

黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术

张金良¹, 仝亮¹, 王卿¹, 段沛^{1,2}, 尚毅梓^{1,3}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:较为全面地回顾了我国黄河下游治理方略的演变,着重介绍了黄河下游治理的最新科研成果——流域“分区治理”新方略。新方略将黄河河道至大堤之间的流域空间依次划分为生态移民安置区、高效生态农业区和生态湿地等功能区,利用泥沙放淤、挖河疏浚等技术手段实施滩区再造,建设嫩滩、二滩和高滩,以达成洪水分级设防、泥沙分区落淤、滩槽水沙自由交换的水沙调控目标。采用新方略及相应的前沿技术治理黄河下游,有望实现治河与惠民双赢,促进沿黄经济带高质量发展及其水生态文明建设。

关键词:黄河下游河道;游荡性;泥沙;滩地;生态治理

中图分类号:TV85 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0041-09

Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management//ZHANG Jinliang¹, TONG Liang¹, WANG Qing¹, DUAN Pei^{1,2}, SHANG Yizi^{1,3} (1. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*; 2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*; 3. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycles in River Basins, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: The transformation of the regulation mode of the lower Yellow River was comprehensively reviewed. The new strategy of basin zoning treatment in the lower Yellow River was introduced. This mode divides the broad beach between the main channel and the levee into ecological resettlement area, high-efficiency ecological agricultural area, ecological wetland and areas for other functions. The water and sediment regulation objectives of flood control with graded standards, sediment deposition in partitioned zones, and free exchange of channel runoff and sediment are expected to be achieved by means of sediment and river dredging for the tender beach, lower beach and high beach. It is therefore believed the mode is technically sound and advanced, and the application of this model in the lower reaches of the Yellow River is bound to achieve a win-win situation of river regulation and people benefit, and it can promote the high-quality development of the economic belt along the Yellow River and the construction of water ecological civilization.

Key words: lower reaches of the Yellow River; meander; sediment; beach; ecological management

通常认为多年平均输沙量大于1亿t,或者多年平均含沙量超过10 kg/m³的河流为多沙河流,目前世界上的多沙河流有13条,其中黄河年输沙量排在首位^[1]。“水少、沙多,水流挟沙量大”是多沙河流的突出特征,譬如黄河潼关站多年平均输沙量高达9.2亿t,多年平均年径流量仅为335.3亿m³^[2]。若水流挟带泥沙能力不足,泥沙沿程淤积,在其下游就会形成“地上悬河”。泥沙淤积是多沙河流下游溃坝,形成漫滩洪水,威胁滩区居民生命财产的根源^[3]。

国际上通常在多沙河流的上中游建造水库拦截泥沙以减少下游淤积^[4]。与常规水库显著不同,多沙流水库的运用方式主要是蓄水拦沙和调水调沙^[5],即当汛期来沙时,空库或低水位运用迎汛,当洪水裹挟大量泥沙入库时,使用如排沙底孔等排沙设施进行排沙减淤;河水沙量较少时,方能拦蓄径流,蓄水兴利^[6]。多沙河流在常年输沙的作用下,河道及水库内的淤积是不可避免的,河流泥沙治理就显得尤为重要^[7]。上中游的水土流失是下游泥

基金项目:黄河勘测规划设计研究院有限公司重大规划项目(2019GS007-WW03/20)
作者简介:张金良(1963—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事黄河流域重大水工程与水沙调控研究。E-mail: jlzhangyrec@126.com
通信作者:尚毅梓(1983—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: shangyizi@126.com

沙的主要来源,所以治理的关键和根本是水土保持^[8],主要由覆盖坡面、缓截水势、截排水流、蓄存水能4种方法控制水流冲刷力,进而防止水土流失^[9],通过治沟工程、治坡工程等措施实现。根本治理所需时间长、见效慢,还需同步进行下游河道的流路治理,防止洪水灾害。多沙河流的下游曲折多弯,河床易冲易淤,由于弯道的形态约束,造成表层水流指向凹岸,后潜入河底朝凸岸流去,而底层水流则指向凸岸,后翻至水面流向凹岸,呈现凹岸冲刷而凸岸淤积的现象^[10-11]。“淤凸冲凹”造成了主流摆动不定,使得下游河段河势呈现出游荡性变化特征。“微弯型整治”就是利用多沙河流这一河流动力学特点,设置人工弯道,利用凸岸淤积来防沙排沙^[12]。

黄河是世界上最复杂难治的多沙河流,黄河下游的泥沙、悬河等问题尤为突出^[13]。从自然形态上来看,黄河下游地形地貌特征独特,断面宽浅、滩槽高差较小,尤其是河南段游荡性河道“洲滩密布、汊道交织”,而且有洪水变化急剧、同流量下的含沙量不稳定的复杂演变特点,以及水流分散,主流摆动不规律,河势变化剧烈,河床易发生冲淤且幅度大等特征^[14]。而黄河下游滩区不仅是滞洪沉沙的场所和行洪输沙的通道,也是老百姓赖以生存的家园。在国家全面建设小康社会、大力推进生态文明建设的大背景下,黄河长期存在着防洪运用和经济发展的矛盾:由来已久的“人水争地”矛盾,滩区脱贫致富投入与防洪管理调度大局之间愈发凸显的矛盾,黄河下游生态保护与滩区无序开发、低端供给之间的矛盾等,无不昭示黄河下游滩区治理矛盾的复杂性^[15]。

本文以我国在黄河下游治理方式的转变为主线,阐述黄河下游复杂难治的特点,对每个时期最前沿的治理技术进行评述,并讨论生态治理技术的发展方向,期望对黄河下游治理有所启发。

1 黄河下游治理方略的演变及其成效

黄河下游以“善徙、善淤、善决”闻名于世^[16]。自公元前600余年至1938年下游河段发生决口近1600次,重大改道5次,决溢纵横面积达到约25万km²,涉及河北、山东、河南、江苏、安徽五省^[17]。频繁的水患给下游沿岸百姓带来了巨大的灾难,黄河安危事关国家政治安定和经济发展,古往今来,许多治河思想与方略应运而生^[18],总体而言,可分为3个阶段。

