

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.005

粤港澳大湾区咸潮综合防控体系研究

杨 芳^{1,2}, 陈文龙^{1,2}, 卢 陈^{1,2}, 邹华志^{1,2}, 王 强^{1,2}, 万东辉^{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:针对粤港澳大湾区咸潮逐年加剧、江河来水偏枯、供水需求增加的趋势,系统分析了珠江河口咸情面临形势及主要问题,揭示了珠江河口咸潮运动机理和上溯规律,结合珠江河口地区水资源时空分布和水厂取水、蓄水、供水格局特点,统筹考虑上游补水压咸、中游取蓄水避咸、下游工程措施阻咸 3 个层面的对策措施,创建了粤港澳大湾区咸潮综合防控体系。

关键词:咸潮防控;调水压咸;工程阻咸;珠江河口;粤港澳大湾区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0032-10

Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area// YANG Fang^{1,2}, CHEN Wenlong^{1,2}, LU Chen^{1,2}, ZOU Huazhi^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, WAN Donghui^{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: Facing the problems of frequent salt intrusion disasters, river water drought and increasing demand for water supply in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), situation of salt intrusion and the dominant problems of Pearl River Estuary is analyzed systematically, and the movement mechanism and upward trend of salt tide in Pearl River Estuary are revealed. Combined with the characteristics of spatiotemporal distribution of water resources and the patterns of water intake, storage and supply, a new comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in GBA is created with comprehensive consideration of the three-level measures, These three-level measures consist of upstream water replenishment to press saltwater, midstream water storage to avoid saltwater, and downstream engineering measures to prevent saltwater.

Key words: saltwater prevention and control; water replenishment to press saltwater; engineering measures to prevent saltwater; Pearl River Estuary; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

粤港澳大湾区水资源时空分布不均,供水水源单一,本地水库调蓄能力不足,供水以感潮河道型水源为主,河道供水占总供水量的 70.4%,供水安全受咸潮威胁^[1]。20 世纪 80 年代以来,随着城市化进程的加速发展,珠江河口咸潮影响范围越来越广,涉及广州、珠海、中山、佛山、东莞、江门等市以及澳门特别行政区,影响人口约 1500 万人^[2]。

2005 年以来,珠江流域已连续 17 年成功组织实施珠江枯水期水量调度,通过上游的调水压咸以及本地水库的蓄淡避咸,有力保障了粤港澳大湾区供水安全。由于气候变化,近年来珠江流域干旱事

件频发,当极端枯水年或连续枯水年遭遇强咸潮上溯时,流域骨干水库及区域本地水库蓄水量有限,极易面临调水量有限甚至无水可调局面,仅靠当前调水压咸措施已难以保障粤港澳大湾区供水安全^[3]。此外,随着粤港澳大湾区发展规划的实施,区域经济高速增长及城市群发展模式对区域供水量和供水水质提出了更高要求。在咸潮逐年加剧、未来江河来水偏枯、用水需求增多的情势下,大湾区供水安全将面临更大威胁^[4]。鉴于此,本文拟在分析珠江河口咸情面临的新形势及主要问题的基础上,深入研究珠江河口咸潮运动机理,提出珠江河口咸潮综合防

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001000);科技基础资源调查项目(2019FY101900)

作者简介:杨芳(1978—),女,正高级工程师,硕士,主要从事河口治理及水环境与水生态研究。E-mail: yangf21@tsinghua.org.cn

通信作者:陈文龙(1977—),男,正高级工程师,硕士,主要从事河口治理及水环境与水生态研究。E-mail: 48708209@qq.com

控体系,以期构建粤港澳大湾区咸潮防控理论框架,为有效提升珠江河口咸潮防控能力、保障粤港澳大湾区水安全提供支撑。

1 珠江河口咸潮防控面临的形势

1.1 咸潮上溯加剧

珠江河口面临上游来水偏枯、河道长期处于下切态势、重要口门拦门沙严重萎缩、海平面持续上升等不利局面,珠江河口咸潮上溯呈增强趋势^[5],具体表现为:①上游来水偏枯。珠江流域来水呈周期性变化,研究表明,2019—2028年将为水量较少的年份,珠江河口将面临较长时间的枯水年^[6]。②河道长期处于下切态势。21世纪以来西江、北江、东江主干河道平均下切幅度分别达2.5 m、1.2 m和0.4 m,未来流域上游来沙量持续减少态势不变,预测珠江三角洲河道仍将长期处于下切态势^[7]。③重要口门拦门沙严重萎缩。受上游来水来沙变化及采砂影响,磨刀门拦门沙-2 m以浅区域严重刷深,口门由东、西两汊与中心拦门沙并存格局,演变为拦门沙基本消失的单槽格局^[8]。④海平面持续上升。据《2019年中国海平面公报》,2000—2019年海平面上升6.6 cm,珠江河口平均海平面还将持续上升。

