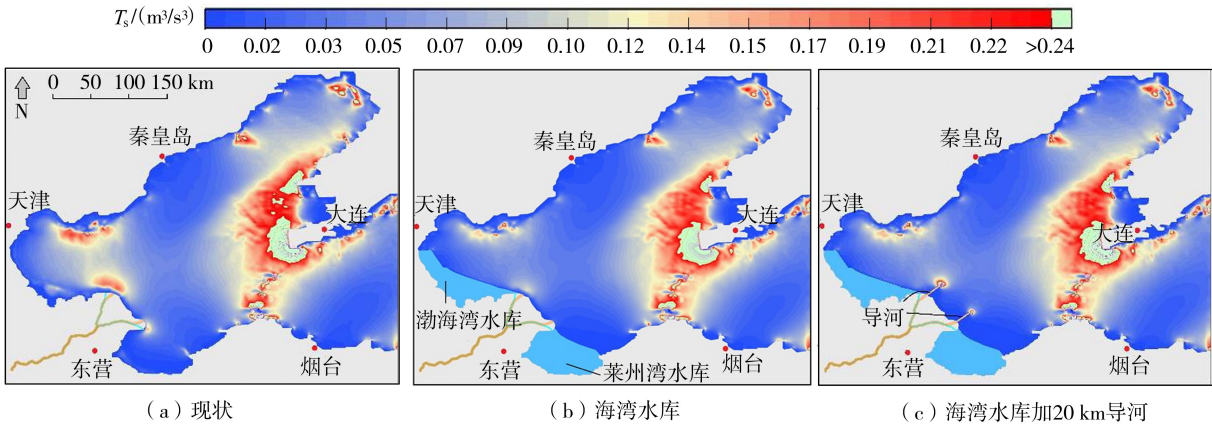


图 7 不同情况下渤海及黄河口平均潮动力的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of mean tidal forces in the Bohai Sea and the Yellow River Estuary under different situations

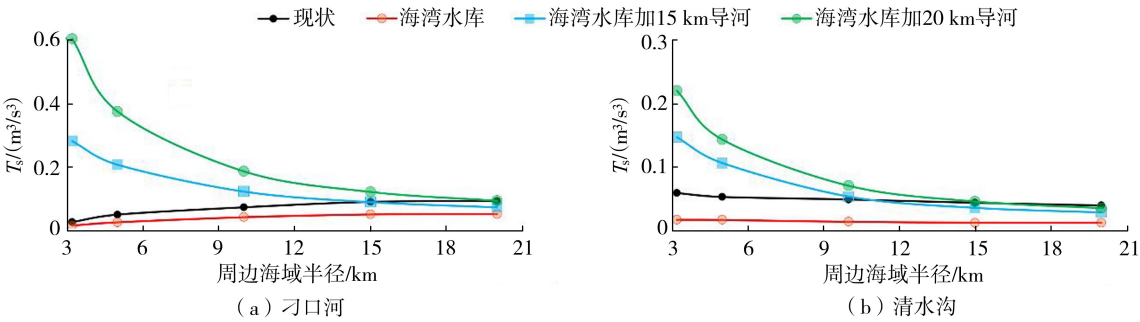


图 8 不同情况下平均潮动力与周边海域半径的关系

Fig. 8 Relationship between mean tidal force and radius of surrounding sea area under different situations

2.2 库堤建设的工程可能性

海湾水库建设最主要和最大的工程是库堤,包括 199 km 海堤和 239 km 岸堤(图 6)。根据海湾地形布局,海堤和岸堤土石方量分别为 4.64 亿 m³ 和 0.38 亿 m³。库堤可结合高速和等级公路建设,海湾水库内部还可布局深水航道。为提高海堤抗风暴潮强度,可采取内外套堤,内套堤材料以就近淤泥和海床细砂为主,外套堤高速公路路基和迎海面在吹填基础上采用点阵混凝土搅拌桩加固和采用碎石、块石和混凝土结构护面。岸堤需要方量较少,可主要采用沿岸陆侧挖泥吹填建设。陆侧挖方结合库岸污染隔离带湿地内排污排盐堤沟、洪水联通渠道和滞洪水库建设。黄河口周边淤泥质海岸、莱州湾海湾底有深厚新生代覆盖层^[19],库堤建设采用当地淤泥吹填和海床细砂加固,部分方量还可与水库内深水航道开挖方量平衡。海堤和岸堤是综合方案最大土石方工程,也是可行性的关键。

