

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.004

粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究

陈文龙^{1,2}, 马志鹏^{1,2}, 袁菲^{1,2}, 王强^{1,2}, 贾文豪^{1,2}, 张印^{1,2}

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;
2. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611)

摘要:针对粤港澳大湾区水问题多维交织特性,基于流域系统整体观梳理总结了技术上可控、逻辑上关联的5个水安全调控子系统结构,包括:河势调控子系统、内河水环境水生态调控子系统、外江咸潮调控子系统、城市暴雨洪涝调控子系统、外江洪潮调控子系统。探讨了各子系统关键机理、系统间的协同作用原理、协同调控的关键技术需求及协同调控模型算法架构,构建了大湾区水安全协同调控理论框架,以珠江河口为例开展了粤港澳大湾区水安全协同调控理论的应用,为大湾区水问题系统治理提出了新的解决方案。

关键词:粤港澳大湾区;水安全;协同调控;水工程调度;河势控导

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)-0022-10

Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area//CHEN Wenlong^{1,2}, MA Zhipeng^{1,2}, YUAN Fei^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, JIA Wenhao¹, ZHANG Yin^{1,2}
(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In view of multidimensional interwoven characteristics of water problems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, this study summarized the structures of five technically controllable and logically related water security regulation and control subsystems, including river regime control subsystem, inland waters environment and ecology regulation subsystem, outer river salt tide regulation subsystem, urban rainstorm and flood regulation subsystem, and outer river flood tide regulation subsystem, and discussed key mechanisms of the subsystems, the principle and key technologies for collaborative regulation, and the collaborative model algorithm framework. Then a theoretical framework of water security collaborative regulation and control in the Guangdong-Hong Kong-Maca Greater Bay Area was constructed. As a case study, the water security collaborative regulation and control theory was applied to Pearl River Estuary, providing new solutions for the systematic management of water problems in this area.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; water security; collaborative regulation and control; water engineering scheduling; river regime control

水安全是指面对水资源短缺、水环境污染、水生态破坏和水灾害加剧风险时水系统能够维系安全的状态,是水资源安全、水环境安全、水生态安全和水灾害防治等关键要素的有机整合和协调统一^[1]。近年来随着我国经济社会的快速发展,水资源短缺、水环境污染、水生态破坏、水灾害加剧等“四水”问题日益严重,水安全面临严峻挑战^[2]。对水安全系统关键要素进行人为干预,统筹推进“四水”系统治

理,全面提升水安全保障能力,已成为流域治理工作的重中之重。

目前,水安全保障多以点(水库、闸坝)、线(河道、渠系)连接为核心的工程措施为主,虽然能在一定程度上解决水安全问题,但水利工程建设耗费大量人力、物力、财力,且会对水文情势和河流生境产生一定影响,破坏流域生态系统的稳定性。水安全调控综合运用水库、闸坝等工程措施与水工程调度、

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001000);科技基础资源调查项目(2019FY101900);水利重大科技问题研究项目(202007)

作者简介:陈文龙(1977—),男,正高级工程师,硕士,主要从事河口治理和水环境与水生态研究。E-mail:longyancwl@163.com

水资源管理等非工程措施,既可充分发挥自然要素对水循环及其伴生过程的多层次调节作用,又可充分挖潜现有水工程体系对流域水文过程和水动力条件的调控作用,从而实现水工程体系多能高效运转,全面提升流域水安全保障能力。目前,水安全调控已成为流域水问题的热点研究领域^[3-5],水工程多目标调度、水安全多维协同调控等理念和方法相继提出,进一步丰富了水安全调控的内涵^[6-8]。针对不同流域或区域水问题特征,有关学者也提出了不同的水安全协同调控模式,如吴志广等^[9]针对长江流域水资源开发保护的整体性与系统性水问题治理目标,提出了“四水”问题多维系统治理与保护技术体系;张金良等^[10]针对黄河流域巨系统,统筹考虑了河流基本功能维持、区域社会经济高速发展、流域生态环境有效保护 3 个维度,研究了不同治理措施之间协同博弈效应;张弛等^[11]指出开展松辽流域水资源综合调控需深入认知“水量要素-水质要素-生态要素”的系统耦合机理,提出了“水量-水质-生态”兼顾的水资源综合调控理论方法;周斌等^[12]针对京津冀地区水利工程阻断水循环、地下水超采严重、河湖污染加剧等突出水问题,提出了自然水循环的循环通畅和社会水循环协同均衡的整体调控思路及应对策略。由此可见,水安全调控需针对不同流域特性,辨析主要水问题,厘清流域水问题背后错综复杂的关系与机理,因地制宜构建协同调控技术体系,为流域水安全协同调控提供支撑。

粤港澳大湾区(以下简称“大湾区”)是全球四大湾区之一,也是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,具有重要战略地位。大湾区地处珠江流域下游,上承西、北、东三江,下经八大口门与南海相通,上游水资源丰富,下游潮汐动力强劲,东、西、北三面环山,南面临海,中部以冲积平原为主,呈现出“山-城-海”格局,中部平原水系发达,包括近 100 条骨干河道组成的外江水系、1.2 万多条内涌与数以千计的湖塘水库构成的内河水系两部分,是“上中下游连通、江涌海互济”的复杂巨系统。大湾区特殊的地理位置、地形地貌和水文情势等自然条件导致水安全问题复杂多样。为应对大湾区水安全问题,流域、区域不断加强工程建设,流域骨干水库群和区域闸泵群的工程体系已初具规模,随着大藤峡水利枢纽通过正常蓄水位验收、珠江三角洲水资源配置工程全线贯通,水安全调控的基础日臻完善。《粤港澳大湾区发展规划纲要》与十四五发展规划等一系列重要文件提出了“建设国际一流湾区”的目标,大湾区将持续推进高质量发展,进一步提升水安全保障水平。针对大湾区当前在防洪排涝、供水