1.1 第一阶段:黄河下游河道“治水防洪”

春秋以前,由于认知水平有限、治理手段落后,黄河治理局限于防洪保安,表现出从“水来土挡”到“筑堤分流”逐渐合理的演变过程。传说中共工率

众“壅防百川,堕高堙卑”,而后鲧“障洪水”未果,禹采用“因水之流”“疏川导滞”之法最终成功治水,便体现了治河思想的演变^[19]。春秋时期,齐国的管仲主张“筑堤防洪、除害兴利”,这是最早有关黄河下游修筑堤防的文字记载^[20]。战国时期,黄河下游的河岸堤防相互连贯形成一体,有记载“做堤去河二十五里”^[21],表明筑堤防洪已成为当时治河的主要手段。西汉末年,先前的堤防已很难有效防洪,黄河下游决口和泛滥频繁发生。贾让提出“治河三策”:上策是避免人水冲突,拓宽河道;中策是在黄河河道的狭窄处分水;下策是对已形成的堤防工程进行加固^[22]。这一治河策略体现了“不与水争地”的原则。受当时历史背景所限,决策者只采纳了下策,但也隐含了“宽河固堤”的思想^[23]。东汉初期,汉明帝令王景治理黄河,达到“河汴分流,复其旧迹”的良好效果,上段荥阳一片堤距数十里,两岸堤防间设置充足的宽度容纳洪水并沉积泥沙,“左右游波,宽缓而不迫”,使河床淤高明显变慢^[24],实际践行了贾让“治河三策”中的上策。此后数百年内,黄河下游未出现大型改道^[25]。北宋时期,黄河下游水患再度严重,新改河道行河不久就严重淤积。任伯雨提出“宽立堤防,约拦水势,使不至大段漫流”的治河方略^[26],表明了当时我国水利学家已经意识到“若未能妥善解决河道淤积问题,即使黄河改道也很难持久”,黄河水患与泥沙淤积有着密切的联系。在战乱动荡的两宋之际,黄河决堤后便改道南下,夹杂着大量泥沙淤塞了入海通道,致使洪水排泄不畅,四处泛滥。明朝时期,万恭和潘季驯明确提出黄河难治的根源在于泥沙^[27],认为黄河不应分流,宜采用堤防约束使其合流,再冲刷河道淤沙,并携沙入海,实现“淤不得停,则河深,河深则永不溢”,该治河主张被后人总结为“束水攻沙”。清朝时期,靳辅、陈潢延续“束水攻沙”的治河思路,直到清朝末期,黄河下游未发生大的灾害。清朝后期,自然环境变化加上治河投入减少,历经宋、明、清初所治理的明清故道比降逐渐变缓,下游河床淤积抬升再趋严重^[28],行河七百多年的明清古道被废弃,由此形成利津入海的现行河道。

1.2 第二阶段:全河“治水与治沙”相结合

1949年以后,政府认识到黄河河道“上冲下淤”的自然规律,于1953年制定出“蓄水拦沙”方案,在三门峡建设大型水库拦截上游来沙。然而,三门峡水利枢纽1960年下闸蓄水后不久就产生了严重淤积。随后总结三门峡水库的惨痛教训,在泾河、渭河、延水、洛河等主要支流继续修筑10座水库,同时展开植树造林、种草等水土保持工作^[29],实际的治

理效果也表明了“在上中游拦泥蓄水,在下游防洪排沙”是行之有效的治河策略^[30],后世称之为“上拦下排”治河方略^[31],为黄河后期进行“调水调沙”奠定了基础。

自1973年10月起,三门峡水库开始采用“蓄清排浑”运用,平水期控制水位305m,降低水库运行水位,增强排沙输沙能力,并通过水轮发电机组进行发电;来较大洪水时,水库敞泄排沙运用,把非汛期淤积的泥沙排出水库。经过改建并采用“蓄清排浑”运用之后,水库淤积的泥沙得到了有效控制,三门峡水库逐渐进入淤积平衡状态。

1986年,黄河水利委员会总结经验提出了“拦、用、调、排”四字治河方略^[32]。其中“拦”,即在上中游通过植树造林种草等水土保持措施和干支流水库的死库容运用实现拦截泥沙。“用”,即用洪用沙,在全河段采取引洪放淤、引洪漫地、淤背固堤等措施。“调”,即调水调沙,通过建设黄河干支流水库来调节水量和泥沙,将原有不利的水沙不平衡转变成适宜的水沙相适应,进而排沙排洪,同时减少下游河道淤积。“排”,即充分利用中上游水库拦沙,使得下游河道冲刷,从而比降变陡,排洪排沙能力加大,排沙排洪入海。

2002年,水利部将控制黄河洪水的方略定为“上拦下排,两岸分滞”,将处理与利用黄河泥沙的方略定为“拦、排、调、放、挖”。其中“放”,即对下游两岸进行处理时利用好一部分洪水携带的泥沙,“挖”就是通过挖河淤背,进而对黄河干堤加固,逐渐发展成“相对地下河”。至此,先后经历了“宽河固堤”“蓄水拦沙”“上拦下排,两岸分滞”“调水调沙”和“拦、用、调、排”等治河方略,真正使治黄由下游防洪走向了全河治理。

1.3 第三阶段:黄河下游流域“分区治理”

2000年以来,黄河流域下垫面条件、进入下游的水沙过程及社会经济发展水平显著变化^[33],原来的河道行洪区(滩区)人类活动频繁,进一步加大了治理难度。黄河下游滩地作为流域的重要成分,既是行洪、滞洪、沉沙的场所,也是沿黄居民生产、生活、发展的区域^[34-35]。目前黄河下游山东滩区、河南滩区居住有上百万人口,在滩区从事生产活动,影响并制约着防洪工程的建设及其调度运用^[36]。此外,1949年之后4次加高加固的堤防工程虽然确保了黄河下游70余年安澜,但也阻隔了滩区与沿黄30余座大中城市的协同发展,制约了“黄河流域生态保护与高质量发展”目标的实现^[37]。