这种规模的围海工程和海岸水库建设,在荷兰、俄罗斯、日本、韩国等和我国长江口都有先例^[18]。荷兰 1932 年建成的须德海工程海堤,筑的堤土石材料主要由南欧长途海运而来,堤长 32 km、顶宽 90 m、高出海平面 7 m,1932 年建成;海堤建成后,40 年开垦土地 16.7 万 hm²,同时带来很大的航运和道路交通便利。迪拜棕榈岛、新加坡裕廊岛、长江口深水航道、黄河下游淤背固堤和上海南汇填海造陆等工程方量都接近或已超过 5 亿 m³。我国曹妃甸填海工程疏浚强度超过 5 000 万 m³/a,长江口深水航道维护性挖泥规模 8 000 万~9 000 万 t/a^[39]。黄河下游标准化堤防建设的 5.4 亿 m³ 方量主要是河槽和嫩滩挖泥^[40]。黄河口周边海域松散的沉积覆盖层深厚,莱州湾海床下 6~15 m 深度范围 50%~80%是全新世沙质沉积物^[41],大量淤泥和中细沙是很好的筑堤材料。渤海是弱潮海域,潮动力强度远低于荷兰瓦登海和我国其他海域,筑堤难度也会低于上述地区。我国挖泥船和海洋疏浚吹填能力世界领先,因此该工程没有限制性困难。而且,渤海湾筑堤材料随地可取,吹填工程的工作面可以很大,每年可完成吹填 5 000 万 m³,成本和进度完全可控。因此,我国完全具有建设上述规模海堤的技术和能力,预计 10 年时间可以建成。

2.3 工程的运行成本

海湾水库是向缺水地区就近供水的水资源工程,建设成本显著低于其他调水工程。工程建成后,维持供水等公益目标需要的持续性成本主要是扬水耗能、管理和维护。假设全部供水都从海湾水库提水,按 60 m 扬程估算,单位扬水耗电 0.18 kW·h,再

加上库岸污染隔离带排污排盐等耗电,初步计算每年直接耗电 20 亿 kW·h。这些能源可通过绿色方式解决。环渤海光伏强度在我国东部最高,海岸带风资源丰富,海湾水库可适当利用库区水面和空间资源开发风和光电,为供水和排水提供可再生电力。而且,海湾水库还可为区域带来可观的电力调节资源和可再生电力发展空间,实现零碳和低成本运行。

3 结论与建议

3.1 结论

a. 在多口门格局抑制河道延长、溯源淤积、降低干流洪水位、化解河口水沙矛盾基础上,提出在西河口附近干流建闸门控调枢纽、海湾水库和保护系统等形成河口综合治理方案。初步研究表明,综合治理方案可实现黄河防洪减淤、水资源利用、三角洲保护和发展目标的统一。

b. 综合治理方案可为华北地区开辟可观的调节资源。将天津和胶东半岛连成一体莱州湾和渤海湾两大海湾水库,正常和非常调节库容分别为 148 亿 m³ 和 195 亿 m³,具有多年调节能力同时兼备供水能力。综合治理方案可年均回收黄河出海淡水 110 亿 m³,净增加水资源 100 亿 m³,天津、河北、山东沿岸地区可分别增加淡水资源 15 亿、36.2 亿、36.2 亿 m³。水资源的水质可以得到充分保证。

c. 通过引水引沙补充三角洲和河口湿地生态耗水,为修复地面沉降和岸线侵蚀提供持续的泥沙来源、增加和繁荣河口湿地。综合治理方案还可解决沿岸防洪、排污和排盐等问题,隔断近岸盐源和提供淡水改造滩涂,新增灌溉耕地 3 390 km² 和造就 8.85 万 hm² 海岸湿地休闲旅游带。显著改善三角洲和周边海岸带生态环境面貌。

d. 在黄河来沙最大和最不利的条件下,200 年泥沙淤积量可减少海湾水库总库容的比例小于 25%,对调节库容影响较小,水库可长期利用。通过河口综合治理,还可进一步襄助完善黄河中游防洪减淤工程体系运行,在增加水资源总量前提下显著优化华北水资源配置,可以进一步加强黄河输沙水量、实现最大限度的防洪减淤和维护下游安全、修复区域生态环境和在航运、道路交通和人居环境改善等方面为泛三角洲地区提供重要的发展条件。