受上述不利因素综合影响,珠江河口咸潮发生频次增多、上溯距离增加、发生时间提前、持续时间延长。1949—1999年珠江河口发生严重咸潮的频率约为7 a一次,21世纪以来其平均发生频率已不足3 a一次;咸潮上溯距离从20世纪距口门50 km,推进到2020年的近70 km;2020枯水期和2009年相比,上游来水相当,但咸潮平均上溯距离增加了4.5 km。2021年珠澳供水系统取水口广昌泵站和联石湾水闸咸潮首次出现时间分别提前至6月21日和8月3日(一般为9月或10月上旬),为有记录以来最早;2021年9月,东江三角洲开始出现咸潮,较有记录以来咸潮最早出现时间提前约90 d,之后取水口含氯度连续突破历史极值,直至2022年3月才有所缓解,持续时间接近180 d^[9]。

1.2 供水需求增加

粤港澳大湾区经济发达,人口稠密,用水总量需求大,2017年用水总量199.65亿m³,其中珠三角9市用水量186.10亿m³,香港用水量12.58亿m³(来自东江的供水量占51.7%),澳门用水量0.97亿m³(其中96%的供水量依靠珠海供水系统供给)。在粤港澳大湾区建设的战略时期,随着产业及人口的不断聚集,大湾区用水总量需求将进一步加大,据预测,2030年珠海、澳门、中山等地平均需水量较2020

年增幅分别为10.7%、31.8%和11.7%^[10]。粤港澳大湾区中心城市均位于珠江河口,供水以河道型水源为主,布设于西江、北江、东江干流的取水口(取水总量15万m³/a及以上)分别为100个、29个和55个,河道供水占总供水量的70.4%。因此粤港澳大湾区供水保障与珠江流域中上游来水及河口咸潮上溯关系密切。在未来上游来水偏枯、咸潮逐年加剧的情势下,广州、珠海、东莞、中山及澳门等大湾区重要城市供水安全将会面临较大威胁。

1.3 咸潮防控技术体系不足

针对河口咸潮防控,国内外学者开展了相关理论研究和工程应用实践,主要分为水库调度补水压咸和河口工程阻咸两类措施。在实际的河口咸潮防控应用中,多仅靠单一类别措施进行咸潮防控,应对手段较为单一。国外主要侧重于采用临时潜坝、人工沙坎、水幕等工程措施阻挡咸潮上溯,对压咸补淡方面的研究较少。Luyun等^[11]通过SEAWAT模型预测截流墙安装后的盐水楔入侵现象,试验和数值模拟结果表明较短的截流墙能更快去除残留盐水。Abdoulhalik等^[12]通过物理模型试验和数值模拟研究,分析了3种不同结构的截流墙对盐水楔的破坏作用;同时Abdoulhalik等^[13]还通过对传统的地下物理屏障进行改进,提出了一种控制咸潮上溯的新型屏障系统,将不透水防渗墙和半渗透性地下水坝相结合,该系统相较不透水防渗墙和半渗透性地下水坝,分别使咸潮上溯距离减小62%和42%。与之相反,国内则主要依赖上游压咸补淡措施抑制咸潮上溯,而缺乏工程阻咸措施的研究。长江流域水量丰沛、河湖众多、水利设施密布,长江口压咸补淡主要是协同长江流域上中下游水情,充分发挥各种水利设施对长江口咸潮的改善作用,包括三峡水库径流调节、沿江省份节制取水、南水北调工程取水错开长江口枯季咸潮入侵高峰期等,当遭遇枯水年,需延长蓄水时间提前蓄水^[14-15]。钱塘江河口则主要依赖咸潮预报预警信息制定压咸补淡、避咸蓄淡方案,当遭遇特别严重咸潮,则根据缺水情况限制不同行业取用水量,以保证城市供水秩序稳定^[16-17]。珠江河口在长期的实践中创造和总结出“打头压尾”“动态控制”“避涨压落”等一系列独创压咸补淡调度策略,确定不同场景下最小压咸流量、最佳压咸时机和调度方案,具有针对性和可操作性,取得了良好的效果,基本保障了正常年份的供水安全,但极端干旱条件下,仍存在有效蓄水率低、压咸流量保障不足的问题^[18-19]。

压咸补淡和阻咸措施均能在一定程度上抑制咸潮上溯,但二者均存在显著不足。压咸补淡措施受

上游来水条件、水库有效水量制约较大,在遭遇特枯年或连续枯水年时,流域上游水库蓄水将严重不足,仅调度上游水库补水无法应对咸潮上溯,河道取水保障率显著降低。例如,2021年东江流域遭遇了1963年以来最为严重的秋冬春夏连旱,相应咸潮上溯也是最为严重的一年,东江流域来水减少七成,骨干水库最枯时有效蓄水率仅为5%,新丰江水库已突破死水位以下0.2 m,基本面临无水可调的局面,9—12月以东江三角洲河道来水为水源的东莞市各水厂取水口含氯度超标时长累计高达1232 h,含氯度最高超过1200 mg/L,水厂暂停取水累计总时长达700 h^[4]。而临时潜坝、人工沙坎、水幕工程等阻咸措施的研究目前尚不成熟,其适用性、可行性、具体参数设置等尚无明确结论,其与河口治理、防洪安全、滩槽演变等的协调性也有待进一步研究。

河口咸潮防控是一项涉及流域-区域协同治理和上中下游联合调度的系统工程,应将水库调度补水压咸和河口工程阻咸有机结合,一方面采用水库调度补水压咸和三角洲取输蓄供工程调度相结合的方式确保供水安全,另一方面从源端阻拦咸潮上溯。因此,若在现有措施基础上增加河口阻咸措施,可进一步完善粤港澳大湾区咸潮防控体系。在此过程中需解决若干关键技术问题,如调水压咸时机、蓄水时机以及阻咸工程关键参数等,而全面掌握和认识咸潮运动规律及机理,是突破以上关键技术的理论基础。