保障、水生态环境保护等方面存在的问题,迫切需要开展水安全调控研究。

基于此,针对大湾区突出的城市暴雨洪涝、流域性洪水、风暴潮、咸潮上溯、内河水系水环境污染等水问题,本文以水安全调控为主要研究目标,系统梳理水问题特性,阐明大湾区水安全问题的核心机理以及彼此之间复杂的时空联系、交互作用和协同原理,提出大湾区水安全协同调控理论框架,为大湾区水安全保障和高质量发展提供理论支撑。

1 大湾区水安全问题及其特征

近年来,在气候变化和人类活动强扰动的背景下,大湾区在防洪潮、暴雨内涝、区域供水及水生态环境等方面水安全问题突出。一是洪潮涝叠加、水灾频发,防灾形势异常严峻^[13],1994 年、1998 年、2005 年和 2008 年连续发生区域大洪水,2008 年“黑格比”、2017 年“天鸽”、2018 年“山竹”风暴潮接连刷新最高潮位历史记录;二是当地水资源不足,依赖河道取水,河道供水占总供水量的 70.4%,咸潮严重影响供水安全^[14];三是内河水环境污染严重,河湖水生态恶化问题突出^[15-16],其中珠三角 9 市废水年排放量较 20 世纪 80 年代末增加 3 倍以上,黑臭河涌水体点多量大,劣 V 类水质河长近 40%。

水循环过程决定了大湾区“四水”问题相互影响,气候变化和高强度人类活动等因素使“四水”问题相互叠加,大湾区水安全问题呈现出空间联动、“四水”关联、多灾同源的多维交织特性。

a. 空间联动。外江河网不仅承接上游流域来水,还面临下游外海潮汐顶托,内河水系中河涌交错、湖塘众多,外江河网与内河水系以水闸相通,使得大湾区水问题呈流域上游-外江-内河-外海交互的空间联动特征。主要体现为城市水灾害受到上游流域洪水、下游外海潮汐与风暴潮、本地暴雨洪涝的共同影响;城市水资源受上游径流与外海咸潮影响;城市水环境水生态与内河、外江联动密切相关,污染物随着连通的水系扩大到整个珠江三角洲水系。

b. “四水”关联。水资源短缺、水环境污染、水生态破坏、水灾害加剧等往往不是以单一形式出现,而是相互影响、相伴相生。水生态问题会导致水体自净能力下降,进而造成或加剧水环境问题;水环境恶化会进一步加剧水生态系统的破坏,并导致水质型缺水的问题;城市洪涝污染问题交织,城市内涝会导致排水管网的污水溢流,造成水环境进一步恶化。

c. 多灾同源。大湾区水安全问题存在明显的多灾同源特性,例如河床大规模不均衡下切是外江水问题的关键致灾要素,水动力不足和底泥污染是

内河水问题的关键致灾要素。21 世纪以来,西、北、东三江主干河道的平均下切幅度分别为 2.5 m、1.2 m、0.4 m,外江河床下切导致整体涨潮动力增强、径潮动力格局发生调整,致使咸潮上溯加剧,威胁供水安全,也会引起关键节点分流比变化,从而影响大湾区现有防洪格局。大湾区内河淤积深度平均达 0.5 m,污染底泥不利于生物生存繁衍;底泥在一定条件下向上层水体释放污染物导致水环境恶化;底泥淤积导致涌容减小,区域可调蓄空间减少,加剧内涝风险;河涌蓄淡后受底泥释放影响,可利用周期缩短,制约水资源的可持续利用。珠江三角洲河网区目前发展成为一个高度闸控的复杂水系,闸控段水动力进一步变弱,非闸控段则受到往复流影响,水流缓滞,导致内河污染物沉积,水体自净能力减弱,水环境急剧恶化。

2 大湾区水安全调控系统结构与机理

水安全调控是指通过水工程调度和水动力控制,改变区域的水文过程和水动力条件,解决或改善防洪排涝、水资源、水环境和水生态问题。水安全调控的本质是对水文过程和水动力过程中的要素或边界条件进行调控、整治,使自然系统状态处于合理的阈值区间。本文考虑大湾区“四水”问题中较为典型的河势稳定、外江洪潮、城市暴雨洪涝、咸潮上溯、城市内河水环境水生态问题,对水安全调控系统展开研究。

2.1 水安全调控系统结构

2.1.1 河势调控子系统

河势调控子系统通过调节水沙的科学分配,进而影响河势,实现河势的健康稳定。大湾区健康的河势主要表现为 3 个方面:关键节点及八大口门分流比保持稳定;伶仃洋和黄茅海河口湾形态基本维持、滩槽格局和纳潮容积基本稳定;岸线不崩岸,主槽不改道。河势调控子系统整体河势调控一是通过思贤滘、天河—南华等关键节点控制,配合流域骨干水库构建流域水沙调控体系,以调控西江、北江河网片分水分沙,维护西江、北江三角洲格局相对稳定;二是通过河口规划治导线及岸线滩涂功能区管控,维持河口湾岸线以及“三滩两槽”格局基本稳定。局部河势调控通过导堤、丁坝、潜坝等工程控制,束水塑槽、滞流分沙、保滩促淤。

2.1.2 内河水环境水生态调控子系统

内河水环境水生态调控子系统通过改变水质、水温、流速、光照、溶解氧、河床形态等,加快内河涌的污染物质循环速率或物质转化效率,进而实现水清、水多、水动、水生物多样化。具体措施包括:联围

水量水质调度,通过群闸联调引水、留水、分水、活水;联围清淤塑床调度,引入外江中小洪水冲刷联围内淤积底泥,降低内河涌河底高程,增加水环境容量;河涌低水位运行,通过闸泵控制降低河涌水位甚至露出局部河床浅滩,增强泥-水界面光照和溶解氧条件,促进底泥氧化及植物生长,提升河涌自我修复能力。