3.2 建议

保障黄河长治久安是国家的重大关切,在当前经济社会和技术条件下,河口综合治理方案中直接的原则性问题应该都可以解决。海湾水库在世界各地已有较多应用,荷兰须德海工程已经稳定运行近一个世纪,我国长江口青草沙水库也是典型的海湾

水库。这些工程所在区域(北海和长江口)的潮动力都显著强于渤海,迄今没有出现原则性问题,而且在安全、生态和水资源方面都发挥着重要作用。由于黄河口治理受泥沙问题的严重制约,通过多口门格局化解泥沙问题是河口综合治理的基本前提,但进一步的综合治理方案需针对生态环境等方面的正反作用开展更多的深入研究和监测。建议围绕新格局开展以下研究:①河口长期不淤口门形式;②渤海浅水及滩涂区环境容量、污染控制及生态演化(包括河口冲淡区生态价值和发展);③新形势下黄河下游水沙调控和区域水资源优化调控配置;④全球变暖进程下泛三角洲的生态环境和灾害变化及适应能力;⑤泛三角洲滩涂土地保护利用、便捷旅游交通、运输和渤海大湾区建设等高质量发展方向;⑥加强河口和津冀胶沿海生态环境监测。

参考文献:

[1] 张金良. 构建黄河流域水网的思考[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 1-5. (in Chinese))

[2] 周建军,张曼,孙嘉悦. 黄河下游长远安全研究:河口格局优化[J]. 水资源保护, 2025, 41 (5): 142-150. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man, SUN Jiayue. Research on long-term safety of the lower Yellow River: estuary outlet optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5): 142-150. (in Chinese))

[3] SUN Jiayue, ZHANG Man, ZHOU Jianjun. Tidal responses of the semi-enclosed Bohai Sea to the long-term expansion of the Yellow River Delta [J]. Frontiers in Marine Science, 2025, 12: 1644888.

[4] 刘健,林琳,陈学群,等. 黄河三角洲地区降水时序变化特征研究[J]. 水资源保护, 2012, 28 (1): 22-28. (LIU Jian, LIN Lin, CHEN Xuequn, et al. Characteristics of variation of precipitation time series in Yellow River Delta [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (1): 22-28. (in Chinese))

[5] 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, 41 (6): 167-175. (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, 2025, 41 (6): 167-175. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 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 Jiabin, 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))

[8] 李玲慧,何国华,赵勇,等. 京津冀水-食物系统风险评估[J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 49-57. (LI Linghui, HE Guohua, ZHAO Yong, et al. Risk assessment of water-food system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 49-57. (in Chinese))

[9] 宾零陵,蒋睿文,曹永强,等. 京津冀水资源生态足迹动态变化与预测[J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 32-38. (BIN Lingling, JIANG Ruiwen, CAO Yongqiang, et al. Dynamic change and prediction of ecological footprint of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 32-38. (in Chinese))

[10] 黄峰,杜太生,王素芬,等. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21 (5): 28-37. (HUANG Feng, DU Taisheng, WANG Shufen, et al. Current situation and future security of agricultural water resources in North China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21 (5): 28-37. (in Chinese))

[11] 赵勇,王庆明,王浩,等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24 (5): 8-18. (ZHAO Yong, WANG Qingming, WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei region: challenges and strategies [J]. Strategical Study of CAE, 2022, 24 (5): 8-18. (in Chinese))

[12] 彭少明,郑小康,严登明,等. 黄河流域水资源供需新态势与对策[J]. 中国水利, 2021 (18): 18-20. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, YAN Dengming, et al. New situation and countermeasures of water resources supply and demand in the Yellow River Basin [J]. China Water Resources, 2021 (18): 18-20. (in Chinese))

[13] 《中国南水北调工程》编纂委员会. 中国南水北调工程(前期工作卷)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2018.

[14] 中共中央、国务院. 国家水网建设规划纲要[R]. 北京:中共中央、国务院, 2023.

[15] 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))

[16] 黄河勘测规划设计研究院有限公司. 黄河下游“十四五”防洪工程可行性研究报告[R]. 郑州:水利部黄河水利委员会, 2022.

[17] 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.

[18] YANG Shuqing. Coastal reservoir technology and applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022.