2 珠江河口咸潮运动规律及其输运机理

珠江河口咸潮影响因素多、规律复杂多变,受潮汐、径流变化影响,咸潮上溯具有明显的日周期、半月周期和季节变化规律,且珠江河口为多汊出海,各口门径流、潮汐动力作用关系与河床地形不一致,存在不同的盐淡水混合、层化机制;即便在同一口门,在不同潮汐条件下盐淡水垂向环流过程也存在显著差异^[20]。西江磨刀门水道沿程取水口众多,是珠海和澳门供水的重要水源,受咸潮影响显著。针对磨刀门水道咸潮运动规律,2009年12月,珠江水利科学研究院开展了一次大规模的咸潮原型观测,观测时段为12月10日15时到25日15时,共布设了8条测量垂线(图1, P1~P8),观测内容包括盐度、流速、流向、风速和风向,其中流速、流向和盐度垂向为每隔1 m测量一个数据,垂向分层数为8~12层,获得了为期半月的逐时资料。本次测量数据具有较好的代表性,既能反映磨刀门水道咸潮上溯的日周期和半月潮周期变化规律,又能体现盐淡水混合、层化动力结构特征。

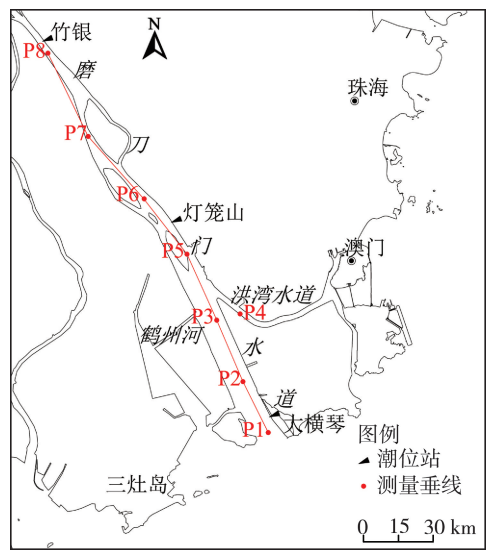


图1 测量垂线位置布置

Fig. 1 Map of the vertical observation line

2.1 咸潮运动规律

2.1.1 时间变化规律

珠江河口潮汐属于不规则半日潮,一日以内以两涨两落周期性变化为主,如图2所示。受潮汐影响盐度也呈现出两涨两落的日内变化特征,且盐度峰、谷值一般滞后于涨停、落憩1~2 h。

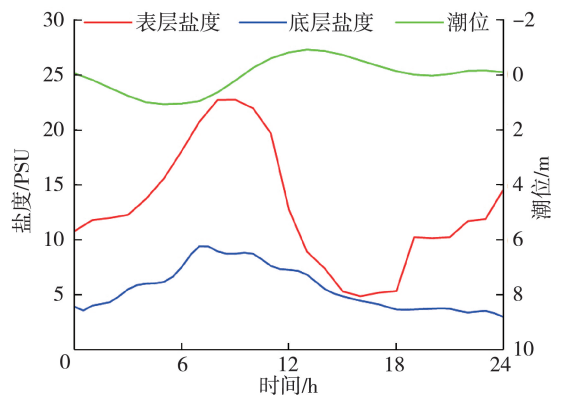


图2 P5 测量垂线表底层盐度日变化

Fig. 2 Daily variation of surface and bottom salinity at P5

磨刀门水道咸潮具有特殊的大中小潮周期变化规律,本文分别从实测盐度和咸界的逐时变化对其进行分析。图3给出了P1~P8测量垂线盐度逐时变化与大横琴潮位的对应关系。结果表明,磨刀门水道半月潮周期内的盐度变化具有一定的规律性:小潮期,底层盐度以盐水楔的形式持续入侵河道上游,表层盐度基本维持不变,此阶段表底层盐度差值最大;中潮期,表层盐度持续上升,底层盐度逐日略微下降,表底层盐度差持续减小;大潮期,潮汐动力强劲,盐水“大进大出”,表底层盐度每日持续下降,表底层盐度差逐渐加大。