2018年,黄河勘测规划设计研究院有限公司首次提出“分区治理”的新思路,在现状“宽河固堤”的

格局下改造黄河下游滩区,使用泥沙放淤、挖河疏浚等手段进行施工建设,形成不同功能区域。最主要的是适当加高临堤2000m以内区域形成“高滩”,将其划为生态宜居区,按照20年一遇防洪标准建设,用以安置滩区原有居民,解决群众的防洪保安难题;“二滩”为“高滩”和“嫩滩”之间的区域,经过人工改造达到5年一遇的防洪标准,同时在政府的引导和扶持下,按市场经济规律发展生态农业、环保工业等,解决移民的生产生活问题^[38];对贴近河道的“嫩滩”,可建设生态湿地景观,还能在汛期与黄河河道共同行洪输沙。这是一种流域综合治理模式,特色十分突出,通过“三滩”(“二滩”“高滩”和“嫩滩”)的生态建设,可将黄河下游塑造为“人-水-沙”和谐共存的滨河廊道^[39]。

该模式在防洪标准制定、移民安置等方面均有一定政策依据^[40],且遵循了河流水沙输移的自然规律,具有充分的可行性。“高滩”的洪水防御标准建设达到了普通县城的水平;“二滩”按照一般耕地的防洪标准来规划建设,能够抵挡住小型洪水。如此按照保护对象及其重要程度进行的洪水防御,被称为“洪水分级设防”。黄河下游中、小洪水发生频繁,采用该治理模式,泥沙多在“嫩滩”落淤,对滩区居民的生产生活影响较小。只有遭遇到数十年一遇的大洪水乃至特大洪水,“二滩”乃至“高滩”才会和河道共同行洪输沙,泥沙在整个滩区落淤,这便是“泥沙分区落淤”。此外,“三滩”彼此之间未设置隔断,不仅能够实现滩-槽水沙的自由交换,而且在各种量级的洪水发生后,其退水均能以自然状态回归河道,这也是该模式有别于以往“束水攻沙”和“宽河固堤”等方略淤滩刷槽的重要特点。

2 多沙河流域治理的前沿技术

黄河下游的治理问题需要从流域的角度来解决,这是多年工程实践获得的宝贵经验^[41]。基于这一思路,21世纪以来治黄工作者们围绕多沙河流水库运用^[42]、治沙工程结构形式优化及河道滩区生态治理^[43]等相关技术开展积极探索并取得重要成果。

2.1 拦沙水库减淤兴利运用新技术

多沙河流水库运用技术发展主要经历了3个阶段:

第一阶段以三门峡水库初期蓄水拦沙运用技术为代表,库区淤积严重,无法实现开发目标。蓄水拦沙运用技术可进一步细分为“蓄洪拦沙”和“蓄洪排沙”两种运用方式,值得注意的是,此处蓄洪拦沙运用过程中,水库的蓄水工作不仅在泥沙含量较低的非汛期进行,而且也在泥沙含量较高的汛期内进行,

因而该运用方式较适合具有较大拦沙库容的水库,这类大型水库经过长期蓄水拦沙后,仍有一部分库容满足各种兴利调度要求^[44]。我国官厅水库、三门峡水库在起初的运用上曾采用过这种运用方式,结果水库泥沙大量淤积,运行方式在后期被迫调整。后期对水库采取的蓄洪排沙运用方式,是指在水量与含沙量的量级较大的季节(汛期),只对一部分洪水进行拦蓄,且这一时期的限制水位会根据排沙水位而受到限制,当库水位超过该限制水位时,水库主动弃水^[45]。已有的刘家峡、石泉、冯家山等水库采用此类运用方式,通过控制水位运用,限制水库泥沙淤积在某一高程以下,可长期保持一定的有效库容用于兴利调度。

第二阶段以三门峡水库两次改建后“蓄清排浑”运用为代表,有效库容得到保持,实现了部分开发目标。“蓄清排浑”运用技术进一步细分为汛期滞洪运用、汛期控制低水位运用和汛期控制蓄洪运用等形式^[46]。其中,汛期滞洪运用是指在汛期采取空库迎洪、滞洪排沙,水库对洪水按泄洪能力自然滞洪,仅起到缓滞作用,洪水过后立即敞泄冲刷,把汛前蓄水期和滞洪期淤积的泥沙冲刷排出水库,排沙效果较好,能大大减少水库的淤积,如黑松林、红领巾、洗马林等水库均采用此运用方式。汛期控制低水位运用即汛期水库不泄空,而是采取限制一定的低水位进行控制运用,一般为排沙限制水位。当洪水到来时,库水位限制这一水位运行,大部分洪水排沙出库,因排走汛期大部分泥沙,依靠年际间来水的丰枯过程,可以基本控制水库淤积。青铜峡水库和改建后的三门峡水库采用的运用方式属于此类型^[47]。汛期控制蓄洪运用是在汛期含沙量较高的洪水时采取低水位控制运用,将泥沙排至库外,而含沙量较低的小洪水可以适当加以拦蓄,以提高水库的兴利效益,满足用水需求。这种运用方式主要解决水库排沙与蓄水兴利的矛盾,如山西的恒山水库。“蓄清排浑”运用技术是我国多沙河流域水库较广泛采用的技术。

第三阶段以小浪底水库拦沙初期“调水调沙”运用为代表,实现了水库及河道减淤,提升了综合利用效益^[48]。“调水调沙”是以下游河道泥沙冲淤情况为依据,对水库运用方式进行灵活且及时的调节,再充分利用水库下游河道大流量洪水过程的输沙能力,尽可能多地把水库和下游河道中的淤沙输送入海,这一运用方式可视为对“蓄清排浑”的进一步深化^[49]。21世纪以后,黄河水利委员会在总结三门峡、青铜峡、天桥、王瑶、巴家嘴等已建水库“蓄清排浑”运用经验的基础上,提出多沙河流域水沙联合调