[19] 高茂生,郭飞,侯国华,等. 渤海南部莱州湾晚更新世以

- 来沉积演化特征[J]. 中国地质,2018,45(1):59-68. (GAO Maosheng, GUO Fei, HOU Guohua, et al. The evolution of sedimentary environment since late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea [J]. Geology in China,2018,45(1):59-68. (in Chinese))
- [20] 连煜,王新功,黄翊,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 Chong, et al. Environmental flows evaluation based on eco-hydrology in Yellow River delta wetlands [J]. ACTA Geographica Sinica,2008,63(5):451-461. (in Chinese))
- [21] 王新功,徐志修,黄锦辉,等. 黄河河口淡水湿地生态需水研究[J]. 人民黄河,2007,29(7):33-35. (WANG Xingong, XU Zhixiu, HUANG Jinhui, et al. Study on ecologic water demand of fresh water wetland of the yellow river estuary [J]. Yellow River,2007,29(7):33-35. (in Chinese))
- [22] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报,2002,22(2):219-224. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2002,22(2):219-224. (in Chinese))
- [23] 崔丽娟,鲍达明,肖红,等. 湿地生态用水计算方法探讨与应用实例[J]. 水土保持学报,2005,19(2):147-151. (CUI Lijuan, BAO Daming, XIAO Hong, et al. Calculation methods of wetland ecological water and case study [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(2):147-151. (in Chinese))
- [24] 山东省自然资源厅,国家林业和草原局昆明勘测设计院. 黄河口国家公园总体规划[R]. 济南:山东省自然资源厅,2021.
- [25] ZHOU Jianjun, ZHANG Man, LIN Binliang, et al. Lowland fluvial phosphorus altered by dams [J]. Water Resources Research,2015,51(4):2211-2226.
- [26] MAAVARA T, PARSONS T C, RIDENOUR C, et al. Global phosphorus retention by river damming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(51):15603-15608.
- [27] DONALD D B, PARKER B R, DAVIES J M, et al. Nutrient sequestration in the Lake Winnipeg watershed [J]. Journal of Great Lakes Research,2015,41(2):630-642.
- [28] 周建军,张曼,李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. 湖泊科学,2018,30(4):865-880. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man, LI Zhe. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures [J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(4):865-880. (in Chinese))
- [29] 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 Yangui. Some issues regarding diversion and sedimentation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988(3):65-73. (in Chinese))
- [30] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [31] ZHANG Chong, DUAN Qingyun, YEH P J F, et al. The effectiveness of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project on water delivery and groundwater recovery in North China Plain [J]. Water Resources Research,2020,56(10):e2019WR026759.
- [32] 张昊,丁洁,朱仟,等. 基于 GRACE 的华北平原地下水干旱时空特征分析[J]. 人民长江,2021,52(10):107-114. (ZHANG Hao, DING Jie, ZHU Qian, et al. Analysis on spatial-temporal characteristic of groundwater drought based on GRACE in North China Plain [J]. Yangtze River,2021,52(10):107-114. (in Chinese))
- [33] 陆大道,孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报,2019,74(12):2431-2436. (LU Dadao, SUN Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River basin: a preliminary understanding and suggestion [J]. ACTA Geographica Sinica,2019,74(12):2431-2436. (in Chinese))
- [34] 严恺,周家苞. 中国的海岸带开发利用[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
- [35] Deltares. Delft3d-flow user manual[M]. The Netherlands: Deltares,2012.
- [36] 李原仪. 渤海水动力环境的数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [37] 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 Chunhong, JI Zhuwen, WANG Tao. Characteristics of ocean dynamics and sediment diffusion in the Yellow River estuary [J]. Journal of Sediment Research,1996(4):1-10. (in Chinese))
- [38] 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.
- [39] 曹慧群,周建军. 我国水利清淤疏浚的发展与展望[J]. 泥沙研究,2011(5):67-72. (CAO Huiqun, ZHOU Jianjun. Development and prospect of dredging at water conservancy works in China [J]. Journal of Sediment Research,2011(5):67-72. (in Chinese))
- [40] 李文家,李焯. 黄河下游标准化堤防的论证与形成[J]. 人民黄河,2019,41(10):53-57. (LI Wenjia, LI Zhuo. Demonstration and formation of standardized embankment in the lower reaches of the Yellow River [J]. Yellow River,2019,41(10):53-57. (in Chinese))
- [41] YAO Zhengquan, SHI Xuefa, LIU Qingsong, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai sea, China: implications for glacial-interglacial sedimentation [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,2014,393:90-101. (收稿日期:2025-01-23 编辑:王芳)