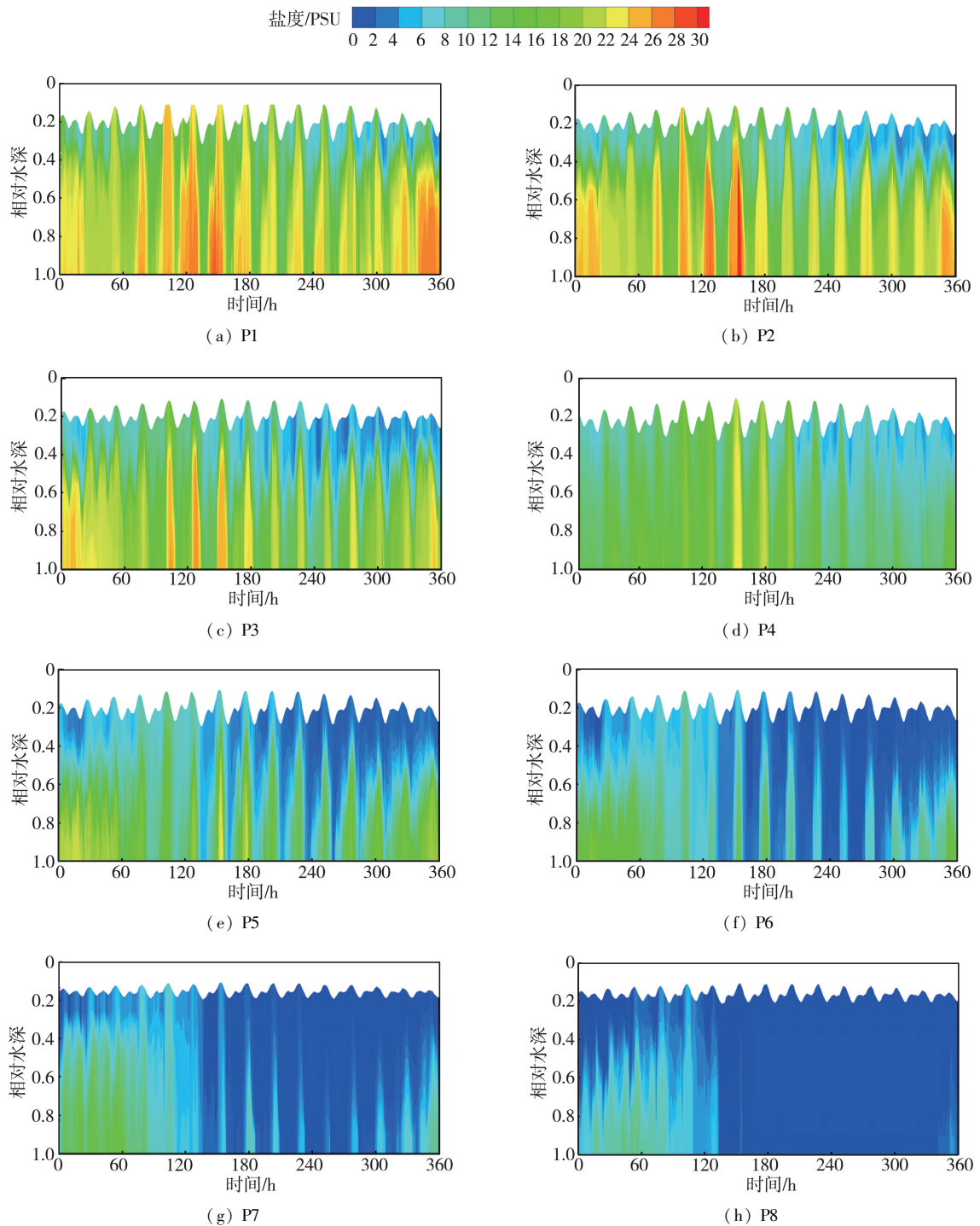


图3 测量垂线盐度半月变化过程

Fig. 3 Salinity variation process of vertical observation line in fortnight period

进一步分析咸界半月周期变化规律,以2009年实测盐度资料,辅以对应时刻的磨刀门沿岸取水厂含氯资料,进行插值计算得到半月潮周期的逐时咸界(表层盐度0.5 PSU)距河口(以石栏洲为零点)的距离,结果如图4所示。咸界变化趋势总体而言可分为上升和下降两个阶段,上升的开始阶段对应潮型为小潮期,随着潮差的逐渐增大,咸界从距河口21.5 km 稳步上移至46.0 km,至大潮前两三天的中潮咸界达到峰值64.0 km,随后咸界逐日缓慢下

移^[21]。整体而言,咸界上移的时间较短,只需6个日潮周期,但是上涨速率快,而咸界下移历时长,需要9个日潮周期,且速率缓慢。

2.1.2 空间变化规律

图5为磨刀门大、小潮的盐度垂向分布,一般下游盐度大于上游,底层盐度大于表层,其中小潮期从口门处向河道内盐度缓慢减小,垂向分层明显;大潮期垂向掺混较为均匀,纵向分层明显,盐水上移距离较小潮时大幅下移。

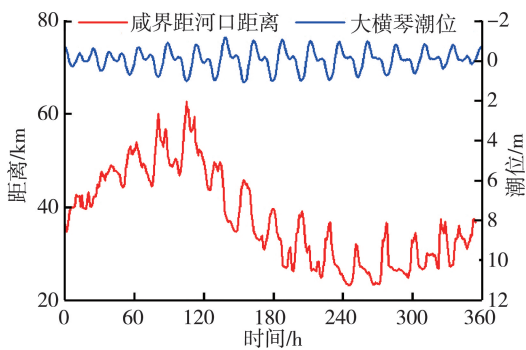
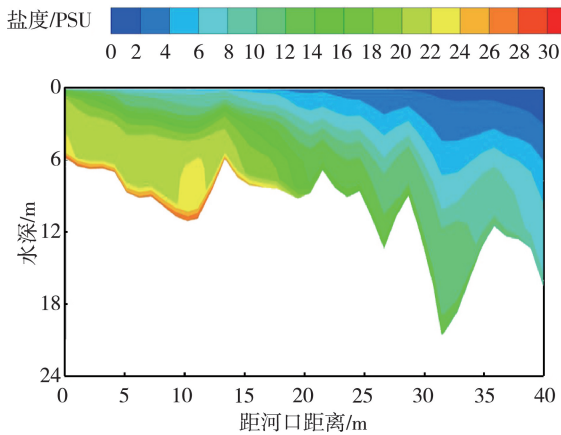
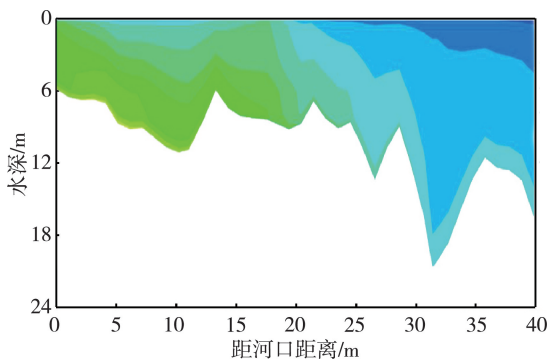