控技术,该技术核心在于对主汛期入库的水量和沙量进行灵活调节,通过对水库的蓄、泄水时间和数量进行有目的地控制,尽可能延长拦沙水库使用年限,将减少水库淤积与下游河道减淤有机结合起来^[50]。

2.2 流域治沙工程新结构及新工艺

黄河治沙工程有着悠久的历史,随着人们对黄河泥沙问题认识的深入,加上实践经验的不断总结,一些传统治沙工程的建筑材料、建筑物类型、结构工艺形式等实用性能不断改进,其中以淤地坝和丁坝的发展最为典型。

淤地坝是以拦泥淤地为目的而修建在沟道中的坝工建筑物,在黄河流域水土流失治理中发挥着重要作用^[51]。明朝时期陕西省子洲县首次“天然聚淤”形成黄土洼淤地坝,时至今日,黄河流域已有淤地坝 5.88 万座,淤地面积约 940 km²,累积拦减入黄泥沙 95.4 亿 t,年均拦减入黄沙量超过 3 亿 t^[52]。以往的淤地坝全部为均质土坝,溃决风险高,即便增设混凝土溢洪道或在建筑材料中添加浆砌石等措施,仅可一定程度上减小溃决的风险,不能从本质上解决临坝身过流而导致坝体受损的问题^[53]。况且,作为小型水利工程,很多淤地坝的泄洪设施并不完善,极端气象条件下作用不稳定。2013 年陕西延河遭遇持续强降雨,上千座淤地坝不同程度受损;2016 年内蒙古达拉特旗西柳沟和罕台川小流域发生特大暴雨,数十座淤地坝发生决口。黄河勘测规划设计研究院有限公司开展淤地坝免管护研究,历经十余年探索研究,于 2020 年提出了一种全新的坝工结构^[54],它在土坝坝体上设置防冲刷保护层,冲刷保护层是以当地黄土为原料,由黄土、固化剂、细砂按照 6 : 3 : 1 的比例掺和,实现了原料就地取材,在提高性能的同时还降低了成本。

丁坝是河道整治建筑物,因其具有保护河岸、调整水流等功能被广泛应用,但对于黄河下游不利的河道形态,传统土石结构的丁坝在对高含沙水流控导、自身安全防护等方面都出现了不同程度的问题。对此加以改进,形成了坝垛结构和丁坝坝头保护结构两种设计,在黄河下游游荡型河段整治中普遍采用^[55]。

传统水利工程以建设水工建筑物为手段,目的是改造和控制河流。然而,河流不应只看到可供开发水资源的一面,同时更是河流系统水生生物生命的承载。我国水利行业工作者基于生态的规划和设计理念,对现有水利工程进行了深入的思考与反思,意识到河流治理不但事关河流的资源功能,还有河流的生态功能,相应地水利工程也应当在符合工程设计原理的基础上,更应该符合自然原理。目前,河堤工程仿生态改造及其新材料的研发已经提上日

程,且不局限于设计坝型满足防洪要求,更主张兼顾防洪安全与生态友好的河道整治工程形式与设计。将使用近自然的河道工程结构和材料,实现有利于水生生物繁衍生息的目的^[56],构建“韧性河道”,并在黄河下游的游荡性河段示范应用。

2.3 河道滩区生态环境治理新技术

黄河是连接河源区、上中下游及河口等生态区域单元的“廊道”,近年来黄河流量衰减,加之持续的河道治理使河滩边界发生变化,出现“人进水退”局面,污水进入河道、人水争地等造成的水环境污染、生态受损等问题凸显。

从生态视角解析,河道形态和人水争地是生态问题的症结,并随着时间的推移产生“人水争地—河道形态破坏—生态问题—人水争地”的恶性循环。因此,对河道形态和空间结构进行人工干预,是破解生态问题负循环的根本途径。黄河下游河流生态系统包含水、土等非生物环境与人类等生物要素两大部分,其特征主要表现在:水少沙多、悬河的自然特征,土地无序开发、人水争地的社会特征以及土地、村镇缀块化、物种单一等生态特征^[57]。“二级悬河”导致了洪水风险仍然存在,生态水文过程异常,水陆交错带边缘效应丧失;人水争地导致了洪水风险高、滩区经济受损、发展受限、农业农村环境污染等^[58]。这些问题导致了黄河下游生态环境破坏加剧、生态景观格局破碎的局面。

在问题识别、功能定位调整的基础上,2019年6月黄河勘测规划设计研究院有限公司提出黄河下游生态治理目标。一是以消除“二级悬河”为目标,重塑宽滩河流地貌,扭转“二级悬河”特征,恢复自然河流健康的断面形态,从结构上唤醒河流边缘效应,修复水陆交错带的湿地生境,提高生境质量,增强宽滩河流生态系统稳定性^[59]。二是以重构生态空间为目标,布局生活、生产、水沙等最适生态位,增加生态系统类型;科学布局人工缀块,连块成廊,功能融合,构建层次多样的生态空间优化格局。三是以增效生态过程为目标,加强宽滩河流生态空间的异质性,发展高效循环农业,绿色移民生态建镇,保护和培育生物多样性,促进河—滩—人复合整体有序性和自组织结构完善,提高生态系统的生态效率。

为此,笔者所在团队系统构建了多沙河流滩区生态环境治理关键技术体系,包括研发基于河湖生态增长极的选址方法、基于多维平衡的水体规模论证方法、水体生境模拟和数模验证技术、悬浮过滤人工湿地及湿地公园生态水净化系统、雨污管网防堵控流技术和污水处理总氮智控技术、生态仿生水工新结构、新型高效原位水质净化技术等新型技术与