2.1.3 外江咸潮调控子系统

外江咸潮调控子系统通过“上补、中蓄、下阻”等防咸措施^[17],使咸潮不影响取水供水,保障供水安全。其中,“上补”即通过流域水库群枯季水量调度,增加上游径流动力与水量,为大湾区重要水源的取水创造条件;“中蓄”即通过珠江三角洲河网区水源工程群的调蓄,提升供水水库蓄淡能力,在水体咸化时采取暂停取水或掺混降低含氯度等措施,保障水源的供应;“下阻”即通过拦门沙治理、河口治导等工程措施或水下拍门等应急工程,降低外海咸潮上溯动力,从源头削弱咸潮。

2.1.4 城市暴雨洪涝调控子系统

城市暴雨洪涝调控子系统通过对市政排水系统与江河湖库的联排联调,改变区域产汇流条件及管道、河网的水动力条件,实现暴雨不致灾^[18-20]。其中,联排联调可分为两类。一类是雨前-雨中-雨后全过程精细化调控:暴雨前,对水库、河涌等调蓄设施进行预腾空或预降水位;暴雨中,根据暴雨洪涝全要素监测和实时预报情况统筹调度^[21],对洪涝水进行科学的排、蓄、截、分、防,降低河涌水位;暴雨后,及时恢复河涌水环境、水生态及水景观管控水位。另一类是对部分市政基础设施非常规调度,如结合临时交通管制调度,将部分道路作为行泄通道等。

2.1.5 外江洪潮调控子系统

外江洪潮调控子系统通过联合调度流域上、中、下游水工程群,管控外江水位,科学调洪,避免或减少洪潮灾害损失。其中,在流域层面,通过充分利用干支流水库、蓄滞洪区联合调度,发挥拦洪、错峰、削峰作用,调控西、北、东江流域洪水;在区域层面,通过思贤滘等关键节点调控,保障河网泄洪通畅,科学运用大湾区分洪闸、挡潮闸等工程,分洪挡潮。

2.2 水安全调控机理

系统内部运行机理是水安全精细化调控的重要理论基础,大湾区水安全调控机理主要包括水动力与河势演变互馈机理、不同动力条件下的河道底泥污染物迁移转化机理、复杂河口多动力耦合作用下的咸潮运动机理。

2.2.1 水动力与河势演变互馈机理

挟沙水流是河槽冲淤和形态塑造的主要驱动力,通过水动力控导可调整河道水沙关系,促进河道自动调整,改善不利河势。近年来,采砂和航道疏浚等强人类活动使外江河床出现大规模不均衡下切,导致西、北江分流比调整,破坏了河网局部汉道间、河网与口门区径潮动力的平衡关系,进而改变防洪(潮)、供水格局^[22],需要通过水动力控导进行适当干预,重塑对水安全有利的河势条件。厘清水动力与河势演变的互馈过程是系统开展水动力控导的基础,因此亟须开展水动力与河势演变互馈机理研究,主要包括:①揭示河口上段思贤滬分流变化机理,量化河床和潮汐变化对节点分流的影响,为思贤滬分流控导提供依据;②揭示河口下段口门格局演变机理,阐明口门拦门沙在径潮波流动力作用下的演变规律,明晰强扰动后拦门沙演变趋势,为拦门沙整治提供依据;③研究巨型采砂坑影响下伶仃洋河口湾径潮动力格局变化,阐明河口湾动力变化对河网区泄洪纳潮的影响,预测河口湾滩槽演变趋势,为河口湾滩槽修复提供理论依据。

2.2.2 不同动力条件下的河道底泥污染物迁移转化机理

近年来,大湾区大部分水域已实现沿岸截污,但水环境质量并未得到明显改善,很大程度上是由于水体底泥污染未能得到有效控制^[23]。可见,在外源污染得到有效控制的背景下,迫切需要深入开展不同水动力条件下底泥污染物迁移转化规律的研究,主要包括:①研究城市山区型河道和感潮河道在底泥及上覆水体中的典型污染物及其特征差异;②量化不同河道内溶解氧含量及分布与水动力(流速、水深)及水温条件的关系;③揭示复杂水动力条件下水体-底泥-污染物动态耦合环境效应,包括不同水流条件下泥-水界面污染物扩散释放特性及其水动力影响机理、底泥物理性质对污染物静态释放的影响、污染底泥起动再悬浮释放机理等;④研究有氧和厌氧环境下各种底泥功能微生物生化机制,为土著功能微生物定向富集和强化修复提供科学依据。

2.2.3 复杂河口多动力耦合作用下的咸潮运动机理

目前河口咸潮防控主要通过调控流域上游出库流量,增大河道径流动力,将盐分推向河口,抑制咸潮上溯。但在遭遇特枯或连续枯水年的极端情况下,上游水库蓄水不足,可调水量有限甚至无水可调。早上加咸的不利局面下,亟须提高上游调水压咸的精准度,同时辅以下游工程阻咸措施彻底解决

咸潮上溯问题^[24]。可见,在极端气候条件下迫切需要深入开展复杂河口多动力耦合作用下的咸潮运动机理研究^[11],主要包括:①研究珠江河口咸潮运动时空变化规律,包括半月潮周期内大、中、小潮期间咸潮运动规律的差异性和咸潮上溯的距离变化及垂向分层规律等;②解析半月潮周期内咸潮的输运机制,揭示潮平均余流、重力环流及潮汐振荡作用对咸潮运动的驱动效应;③阐明复杂径潮交互作用下河口表、底层盐分蓄积-混合机理,识别咸界变化的关键驱动因子,为精准调水压咸和河口阻咸措施提供理论支撑。

3 大湾区水安全协同调控原理、模型与理论框架

水安全协同调控是指在水安全(单目标)调控的基础上,充分考虑水安全系统的整体性、均衡性,以上游水库群、三角洲闸泵群以及大湾区河势为调控对象,以水安全调控子系统之间的关联关系为协同调控原理,通过水工程调度及水动力控导协同改变区域水文过程和水动力条件,产生多系统合作或竞争作用下的有序结构,提出多重约束条件下的水问题治理最优决策,实现水问题的交互式协同治理。