图4 咸界半月周期变化(2009年12月10—25日)

Fig.4 Periodic variation of saline water intrusion border in half a month(December 10 th-25 th, 2009)



(a) 小潮(2009年12月11日1时)



(b) 大潮(2009年12月16日4时)

图5 磨刀门水道大、小潮盐度垂向分布

Fig.5 Vertical distribution of salinity in Modaomen channel at neap tide and spring tide

采用分层系数评价混合强弱, 分层系数表达式为

$$N = \Delta s / \bar{s} \quad (1)$$

式中: N 为分层系数; Δs 为表底层盐度差; \bar{s} 为断面平均盐度。分层系数 N 越小, 混合越均匀; 反之, 则分层明显。图6为潮周期平均盐度空间分布, 图7为不同测量垂线分层系数半月周期变化曲线。结果显示, 分层系数上游段大于下游段, 同样表现出下游段的混合强度大于上游段, 且分层在小潮期最显著, 随着潮差的增大混合逐渐加强, 在小潮后的中潮期

表底层混合最均匀, 随着潮差的继续增大, 其分层又逐渐增强, 分层系数逐渐增大。

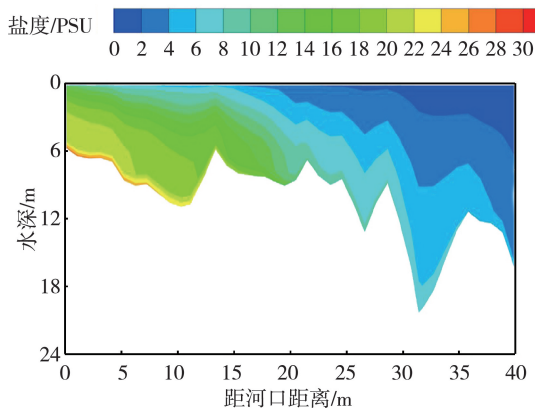


图6 潮周期平均盐度空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of mean tidal salinity

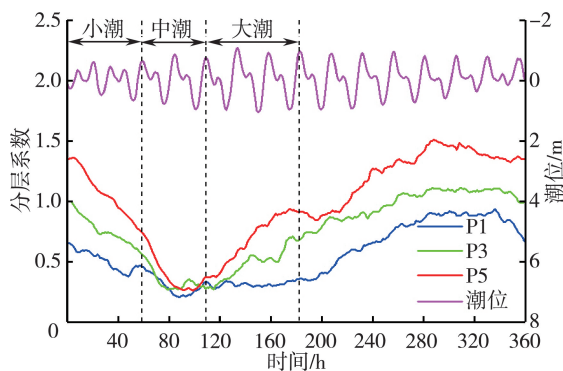


图7 日潮平均分层系数变化

Fig.7 Daily variation of stratification coefficients

2.2 咸潮输运机理分析

2.2.1 输运过程分解

对咸潮单宽通量输运过程进行分解, 分析径流和潮流作用下盐度输运变化规律。根据物质通量计算方法^[22], 瞬时变化的流速 u 和盐度 s 分解为

$$u = u_A + u_E + u_T \quad (2)$$

$$s = s_A + s_E + s_T \quad (3)$$

式中下标 A、E、T 分别表示潮平均的垂向平均余流项、重力环流项和潮汐波动项。因此, 潮汐平均的盐通量 F_s 可以分解为

$$F_s = \frac{1}{T} \iint (u_A + u_E + u_T) (s_A + s_E + s_T) dAdt \approx$$

$$\frac{1}{T} \iint (u_A s_A + u_E s_E + u_T s_T) dAdt =$$

$$\frac{1}{T} \iint u_A s_A dAdt + \frac{1}{T} \iint u_E s_E dAdt + \frac{1}{T} \iint u_T s_T dAdt =$$

$$F_A + F_E + F_T \quad (4)$$

式中: F_A 为平流盐通量; F_E 为重力环流形成的盐通量; F_T 为潮汐波动引起的盐通量。 T 为潮周期; A 为断面面积; t 为时间。

2.2.2 盐度运输机理分析

基于以上盐度运输过程分解,对2009年12月10日15时至25日15时数据进行逐日平均,分别得到第1~14天的日平均值,其中第1天为小潮段,第4天为小潮后的中潮段,第7天为大潮段,第10天为大潮后的中潮段,第14天则重回到小潮。图8为P1、P5和P6测量垂线的盐度重力环流项 s_E 逐日变化(s_E 正值表示向海方向运输盐分,负值表示向内河方向运输盐分),上层为正值,下层为负值,总体上第1天和第14天的 s_E 绝对值最大,第7天的居中,第4天和第10天的最小,对应潮型则表现为小潮最大、大潮次之、中潮最小,说明小潮的环流最强,中潮的环流最弱。