方法,进一步保障水生态文明目标的实现。

3 讨论

黄河之所以难治,根源在于泥沙问题。自然条件下,黄河每年都会生产约16亿t泥沙,其中有12亿t流入大海,剩下的滞留在黄河下游。随着滞留的泥沙不断抬高河床,使得堤坝相对河面高度变低,如果发生洪水,便会导致洪水泛滥^[60]。历史上黄河下游的治理一直围绕防洪开展。2000年以来,随着小浪底水库建成运用,黄河下游治理进入了一个全新时期,下游防洪风险得到了有效控制,然而,上中游经济社会发展导致用水剧增,黄河下游水量持续衰减,下游居民大量在滩区从事生产活动。加之全球气候变化、极端气象天气增加,导致下游治理面临新的挑战,流域洪灾与旱灾风险共存,滩区居民防洪与保安冲突。

最新研究提出的“分区治理”实质是对黄河下游全流域进行的河道—滩槽协同治理,是对下游悬河不利形态进行重塑。具体来说,通过建设“高滩”和“二滩”有效消除“二级悬河”的倒比降,助力洪水自然漫滩并减小下游河道淤积。从已开展的原型实验发现,嫩滩淤积减少幅度更大,实践经验及模型实验均表明该模式可有效遏制黄河下游河床进一步抬升。表1为采用“宽河固堤”“束水攻沙”和“分区治理”不同方略治理黄河下游的减淤效果。由表1可见,遭遇千年一遇高含沙洪水,“宽河固堤”“束水攻沙”和“分区治理”3种治理方略的河道淤积量分别为2.06亿t、1.45亿t和1.03亿t,其中“嫩滩”的泥沙淤积量分别为1.53亿t、1.68亿t和0.77亿t;遭遇百年一遇高含沙洪水,河道淤积量分别为2.01亿t、1.44亿t和0.98亿t,其中“嫩滩”淤积量为1.42亿t、1.59亿t和0.69亿t;遭遇十年一遇高含沙洪水,河道淤积量分别为7.72亿t、6.98亿t和6.00亿t,其中“嫩滩”淤积量分别为3.85亿t、3.76亿t和2.99亿t;遭遇“96·8”洪水,河道淤积量分别为2.45亿t、2.30亿t和1.95亿t,其中“嫩滩”淤积量分别为0.27亿t、0.26亿t和0亿t。

表1 不同治理方略下的黄河下游减淤效果 单位:亿t

治理方略	淤积量			
	千年一遇洪水	百年一遇洪水	十年一遇洪水	“96·8”实测洪水
宽河固堤	2.06 (1.53)	2.01 (1.42)	7.72 (3.85)	2.45 (0.27)
束水攻沙	1.45 (1.68)	1.44 (1.59)	6.98 (3.76)	2.30 (0.26)
分区治理	1.03 (0.77)	0.98 (0.69)	6.00 (2.99)	1.95 (0)

注:括号内数值为下游河道“嫩滩”泥沙淤积量。

以黄河下游禅房断面为例,评估该断面分别采用“宽河固堤”“束水攻沙”和“分区治理”方略后,

“二级悬河”倒比降消除效果,结果见表2。由表2可见,采用“宽河固堤”治理模式后,若遭遇漫滩洪水,禅房断面滩槽高差将达到5.5 m,滩槽横向倒比降最高为0.6‰,若临近主槽生产堤决口,流速约为3.0 m/s,黄河大堤偎水7.5 m;采用“束水攻沙”方案,遭遇十年一遇洪水,滩地横向流速最高将达到3.5 m/s。分区治理方案通过“二滩”再造和“高滩”淤筑,“二级悬河”不利局面基本消除,滩槽横向倒比降不复存在,洪水自然漫滩,堤根偎水深度仅有0.9 m。

表2 “二级悬河”倒比降消除效果评价指标					
治理方略	滩槽高差/m	滩槽横比降/‰	漫滩时横向水头差/m	横向流速/(m·s ⁻¹)	堤根最大偎水深度/m
宽河固堤	5.5	-0.6	5.5	3.0	7.5
束水攻沙	5.5	-0.6	6.4	3.5	7.5
分区治理	0	0	0	0	0.9

目前,“分区治理”新模式在黄河下游河南段已有规划建设试点。该模式的实施要点可总结为^[61]:①由黄河大堤向主槽的滩地依次分区改造为“高滩”“二滩”和“嫩滩”,各类滩地设定不同的洪水上滩设防标准,不足部分通过改造治理达标;②根据滩区特点针对性地进行河道整治,稳定主槽,工作开展“二级悬河”治理、低洼地整治和利用疏浚主槽泥沙对滩区进行塑造;③划分并建设生态移民安置区、高效生态农业(旅游观光)区、生态湿地3个功能区,实施分区治理。不过该模式构建是一项系统工程,在论证实施的过程中我们需要回答“为什么以前没有这种模式,现在这种模式还有什么技术障碍,现在这种模式如何行得通,做这个事情有什么保障”4个关键问题,这就需要在泥沙科学预测、洪水主动防御、产业合理布局、滩区有序开发、多维安全保障、流域综合管理方面形成一整套技术体系。如前所述,目前已掌握了保障该模式落地实施的一些关键科学技术、如拦沙水库减淤兴利运用新技术,流域治沙工程新结构及新工艺、河道滩区生态环境治理新技术等。

长远来看,在黄河下游河道“宽河固堤”的格局下改造黄河下游滩区,并采取生态治河的系列措施,黄河下游宽滩区规划为不同功能区域,实现“洪水分级设防,泥沙分区落淤,滩槽水沙自由交换”的设计理念,如若实施,将很大程度上有助于黄河下游生态廊道构建,并为连接沿黄城市群及打造黄河下游生态经济带提供良好资源基础条件。

4 结 语

不利的河道形态、滩区经济发展与治河的矛盾以及人水无法和谐共生等问题,造成了黄河下游治理形势严峻、滩区良好发展建设任务艰巨、沿黄城市

群生态空间匮乏的局面,下游滩区也成了治黄工作的重点和难点。尽管黄河下游问题复杂难治,但中华民族几千年来一直在积极探索和不懈尝试,竭力谋求最好的治理模式。从治水防洪为主,到治水与治沙相结合,再到黄河下游滩区综合治理,以及当今的水库运用、生态治理等模式,无不体现了中国人民的智慧和勤劳。