大湾区的水安全调控基于流域系统整体观,通过综合考虑多尺度、多目标、多对象、多手段间的交互作用,对孤立的子系统进行联合调控,在传统调控功能的基础上产生宏观尺度上的调控结构和调控功能,实现兼顾多系统、多方面、多环节、多要素的理想状态。从调控尺度来看,大湾区水安全协同调控能够综合考虑流域、区域不同尺度所关注的水问题与水安全内涵的差异,以及不同尺度上水安全调控的关联性;从调控目标来看,综合考虑了“四水”问题间的复杂联系,在解决传统调控目标的基础上,进一步扩充了目标集的维度;从调控对象来看,大湾区水利工程众多,水安全协同调控能够充分挖掘水库群、闸泵群等各类水工程的潜力;从调控手段来看,实现水工程调度与河势控导的结合,充分发挥不同调控手段协同作用时低成本、高收益的优势。

3.1 水安全调控子系统协同原理

开展水安全协同调控须在水问题解析、水安全调控系统梳理及协同调控内涵明晰的基础上,厘清子系统间的关联关系,明确子系统协同原理(图1)。

3.1.1 河势调控子系统与其他子系统的协同

无序采砂造成的外江水系河床大规模下切,是外江水问题的关键致灾要素,影响大湾区的防洪、供水格局及水生态环境,考虑外江复杂水问题同源于

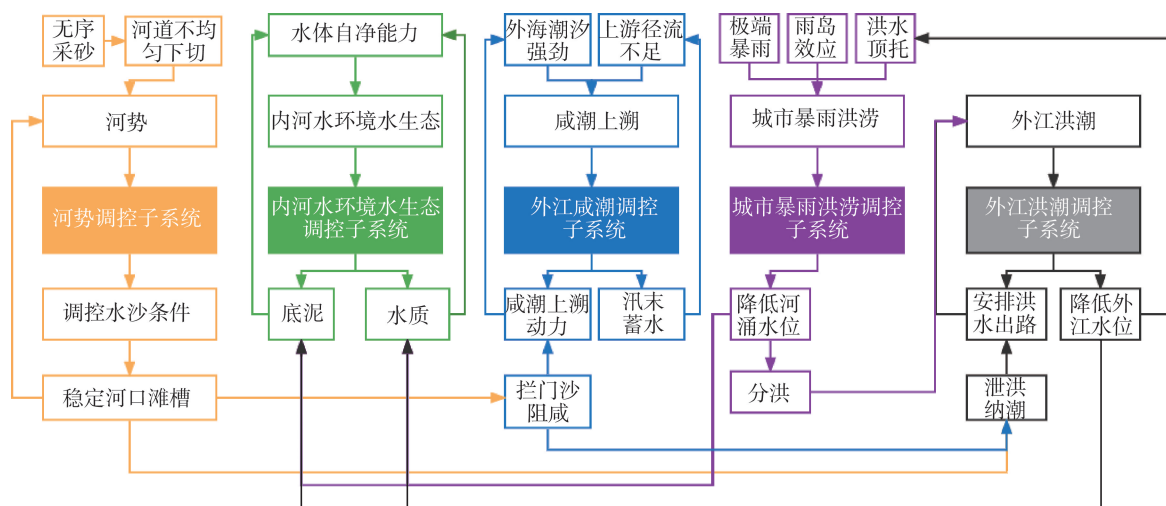


图1 大湾区水安全调控子系统协同原理

Fig.1 Collaborative principle of water security regulation and control subsystems in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

河床下切,河势调控要以“顺应形势、适当干预”为原则,以稳定整体河势、调控局部不利河势、兼顾河势健康和水安全为目标,发挥一举多得的协同调控效应。

a. 河势调控与外江洪潮调控协同。通过大湾区水系整体河势调控,科学调配水沙,一方面可塑造河网片造床优势动力,稳定河口滩槽格局;另一方面可优化水系泄洪纳潮格局,合理安排洪水出路^[25]。

b. 河势调控与外江咸潮调控协同。针对口门区局部不利河势,如磨刀门拦门沙采砂区,通过水动力控制构造口门缓流区,促进拦门沙修复,在促使形成口门主支汊稳定格局的同时,发挥拦门沙的阻咸功能。

3.1.2 城市暴雨洪涝调控子系统与外江洪潮调控子系统的协同

大湾区快速城市化推进导致“热岛效应”和“雨岛效应”增强,城市内涝愈加频繁,加上外江洪潮顶托,极端洪涝灾害形势严峻。考虑大湾区水系空间联动引发的洪潮涝交织特性,城市暴雨洪涝与外江洪潮调控系统应在流域-区域空间层面进行协同调控,从“由外向内”“由内向外”“内外结合”3个层次进行调控,实现洪潮涝共治。其一,当外江发生洪水时,根据预警提前预降或腾空内围水水位,洪峰期间开闸“由外向内”分洪;其二,当城市发生超标准降雨时,利用流域上游水库拦洪、削峰,降低外江水位,“由内向外”排涝;其三,当强降雨与外江洪水遭遇时,在上游水库调蓄的同时,调控区域闸泵群有序向外江排涝,保障外江水位不超过河道的过流能力,“内外结合”尽可能降低洪涝灾害损失。

3.1.3 内河水环境水生态调控子系统与其他子系统的协同

大湾区城市洪涝灾害频发、雨水径流污染交织,城市内河淤积污染严重。考虑污染底泥淤积和水动力不足是内河交织水问题的两大关键致灾要素,通过内河水环境水生态调控、城市暴雨洪涝调控及外江洪潮调控间的协同,可同步改善污染底泥和水动力,统筹治理洪涝污问题。

a. 内河水环境水生态调控与城市暴雨洪涝调控协同。一方面,调控内河低水位运行是兼顾水环境治理和内涝防御的有效措施,不仅可增强水动力对底泥的扰动,提高水体溶解氧和水温,充分利用光降解和光催化作用去除底泥污染物;还可增加内涝调蓄容积,有利于防御城市暴雨洪涝。另一方面,暴雨内涝时尽可能调蓄涝水进入城市湖泊(湿地),充分利用湖泊(湿地)调蓄洪涝与水体净化的双重功能,同步改善水污染和防治洪涝。

b. 内河水环境水生态调控与外江洪潮调控协同。外江发生洪水时,通过适度开闸引洪水至内河水系,可减小下游防洪压力,同时利用洪水清淤塑床,一则降低内河涌河底高程,增加河道蓄水容积,提高水环境容量;二则削减河涌淤泥内源污染,改善内河水环境水生态。