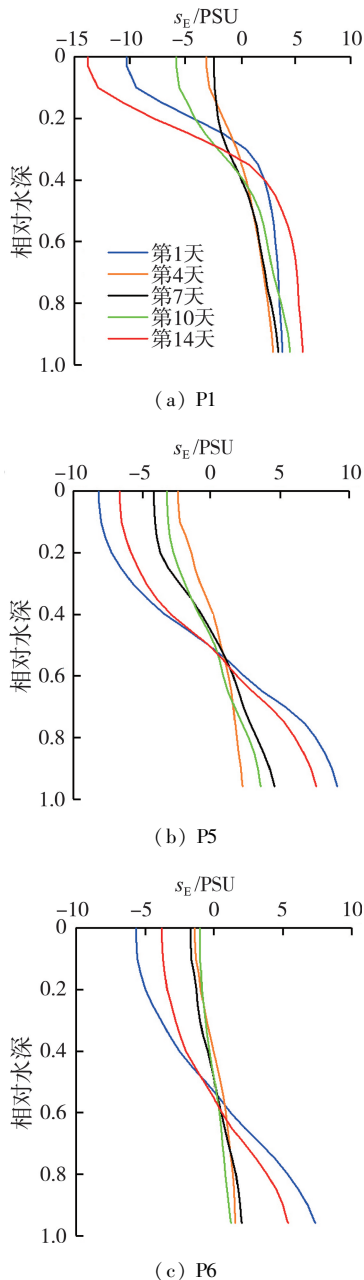


图8 盐度重力环流逐日变化

Fig. 8 Daily variation of salinity gravity circulation

图9为测量垂线P5的盐通量 F_S 、 F_A 和 F_E 逐日变化情况,由于上游的稳定径流量的影响, F_A 始终表现为向海运输(正值),重力环流项 F_E 则与 u_E 、 s_E 相关,由于 u_E 、 s_E 的绝对值上层均大于下层,从而使得 F_E 始终为向内河运输(负值), F_T 量级较 F_A 和 F_E 小,因此, F_S 的正负和大小主要由 F_A 和 F_E 相对大小关系所决定。 F_S 的正负则决定了盐分是在河道内累积还是向外海下泄,当 F_S 为正则为盐分下泄,反之则为盐分累积。第1天、第2天的中潮期,由于潮差较小,混合强度较弱,垂向盐度分层明显,重力环流运输明显大于径流平流运输,此时 F_S 为净向内河的运输方向;第3~10天随着潮差的增大,混合作用加强, F_E 逐渐减弱,且随着径流量的增大 F_A 也逐渐增大,从而使 F_S 变化为净向海的运输方向(正值);第11~14天 F_A 小幅降低, F_E 则由于潮差的逐渐减少而缓慢增大,使得 F_S 的盐分运输方向出现向海和向内河的波动变化。

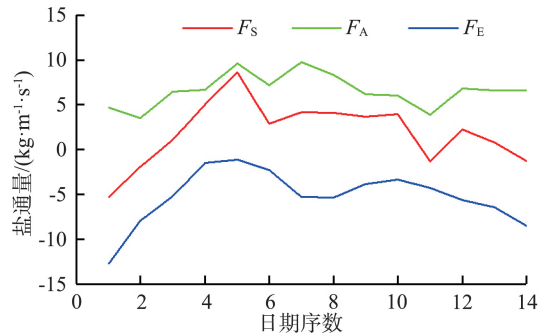


图9 P5 测量垂线的盐通量逐日变化

Fig. 9 Daily variation of salt flux on vertical observation line at P5

2.3 咸潮运动机理

磨刀门水道咸潮上溯半月周期内可分为上升和下降两个阶段,咸潮上溯最远发生在小潮后的中潮期,咸潮上溯过程伴随着盐淡水混合和层化交替转换,采用咸潮运输机理对这一典型规律进行分析,结果表明:小潮期由于重力环流驱动盐淡水层化,盐淡水高度分层,盐水楔从底层长驱直入;小潮后中潮期垂向混合驱动盐淡水混合,盐淡水混合加强,底层盐水掺混于表层,咸界进多退少,达到最大上溯距离;大潮期重力环流和径流平流运输相互博弈,表底层盐淡水混合相对均匀,向内河或向海运输,咸界进少退多,整体下移;大潮后中潮期重力环流再次主导层化,盐淡水向缓混合甚至弱混合转变,再次形成盐水楔现象,进而形成周而复始的半月周期变化过程^[23-24],如图10所示。