本文重点介绍了黄河下游“分区治理”新方略,这一方略不仅完好地体现了黄河下游滩区水沙交互和行洪滞洪沉沙功能,而且进一步巩固和加强下游原有“宽河固堤”治理格局,是对《黄河流域生态保护和高质量发展战略规划》的落实实施。该模式将滩地分区设定不同的防洪标准,在保证防洪的基础上,在这些滩地安置群众,发展生态产业,从而实现治河与惠民双赢的目的。

黄河下游作为整个流域范围内人水矛盾最为突出的区域,区域内社会、自然、经济等因素交织相互影响,错综相连。仍需深入研究游荡型悬河生态恢复重建与宽滩治理关键技术,这对于确保多沙河流自然属性及其社会属性的整体协调意义重大,同时对筑牢国家生态安全屏障、推进生态文明建设、满足居民对优美生态环境新期待也有重大意义。

参考文献:

[1] ZHANG Jinliang, SHANG Yizi, LIU Jinyong, et al. Optimisation of reservoir operation mode to improve sediment transport capacity of silt-laden rivers [J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: W125951.

[2] 李国英. 黄河调水调沙[J]. 中国水利, 2002(11): 29-33. (LI Guoying. Water and sand diversion in the Yellow River[J]. China Water Resources, 2002(11): 29-33. (in Chinese))

[3] 张金良. 基于悬河特性的黄河下游生态水量探讨:“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之三[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 1-4. (ZHANG Jinliang. Study on ecological water volume of the Lower Yellow River based on perched-river characteristics: “study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the Lower Yellow River”(Ⅲ)[J]. Yellow River, 2018, 40(9): 1-4. (in Chinese))

[4] 费祥俊. 黄河小浪底水库运用与下游河道防洪减淤问题[J]. 水利水电技术, 1999, 30(3): 1-5. (FEI Xiangjun. Problem of Xiaolangdi Reservoir regulation in the Yellow River and silt reduction and flood protection in the lower reaches[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(3): 1-5. (in Chinese))

[5] 乔铨, 胡慧杰. 黄河下游生态水量调度实践[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 26-30. (QIAO Yu, HU Huijie. Practice of ecological-oriented water regulation in the

- lower Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(9):26-30. (in Chinese))
- [6] 郭庆超,胡春宏,曹文洪,等. 黄河中下游大型水库对下游河道的减淤作用[J]. 水利学报,2005,36(5):511-518. (GUO Qingchao, HU Chunhong, CAO Wenhong, et al. Effect of large-scale reservoirs on sedimentation reduction in Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5):511-518. (in Chinese))
- [7] 田勇,孙一,李勇,等. 新时期黄河下游滩区治理方向研究[J]. 人民黄河,2019,41(3):20-24. (TIAN Yong, SUN Yi, LI Yong, et al. Study on the management strategy of the floodplain of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(3):20-24. (in Chinese))
- [8] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊,2017,32(1):11-19. (LIU Guobin, SHANGGUAN Zhouping, YAO Wenyi, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1):11-19. (in Chinese))
- [9] 李宗善,杨磊,王国梁,等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报,2019,39(20):7398-7409. (LI Zongshan, YANG Lei, WANG Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7398-7409. (in Chinese))
- [10] 王双明,杨红,潘光在. 连续急流弯道水流泥沙的数值模拟[J]. 泥沙研究,2002,23(6):39-44. (WANG Shuangming, YANG Hong, PAN Guangzai. Numerical simulation of supercritical flow and sediment in channel with continuous curves [J]. Journal of Sediment Research, 2002,23(6):39-44. (in Chinese))
- [11] 汤韬,李志威. 黄河源区弯曲河群分布与形态及边界条件[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):10-16. (TANG Tao, LI Zhiwei. Distribution, planform and boundary conditions of meandering river groups in source region of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(1):10-16. (in Chinese))
- [12] 易雨君,王兆印,张尚弘. 考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(I):模型的建立[J]. 水力发电学报,2010,29(1):126-132. (YI Yujun, WANG Zhaoyin, ZHANG Shanghong. Two-dimensional sedimentation model of channel bend(part 1): development of the model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):126-132. (in Chinese))
- [13] 张金良. 黄河下游滩区生态再造与生态治理[J]. 人民黄河,2017,39(6):24-33. (ZHANG Jinliang. Reconstruction and ecological management of the Lower Yellow River floodplain [J]. Yellow River, 2017, 39(6):24-33. (in Chinese))
- [14] 费祥俊,舒安平. 多沙河流水流输沙能力的研究[J]. 水利学报,1998,29(11):38-43. (FEI Xiangjun, SHU Anping. Investigation on sediment transport capacity with high concentration for fluvial river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(11):38-43. (in Chinese))
- [15] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J]. 改革,2019(11):33-39. (JIN Fengjun. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019(11):33-39. (in Chinese))
- [16] MOSTERN R. Sediment and state in imperial China: the Yellow River watershed as an earth system and a world system[J]. Nature and Culture, 2016, 11(2):121-147.
- [17] 涂海洲. 历代治河方略与河流中的三对矛盾[J]. 人民黄河,1986(3):58-61. (TU Haizhou. Policies of river improvement implemented in the past dynasties and the three main contradictions related to water courses [J]. Yellow River, 1986(3):58-61. (in Chinese))
- [18] 何予川,崔萌,刘生云,等. 黄河下游河道治理战略研究[J]. 人民黄河,2013,35(10):51-53. (HE Yuchuan, CUI Meng, LIU Shengyun, et al. Study on strategy of river training in the Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2013, 35(10):51-53. (in Chinese))
- [19] XIA N. Studies on the legend of Dayu flood control in the multi-dimension horizon[J]. Journal of Yangtze University (Social Sciences Edition),2015, 38(3):8-11.
- [20] 李芝乾,李健胜. 《左传》中所见水患研究[J]. 兰台世界,2019(4):150-153. (LI Zhiqian, LI Jiansheng. Study on floods in Zuo Zhuan[J]. Lantai World, 2019(4):150-153. (in Chinese))
- [21] YAN M. On the governed Yellow River of Xihan Dynasty [J]. Journal of Guizhou Normal University, 2003, 12(4):51-54.
- [22] 朱海风. 应重视中国治水历史深层次经验教训研究[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版),2015,31(1):1-6. (ZHU Haifeng. Focus on lessons of Chinese water conservancy history [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2015, 31(1):1-6. (in Chinese))
- [23] 王红. 试论贾让“治河三策”[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版),2003,19(4):5-8. (WANG Hong. JIA Rang's three plans of harnessing the Yellow River [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2003, 19(4):5-8. (in Chinese))
- [24] 段伟. 试论东汉以后黄河下游长期安流之原因[J]. 灾害学,2003(3):93-98. (DUAN Wei. Reasons of long term safety of the Yellow River after the Eastern Han Dynasty[J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(3):93-98. (in Chinese))
- [25] 王尚义. 两汉时期黄河水患与中游土地利用之关系[J]. 地理学报,2003(1):73-82. (WANG Shangyi. The relationship of the Yellow River flood and the land use in