3.1.4 外江咸潮调控子系统与外江洪潮调控子系统的协同

大湾区外江咸潮主要发生在枯水期,洪潮发生在洪水期,时间层面二者相互独立,但调控系统彼此间却存在相互影响甚至负面效应,统筹防洪、阻咸的时间与目标进行协同调控,可兼顾供水效益和防洪效益。在时间尺度上,统筹全年进行“汛末蓄水”和

“前蓄后补”,即上游水库在确保防汛安全前提下,在汛末抢抓时机存蓄淡水,为枯水期压咸调度做好准备;在目标层次上,协调河口安全泄洪与咸潮上溯防治,拦门沙阻咸具有生态友好、抑咸时效长的优势,但也会抬高侵蚀基面,对河道尾间泄洪排沙不利,因此需兼顾泄洪、阻咸多目标进行拦门沙整治。

3.2 水安全协同调控关键技术需求

水工程调度与河势控导是水安全协同调控的核心技术手段。大湾区具有流域-外江-内河-外海空间联动特性,并已形成了较为完备的水工程体系,亟待研究耦合多维目标,涵盖多个尺度,包含多种对象的调控技术手段:①流域-外江-内河-外海空间联动与复杂水工程系统概化的水流-泥沙-污染物多要素输运模拟。在对水库、闸泵等不同类型水工程系统概化的基础上,利用关键变量实现流域-区域的耦合嵌套,并通过数值模拟对复杂水工程系统进行综合模拟,揭示水流、泥沙、污染物等多种要素的输运转化规律。②多目标-多尺度-多对象背景下的需求分析。运用逻辑分析方法构建系统的网络图和目标集合,构建自上而下的需求识别模式和自下而上的需求表达模式,明晰不同情景下的水工程系统调度的阈值,确定满足不同水动力目标的河势控导约束条件。③复杂水工程耦合河势协同调控系统优化。在复杂水工程系统概化与需求分析的基础上,构建水安全协同调控决策模型,基于大湾区不同时空条件下水问题特征及其演化趋势,实现河势与水工程调控方案的最优动态决策,同时系统解决或缓解多种水问题。

3.3 水安全协同调控模型

考虑大湾区水安全调控子系统之间相互耦合、密切联系,各子系统的合作或竞争可受相同原理支配,因此可通过协同的方法解决子系统间的耦合作用,最终获得整体的最优解。协同优化(collaborative optimization, CO)是解决多学科综合优化设计的一种算法^[26],本文以 CO 算法为基础,构建水安全协同调控模型,实现水安全调控子系统独立优化,同时兼顾水安全协同调控的经济性。

3.3.1 系统级优化模型

系统级优化模型为

$$\begin{cases} \min F = f_1 + f_2 + \cdots + f_N \\ \text{s. t. } J_{sl}^* = \sum_{j=1}^{M_l} (s_j - d_{l,j}^*)^2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为系统级优化问题的目标函数; f_l 为子系统 l 所涉及领域的目标函数; J_{sl}^* 为子系统 l 的系统级约束; M_l 为子系统 l 的决策变量数; N 为子系统数

量; s_j 为系统级优化的第 j 个决策变量; $d_{l,j}^*$ 为子系统 l 的第 j 个决策变量的优化结果。

3.3.2 子系统优化模型

子系统优化模型为

$$\begin{cases} \min J_{al} = \sum_{j=1}^{M_l} (d_{l,j} - s_j^*)^2 \\ \text{s. t. } g_l \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: J_{al} 为子系统 l 的一致性目标函数,即使各子系统的决策变量与系统级优化的决策变量之间差值达到最小; $d_{l,j}$ 为子系统 l 的第 j 个决策变量; s_j^* 为系统级分配给子系统的第 j 个系统级最优决策变量; g_l 为子系统 l 的约束条件。

3.3.3 大湾区水安全协同调控模型

大湾区水安全协同调控系统分为系统级模型和调控子系统模型,以水动力(包括水位、流速、流量等因子)作为决策变量 s_j 。系统级模型考虑水安全协同调控总成本达到最小。大湾区水安全协同调控系统构架如图 2 所示,协同过程为:①系统级传递一个期望值给子系统,子系统独立优化,使优化的结果在满足自身约束条件下,尽可能地接近系统级分配的期望值;②将各个子系统优化的结果作为参数传递给系统级,系统级优化的方向是尽可能地协同各个子系统相互耦合的变量,并使目标函数值最优;③经过系统级和各个子系統级之间的多次迭代,得到最优结果。

3.4 大湾区水安全协同调控理论框架

由水安全协同调控的概念可知,协同调控相较于传统调控的特征在于子系统相互协同运行,并产出超越自身单独作用而形成整体系统的协同效应。基于对水安全调控子系统结构的梳理,构建了水安全协同调控的理论框架,如图 3 所示。

4 大湾区水安全协同调控理论应用

珠江河口是大湾区的核心区域,呈现三江汇流、河网密布、八口入海、两湾纳潮的特点,具有典型的“落-网-口-湾”多层级水系结构,如图 4(a) 所示。本文以“落-网-口-湾”为主体,以河势调控和水工程调度为调控手段,以水灾害防御、水资源保护、水环境治理和水生态修复为调控目标,统筹五大调控子系统,开展大湾区水安全协同调控。

a. 落调。统筹考虑防洪、抑咸、河势稳定等效益最大化,协同河势调控与外江洪潮、咸潮调控子系统,通过上游水工程联合调度,结合思贤滘生态控导工程,科学调控思贤滘流量及西、北江分流比。洪水期通过西、北江水库群和滘江滞洪区联合调度,控制