分析图10可知,靠上游的表层盐度变化与底层盐度的蓄积和潮汐的混合变化有关:底层盐度首先

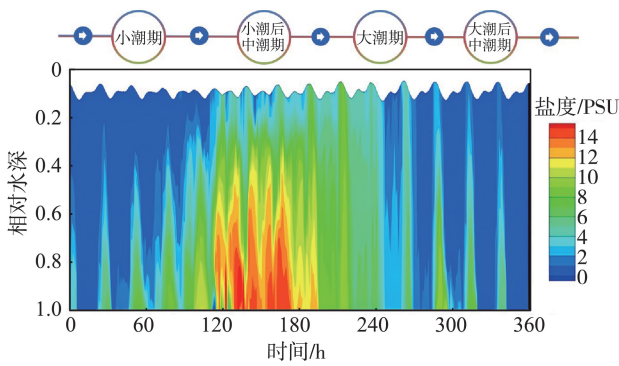


图 10 咸潮运动机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of salt tide movement mechanism

在小潮期蓄积,然后随着潮差逐渐增大,整体流速增大,垂向混合逐渐增强,底层蓄积的盐分逐渐掺混至表层,并随潮汐运动而涨落,最终引起咸界的上下移动。因此,有两个途径控制咸界的上涨:一是可通过增加径流量将盐分在最短时间内推移出口,减少河道的盐分总量;二是控制底层盐度的上涨,切断表层盐度的源头。咸潮运动机理可为进一步探讨调水压咸和河口阻咸措施提供理论支撑。

3 珠江河口咸潮“上补-中蓄-下阻”综合防控体系

3.1 “上补”

“上补”,即上游水库调度补水压咸。珠江河口咸潮上溯具有典型的半月潮周期变化规律,期间盐淡水混合、层化状态交替转换,小潮期盐水上溯现象明显,咸潮对上游流量变化的响应与盐淡水的混合状态密切相关。因此,充分考虑咸潮运动机理,科学确定最佳压咸时机,合理分配半月潮周期内的压咸水量,是实现水库调度补水压咸效果最佳的关键所在。

压咸时机和压咸流量是保证压咸效果、减少淡水资源浪费的关键控制参数,众多学者采用原型观测、机理分析、数值模拟等多种方法开展了大量的研究。压咸时机的确定与咸潮运动机理密切相关。卢陈等^[25]采用原型观测资料分析、水槽机理试验和咸潮物理模型试验相结合的研究方法对磨刀门水道压咸时机进行了分析,指出盐淡水垂向混合最好、表层盐度最大的时段,即小潮后的中潮期是最佳压咸时机。小潮期口门内盐淡水的垂向分层较为明显,指向上游的斜压梯度力较大,咸势整体处于上涨阶段,存在明显的表层低盐水向海、底层高盐水向内河的纵向环流结构,压咸淡水到达后,表层盐度降低较为明显,底层水体的盐度几乎维持不变,说明压咸淡水易从表层快速流失,而底层高盐水则难以消退,因此,在小潮期增大上游流量的压咸效果不佳。自中

潮期开始,盐淡水垂向混合较强,重力环流减弱,上游淡水对下游高盐水形成挤压作用,咸势整体处于消退阶段,流量增加后表、底层盐度均有所降低,说明压咸淡水流失速率减缓,与高盐水混合后随潮流涨落进退,最终携带更多盐分流入外海,整体而言,中潮期及其后的大潮期增大上游流量的压咸效果会更好。然而,不同学者对压咸时机选择上仍存一定的争议,尹小玲等^[26]通过分析枯季磨刀门水道监测资料,指出在咸潮退落末期增加流量可以得到较好的压咸效果,而闻平等^[27]则认为大潮转小潮期是压咸补淡的最佳时机。因此,针对珠江河口调水压咸时机和压咸流量的研究,需进一步分析不同动力特征口门咸潮运动规律及盐淡水混合、层化机制,识别不同径流与潮流博弈条件下咸潮上溯的关键影响因素,综合确定调水压咸时机,精准增加下泄流量,减缓咸潮上溯强度,提升取水口取淡概率,为水厂取水创造有利条件。

3.2 “中蓄”

“中蓄”,即中游三角洲地区取蓄淡水避咸。在充分认识咸潮上溯规律和机理的基础上,构建高效、适用的咸潮预报技术,精准预报取水口的取淡概率和取水窗口期,对区域取水、蓄水等供水工程体系开展精细化调度,充分利用本地调蓄能力,实现错峰抢淡或择优取淡,尽可能增加淡水储蓄量,避免咸潮对供水造成的不利影响^[28]。精细化咸潮预报和供水调度是开展“中蓄”的关键,但需根据区域特征因地制宜地采用不同咸潮预报方法和供水调度模式,构建针对性“中蓄”措施,实现水利工程精细化调度及水资源高效利用。

粤港澳大湾区城市群多以湖库、河涌、清水池等作为主要的供水蓄水空间。其中,以湖库为主要蓄水空间的区域,地势起伏较大、河网密度较小、河涌容量有限,湖库泵站众多,外江与湖库连通,应充分利用湖库调蓄作用,汛末通过泵站将外江淡水抽蓄到湖库中,枯水期再适时向湖库补水,形成江水补库、库水避咸的调度机制,需根据咸潮预报和水厂供水负荷变化情况进行综合优化,确定最佳泵站取水、水库补水和水库出水的调度方式;以内河河涌为主要蓄水空间的区域,地势平坦开阔、河网密度高、河涌容积大、水库湖泊少、水闸泵站众多,内河涌与外江水力联系密切,需准确把握抢淡时机,优化水闸抢淡、河涌蓄淡、水库调度和泵站供淡等调度工程,将外江淡水蓄积到内河涌,置换河涌水体,改善河涌水质,满足枯水期应急供水需求;以清水池为主要蓄水空间区域,则应在咸潮精准预报基础上,需通过错峰取水、上下游水厂互补、清水池调蓄、二次供水混合