- the middle reaches during the Han Dynasties[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003(1):73-82. (in Chinese))
- [26] 王琳珂. 北宋“黄河清”现象探析[J]. 唐山师范学院学报, 2016, 38(3):84-88. (WANG Linke. A study on the clarity of the Yellow River in Northern Song Dynasty[J]. *Journal of Tangshan Normal University*, 2016, 38(3):84-88. (in Chinese))
- [27] 周魁一. 潘季驯“束水攻沙”治河思想历史地位辨析[J]. 水利学报, 1996, 27(8):1-7. (ZHOU Kuiyi. The historic contributions of Pan Jixun's strategy of regulating the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(8):1-7. (in Chinese))
- [28] MICHAEL J S, QIN Z, REN X, et al. The collapse of the North Song dynasty and the AD 1048-1128 Yellow River floods: geoarchaeological evidence from northern Henan Province, China [J]. *The Holocene*, 2018, 28(11): 1759-1770.
- [29] 马蔼乃. 21 世纪黄河系统工程方略[J]. 地理与地理信息科学, 2002, 18(2):41-44. (MA Ainai. Strategy of Yellow River systems engineering in the 21st century[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2002, 18(2): 41-44. (in Chinese))
- [30] 夏迈定. 高浓度调沙是减缓黄河下游河道淤积的有效途径[J]. 人民黄河, 1993(5):1-4. (XIA Maidong. An effective way for slowing down the sedimentation in the Lower Yellow River course through hyper-sediment concentration transportation[J]. *Yellow River*, 1993(5): 1-4. (in Chinese))
- [31] 王亚华, 毛恩慧, 徐茂森. 论黄河治理战略的历史变迁[J]. 环境保护, 2020, 48(增刊 1):28-32. (WANG Yahua, MAO Enhui, XU Maosen. An historical analysis on the strategy changes of the Yellow River governance [J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(Sup1):28-32. (in Chinese))
- [32] 齐璞, 高航. 论“稳定主槽, 调水调沙”的治河方略[J]. 人民黄河, 2006, 28(4):7-10. (QI Pu, GAO Hang. On general plan of river harnessing of “stabilizing main channel and regulating water and sediment” [J]. *Yellow River*, 2006, 28(4):7-10. (in Chinese))
- [33] 刘宁. 水基系统的概念内涵与演进研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4):2-8. (LIU Ning. Study on the concept, connotation and evolvement of the base-system of water[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4):2-8. (in Chinese))
- [34] 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))
- [35] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. 中国水利, 2013(4):1-3. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. *China Water Resources*, 2013(4):1-3. (in Chinese))
- [36] 张金良, 刘继祥, 罗秋实, 等. 不同治理模式下黄河下游水沙运行机制研究: “黄河下游滩区生态再造与治理研究”之二[J]. 人民黄河, 2018, 40(8):1-7. (ZHANG Jinliang, LIU Jixiang, LUO Qiushi, et al. Study on the operation mechanism of runoff and sediment in the Lower Yellow River under different governance modes: “study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the Lower Yellow River” (II) [J]. *Yellow River*, 2018, 40(8):1-7. (in Chinese))
- [37] 张红武. 黄河流域保护和发展存在的问题与对策[J]. 人民黄河, 2020, 42(3):1-10. (ZHANG Hongwu. Problems and countermeasures in the protection and development of the Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2020, 42(3):1-10. (in Chinese))
- [38] 岳瑜素, 王宏伟, 江恩慧, 等. 滩区自然-经济-社会协同的可持续发展模式[J]. 水利学报, 2020, 51(9):1131-1137. (YUE Yusu, WANG Hongwei, JIANG Enhui, et al. Sustainable development model of floodplain based on coordination of nature, economy and society[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9):1131-1137. (in Chinese))
- [39] 耿明全, 姚秀芝. 黄河下游宽河道生态保护与高质量发展问题探讨[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(12):6-11. (GENG Mingquan, YAO Xiuzhi. Discussion on ecological protection and high quality development of wide channel in the lower reaches of Yellow River [J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2019, 39(12):6-11. (in Chinese))
- [40] 王保民, 江珍, 李利琴. 河南黄河滩区新农村建设防洪标准探讨[J]. 人民黄河, 2012, 34(12):18-19. (WANG Baomin, JIANG Zhen, LI Liqin. Discussion on flood control standard for new countryside building of the Yellow River floodplain in Henan section [J]. *Yellow River*, 2012, 34(12):18-19. (in Chinese))
- [41] ZHANG Jinliang, SHANG Yizi, LIU Jinyong, et al. Causes of variations in sediment yield in the Jinghe River Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10:18054.
- [42] XU Guobin, SI Chundi. Effect of water and sediment regulation on lower Yellow River [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2009, 15(2):38-45.
- [43] 陈小江. 全面实施黄河流域综合规划谋求黄河长治久安和流域可持续发展[J]. 人民黄河, 2013, 35(10):1-4. (CHEN Xiaojiang. Full scale implement of master planning of Yellow River Basin promoting long-term stability and sustainable development of Yellow River [J]. *Yellow River*, 2013, 35(10):1-4. (in Chinese))
- [44] 李星瑾, 张格铨, 娄书建, 等. 三门峡水库运用实践与分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(7):7-10. (LI Xingjin, ZHANG Gecheng, LOU Shujian, et al. Operational practice and analysis of Sanmenxia Reservoir [J]. *Yellow*