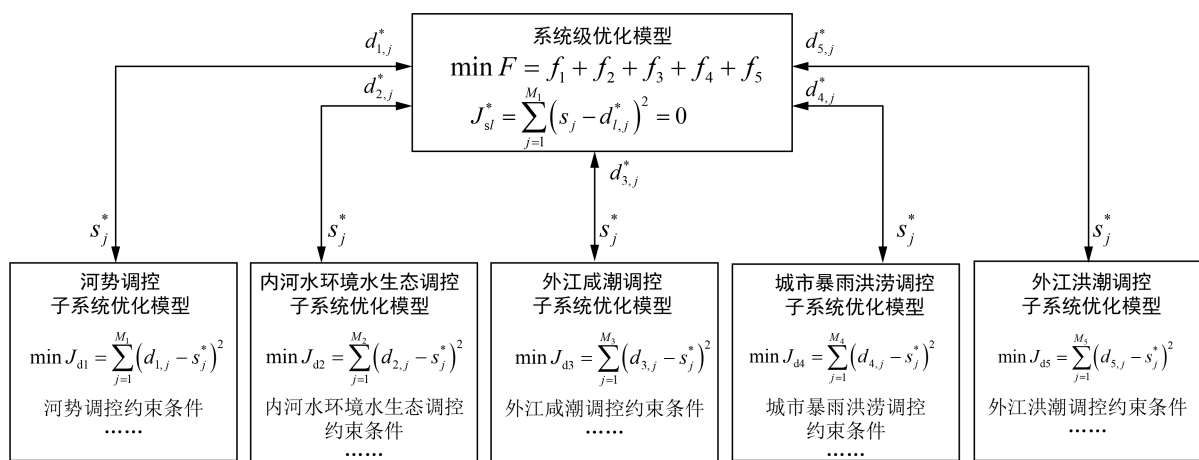


图2 大湾区水安全协同调控系统

Fig.2 Water security collaborative regulation and control system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

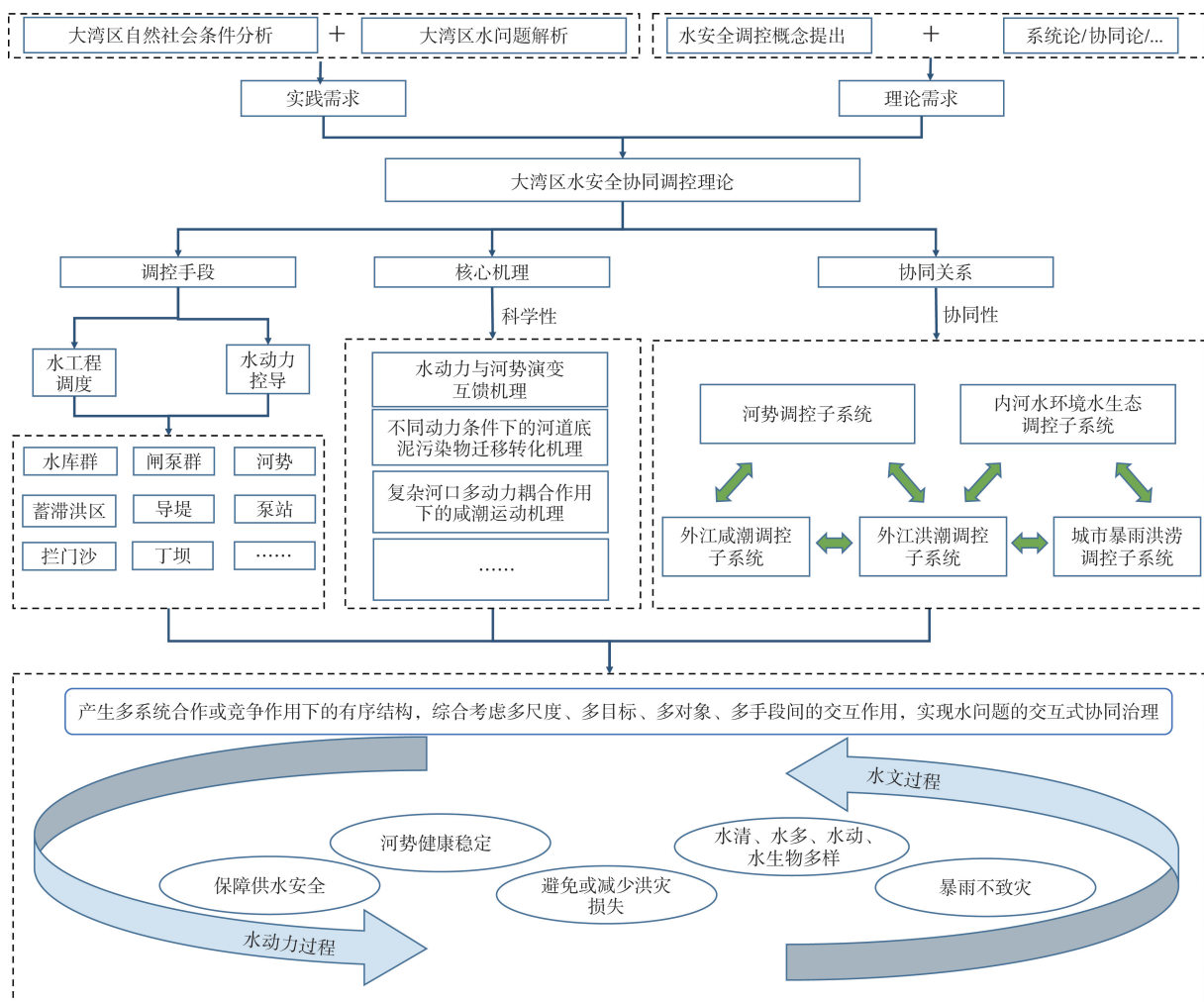
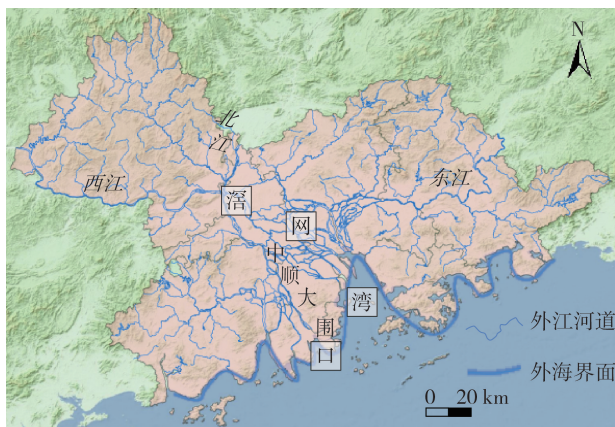