- River, 2017, 39(7):7-10. (in Chinese))
- [45] 林劲松. 冯家山水库排沙运用及水库淤积分析[J]. 水资源与水工程学报, 2002, 13(1):38-41. (LIN Jinsong. Sediment sluicing management and analysis of reservoir deposition for Fengjiashan Reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2002, 13(1):38-41. (in Chinese))
- [46] WANG Yanjun, WU Baosheng, SHENG Guanying. Adjustment in the main-channel geometry of the lower Yellow River before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir from 1986 to 2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(3):468-487.
- [47] 胡春宏. 我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践[J]. 水利学报, 2016, 47(3):283-291. (HU Chunhong. Development and practice of the operation mode of “storing clear water and discharging muddy flow” in sediment-laden rivers in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):283-291. (in Chinese))
- [48] 李立刚, 陈洪伟, 李占省, 等. 小浪底水库泥沙淤积特性及减淤运用方式探讨[J]. 人民黄河, 2016, 38(10):40-42. (LI Ligang, CHEN Hongwei, LI Zhansheng, et al. Discussion on the characteristics of sediment deposition and operation of sediment reduction of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2016, 38(10):40-42. (in Chinese))
- [49] 陈建国, 周文浩, 孙平. 论小浪底水库近期调水调沙在黄河下游河道冲刷中的作用[J]. 泥沙研究, 2009, 30(3):1-7. (CHEN Jianguo, ZHOU Wenhao, SUN Ping. Effects of water-sediment regulation by Xiaolangdi Reservoir on channel erosion in the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2009, 30(3):1-7. (in Chinese))
- [50] 苏运启, 尚红霞, 李勇, 等. 小浪底水库对水沙的调控及下游河道响应[J]. 泥沙研究, 2006, 27(5):28-32. (SU Yunqi, SHANG Hongxia, LI Yong, et al. Water-sediment regulation by the Xiaolangdi Reservoir and the response of the lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2006, 27(5):28-32. (in Chinese))
- [51] 党维勤, 郝鲁东, 高健健, 等. 基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考[J]. 中国水利, 2019(8):52-55. (DANG Weiqin, HAO Ludong, GAO Jianjian, et al. Roles of silt retention dam in rainstorm flood disaster on July 26 [J]. China Water Resources, 2019(8):52-55. (in Chinese))
- [52] 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))
- [53] HAMID R P, SALEH Y, NITHESHNIRMAL S, et al. Assessing, mapping, and optimizing the locations of sediment control check dams construction[J]. Science of the Total Environment, 2020, 739:139954.
- [54] 张金良, 苏茂林, 李超群, 等. 高标准免管护淤地坝理论技术体系研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(9):136-140. (ZHANG Jinliang, SU Maolin, LI Chaoqun, et al. Study on a theoretical technology system of high-standard and no management and protection check dam[J]. Yellow River, 2020, 42(9):136-140. (in Chinese))
- [55] 柴青春, 张波, 赵彦彦. 黄河下游河道整治续建工程坝垛型式设计[J]. 人民黄河, 2014, 36(12):50-52. (CHAI Qingchun, ZHANG Bo, ZHAO Yanyan. Design of the improved structure form of groins in the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2014, 36(12):50-52. (in Chinese))
- [56] 黄强, 邓铭江, 畅建霞, 等. 生态水利学初探[J]. 人民黄河, 2021, 43(10):17-23. (HUANG Qiang, DENG Mingjiang, CHANG Jianxia, et al. Preliminary study on ecological water conservancy[J]. Yellow River, 2021, 43(10):17-23. (in Chinese))
- [57] 张晓雷, 夏军强, 陈倩, 等. 生产堤溃决后漫滩水流的概化模型试验研究[J]. 水科学进展, 2018, 29(1):100-108. (ZHANG Xiaolei, XIA Junqiang, CHEN Qian, et al. Experimental studies on farm dike-break induced overbank floods using a sketched physical mode [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1):100-108. (in Chinese))
- [58] LI Xiaonan, ZHONG Deyu, ZHANG Y J, et al. Wide river or narrow river: future river training strategy for Lower Yellow River under global change[J]. International Journal of Sediment Research, 2018, 33(3):271-284.
- [59] ZHOU Meirong, XIA Junqiang, DENG Shanshan. One-dimensional modelling of channel evolution in an alluvial river with the effect of large-scale regulation engineering [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575:965-975.
- [60] 江恩慧. 黄河泥沙研究重大科技进展及趋势[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1):1-9. (JIANG Enhui. Significant scientific and technological progress and trend of sediment research in the Yellow River[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(1):1-9. (in Chinese))
- [61] 张金良, 刘继祥, 万占伟, 等. 黄河下游河道形态变化及应对策略:“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之一[J]. 人民黄河, 2018, 40(7):1-6. (ZHANG Jinliang, LIU Jixiang, WAN Zhanwei, et al. Channel morphology evolution and corresponding coping strategy in the Lower Yellow River: “study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the Lower Yellow River” (I) [J]. Yellow River, 2018, 40(7):1-6. (in Chinese))

(收稿日期:2021-02-05 编辑:雷燕)