图3 大湾区水安全协同调控理论总体框架

Fig.3 Overall theoretical framework of water security collaborative regulation and control theory in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area



(a) 珠江河口浚、网、口、湾位置



(b) 中顺大围内河水系

图4 大湾区复杂水系图

Fig. 4 Drainage map of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

思贤滘流量不超过标准洪水,若思贤滘发生超标准洪水,则通过思贤滘控导工程调控西、北江分流比,减缓下游重要防护区域的防洪压力。枯水期通过上游水库调水保障思贤滘生态流量,在西江满足压咸流量的前提下,结合思贤滘控导工程适度向北江分水,保障北江枯季供水需求。

b. 网通。统筹考虑防洪、排涝、水环境水生态等效益最大化,协同内河水环境水生态调控与城市暴雨洪涝调控及外江洪潮调控子系统,通过闸泵群联控分水活水、清淤塑床,提升河涌、支流与主干河道的水体交换条件,提高水体自净能力和水生态系统的联通性,增加泄洪和纳潮空间。以中顺大围(图4(b))协同调控为例,洪水条件下,开闸分洪、引水冲泥;涝水条件下,开闸排涝,减轻区域防涝压力;枯水条件下,结合天然潮汐动力,控制联围内水流由往复流变为单向流,提高水体置换速度。

c. 口控。统筹考虑防洪、阻咸、河势稳定等效益最大化,协同河势调控与外江咸潮、洪潮调控子系统,通过控导口门河势,减缓咸潮上溯强度,保障防洪、供

水安全。以磨刀门拦门沙修复为例,按照“中心拦门沙+两侧东西汉槽道+近岸浅滩”的磨刀门修复思路,综合考虑泄洪安全与阻咸效果,设计拦门沙的平面形态、顶点位置、沙顶高程及拦门沙两侧汉道泄洪宽度,以达到稳定河势、畅泄洪水、抑制咸潮的效果。

d. 湾稳。统筹考虑河势稳定、防潮效益最大化,协同河势调控与外江洪潮调控子系统,通过控导河口湾河势,稳定纳潮容积,保障防潮安全。在伶仃洋河口湾,通过规划喇叭形治导线,保障河口湾大进大出的纳潮能力;对于局部受损岸线滩涂,结合城市景观与水生态环境保护需求,加快推进生态海堤工程建设的同时进行砂质岸线修复和重点沙滩保护;对于伶仃洋中滩出现的巨型采砂坑,探索以自然回淤为主的砂坑修复技术,以期减弱风暴潮、咸潮等海洋灾害影响。

5 结 语

大湾区水安全问题多维交织,水安全协同调控具有得天独厚的条件。本文梳理总结了大湾区水安全调控五大调控子系统,构建了大湾区水安全协同调控理论框架,通过探讨各子系统的机理,以期实现调控的精细化和科学化;通过探讨子系统之间的协同作用原理,以期实现水问题的交互式协同治理。进一步基于该理论框架,统筹考虑大湾区“四水”问题,协同五大调控子系统,提出“浚调、网通、口控、湾稳”的协同调控策略。

由于目前流域协同体制机制还不成熟,不同部门之间的数据共享机制还不完善,不同学科的关键科学问题及技术集成有待进一步提高,因此协同调控理论的应用还未完全落地。本文在明晰水安全协同调控系统结构、关键科学问题、协同原理、协同算法架构及关键技术需求等基础上,阐述了大湾区水安全调控理论框架,并提出应用展望,为在学术研究和工程实际中灵活运用水安全协同调控理论和方法奠定基础,为其他流域水安全协同调控提供借鉴与参考。

参考文献:

- [1] 苏玉明,贾一英,郭澄平. 水安全与水安全保障管理体系探讨[J]. 中国水利,2016(8):12-14. (SU Yuming, JIA Yiyang, GUO Chengping. Water security and water security ensuring management system discussion [J]. China Water Resources, 2016(8):12-14. (in Chinese))
- [2] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报,2016,47(3):292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3):292-301. (in Chinese))

- [3] 王煜,彭少明,武见,等. 黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J]. 水利学报, 2020, 51(1): 44-55. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1): 44-55. (in Chinese))
- [4] 王慧亮,陈开放,李云飞,等. 中原城市群水资源综合调控方案与效果评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 58-61. (WANG Huiliang, CHEN Kaifang, LI Yunfei, et al. Water regulation measures and effect evaluation of central Henan urban agglomeration based on artificial neural network[J]. Yellow River, 2019, 41(6): 58-61. (in Chinese))
- [5] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [6] 徐凯,汪林,甘治国,等. 流域水循环系统多维调控方案的评价与优选[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 118-123. (XU Kai, WANG Lin, GAN Zhiguo, et al. Scenario evaluation and optimal selection for multidimensional regulation of water cycle systems in basins[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 118-123. (in Chinese))
- [7] 褚俊英,周祖昊,王浩,等. 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 1-5. (in Chinese))
- [8] 黄显峰,吴志远,李昌平,等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 1-7. (in Chinese))
- [9] 吴志广,陈述. 长江流域水资源开发保护中的关键科学和技术问题[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(4): 1-6. (WU Zhiguang, CHEN Shu. Key scientific and technological issues in water resources exploitation and protection in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(4): 1-6. (in Chinese))
- [10] 张金良,曹智伟,金鑫,等. 黄河流域发展质量综合评估研究[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 917-926. (ZHANG Jinliang, CAO Zhiwei, JIN Xin, et al. Research on comprehensive evaluation of the development quality of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(8): 917-926. (in Chinese))
- [11] 张弛,王明君,于冰,等. 松辽流域水资源综合调控研究进展与四大难题探究[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1379-1388. (ZHANG Chi, WANG Mingjun, YU Bing, et al. Research progress of comprehensive water resources regulation and four major problems in Song-Liao River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1379-1388. (in Chinese))
- [12] 周斌,桑学锋,秦天玲,等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 6-10. (ZHOU Bin, SANG Xuefeng, QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 6-10. (in Chinese))
- [13] 罗志发,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79. (LUO Zhifa, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79. (in Chinese))
- [14] 涂新军,吴海鸰,陈晓宏,等. 滨海地区基于避咸蓄淡模式的供水安全临界流量研究:以粤港澳大湾区珠澳供水为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 194-206. (TU Xinjun, WU Haiou, CHEN Xiaohong, et al. Critical streamflow for water supply safety based on the withdrawal avoiding saltwater model in coastal areas: taking the water supply for Zhuhai and Macao in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as a case[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 194-206. (in Chinese))
- [15] 董斯齐,黄翀,李贺,等. 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 48-55. (DONG Siqi, HUANG Chong, LI He, et al. Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 48-55. (in Chinese))
- [16] 张万顺,张紫倩,彭虹,等. 粤港澳大湾区金山湖流域水质变化规律[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 1-8. (ZHANG Wanshun, ZHANG Ziqian, PENG Hong, et al. Water quality variations of Jinshan Lake Basin in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 1-8. (in Chinese))
- [17] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮防控理论框架研究[J/OL]. 水资源保护, 2022: 1-14[2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20220520.1721.021.html>. (YANG Fang, CHEN Wenlong, LU Chen, et al. Theoretical framework of

- saltwater intrusion prevention and control in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J/OL]. Water Resources Protection, 2022; 1-14 [2022-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20220520.1721.021.html>. (in Chinese))
- [18] 陈文龙,杨芳,宋利祥,等. 高密度城市暴雨洪涝防御对策:郑州“7·20”特大暴雨启示[J]. 中国水利,2021(15):18-20. (CHEN Wenlong, YANG Fang, SONG Lixiang, et al. Countermeasures for rainstorm and flood prevention in high-density cities; the “7·20” heavy rain revelation in Zhengzhou [J]. China Water Resources, 2021(15):18-20. (in Chinese))
- [19] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. 水利学报,2021,52(6):659-672. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, SONG Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese))
- [20] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3):17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(3):17-22. (in Chinese))
- [21] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):197-203. (BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 197-203. (in Chinese))
- [22] 刘幼萍. 珠江三角洲河网区变化环境下的河床演变趋势和水文极端事件[J]. 水文,2020,40(3):71-75. (LIU Youping. Tendency of fluvial process and hydrologic extreme events in river network of Pearl River Delta under changing environment [J]. Journal of China Hydrology, 2020,40(3):71-75. (in Chinese))
- [23] 毛新伟,仵荟颖,徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. 水资源保护,2020,36(4):100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))
- [24] 陈文龙,邹华志,董延军. 磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析[J]. 水科学进展,2014,25(5):713-723. (CHEN Wenlong, ZOU Huazhi, DONG Yanjun. Hydrodynamic of saltwater intrusion in the Modaomen waterway [J]. Advances in Water Science, 2014,25(5):713-723. (in Chinese))
- [25] 肖洋,王艳,徐辉荣,等. 珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):257-264. (XIAO Yang, WANG Yan, XU Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 257-264. (in Chinese))
- [26] 王强,郑松,徐傲,等. 多学科协同优化算法的分析和改进[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(23): 55-59. (WANG Qiang, ZHENG Song, XU Ao, et al. Analysis and improvement of multidisciplinary collaborative optimization method [J]. Computer Engineering and Applications, 2016,52(23):55-59. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-12 编辑:施业)

· 简讯 ·

2022(第十届)中国水生态大会召开

2022年12月30日,第十届中国水生态大会以线上线下相结合的方式召开。本次大会由河海大学联合南阳市人民政府、南阳师范学院、中国疏浚学会、中国南水北调集团中线有限公司、中国水利学会生态水利工程专业委员会、河南水利学会、郑州大学、华北水利水电大学共同主办。河海大学环境学院王沛芳院长主持大会开幕式。河海大学副校长郑金海,中国疏浚协会秘书长高伟,中国南水北调集团中线有限公司党委副书记、总经理曹红波,南阳师范学院党委书记卢志文等出席会议。

会议特邀了中国科学院夏军院士、中国工程院王浩院士、河海大学郑金海副校长、中国南水北调集团中线有限公司尚宇鸣总调度师、南阳师范学院张宝峰校长等著名专家、学者开展了五个主旨报告与九个主题报告。大会报告聚焦水环境、水生态领域热点和突出问题,深入探索水生态修复、水环境保护与治理新技术、新方法、新模式,对持续改善我国水环境质量、修复水生态系统、复苏河湖生态环境、促进经济社会高质量发展具有重要指导意义。本届水生态大会还委托《水资源保护》编辑部开展了论文征集和优秀论文评比活动,共收到论文156篇,评选出优秀论文一等奖、二等奖、三等奖、优秀学术论文共40篇,这对鼓励青年学者开展原创性研究,加强学术交流具有重要推动作用。

本刊编辑部供稿