等措施,最大程度降低末端管网水的盐度,降低咸潮对供水安全的影响。

咸潮预报按时间尺度可分为短期预报和中长期预报,二者适用范围不同。对于以湖库或河涌为主要蓄水空间的区域,本地调蓄能力较强,主要依靠中长期咸潮预报,在保证一定取淡概率下,经过取水口、水厂、水库之间多源互补,即可满足供水要求,如西江三角洲的珠澳供水系统,具备约 39 d 的调蓄能力,且各取水口、水库、水厂间连通性较好,具备“多源互补”的饮用水调配能力,咸潮预报需求为半月或月尺度的中长期取淡概率预报^[29];对于以清水池为主要蓄水空间的区域,本地调蓄能力较弱,短时间尺度下水厂盐度的精准预报尤为重要,如东江三角洲的东莞市,仅依靠各水厂清水池不足 2 h 的调蓄能力,咸潮预报的关键需求为日尺度的短期逐时盐度过程。

3.3 “下阻”

“下阻”,即下游工程措施阻咸。不同类型工程措施的阻咸原理与适用性存在显著差异,“下阻”措施需基于所在区域的咸潮运动机理,因地制宜,有针对性地确定工程类型,这是实现高效阻咸的关键所在。通过适用的工程措施,从咸潮上溯的源端阻挡外海高盐水入侵,从而降低咸潮上溯的强度,为上游取水口创造更高的取淡概率,可与“上补”“中蓄”措施配合协调实施,保障极端枯水年或连续枯水年情况下的供水安全。

对于盐淡水分层型河口,如磨刀门水道,外海高盐水多以盐水楔的形式从底部入侵,如能通过潜坝、拍门等底部半阻断的工程措施破坏其盐水楔的形成或减缓盐水楔的上溯速度,可有效降低咸潮的上溯强度,但阻咸工程纵向布置位置、结构高度、形式等关键工程参数,需要在充分掌握其盐淡水混合、层化变化规律基础上开展充分的论证。对于充分混合型河口,其潮汐动力较强,如东江南支流,外海高盐水主要随涨潮流向上游输移和扩散,下阻工程措施一般采用水闸、围堰等垂向全阻断的结构形式阻断咸潮上溯通道,可彻底解决咸潮上溯问题,但需考虑工程建设对通航、生态等的综合影响。

磨刀门存在明显的盐淡水垂向分层现象,小潮期底层高盐水以盐水楔的形式持续上溯,期间高盐水涨多退少,这是磨刀门咸潮的典型运动规律。因此,磨刀门可采用底部半阻断的工程措施,通过破坏其盐水楔的垂向分层,减缓高盐水的上溯速度,从而达到有效阻咸的效果。综合考虑咸潮上溯规律、工程投入和泄洪、通航等需求,宜采用水下拍门和拦门沙修复的工程措施^[30]。其中,水下拍门具有投资

少、安装快和不影响泄洪、通航的优点,可作为应急工程措施,用以应对严重的咸潮上溯事件;拦门沙修复具有生态友好、抑咸时效长的优势,可作为远期阻咸工程措施,用以应对海平面上升等引发的咸潮上溯加剧形势。

3.3.1 水下拍门阻咸原理与效果

水下拍门适用于盐淡水分层型河口,主要通过破坏盐水楔的形式减缓咸潮上溯。利用磨刀门咸潮以盐水楔的形式从底部入侵的特性,通过在底部设置拍门,涨潮期在涨潮流推力作用下拍门关闭,在直接减缓盐水楔上溯速度的同时,增强拍门所在位置盐淡水的垂向混合,进而起到减弱咸潮上溯的作用;落潮时,拍门在落潮流的推动下自动打开,使底部高盐水可随潮流顺利下落,纵向上可阻塞底层盐水入侵通道,垂向上增强垂向混合破坏层化,从而达到减缓咸潮上溯的目的。罗丹等^[31]通过咸潮物理模型试验分析了水下拍门抑咸效果,结果表明,水下拍门不影响泄洪、通航,咸潮上溯量比不设拍门时大为减小,在一个半月潮过程中,最远的上溯距离较无拍门时减少约 10 km,且水体盐度大为减小。

3.3.2 拦门沙阻咸原理与效果

以磨刀门为例,对拦门沙的阻咸原理进行分析。没有拦门沙的地形条件下,外海高盐水得以长驱直入,磨刀门水道出口段盐水楔厚度和入侵长度均明显增大,进而加剧了底层向内河、表层向海的纵向环流结构,即底层高盐水快速入侵,同时表层低盐水亦加速入海流失,咸潮上溯较为严重。拦门沙修复后,拦门沙浅滩对口外高盐水的入侵具有直接的阻挡作用,当外海高盐水以底层盐水楔的形式到达拦门沙水域时,由于地形坡度变陡,盐水楔前锋初期难以顺利越过拦门沙体,同时底层高盐水顺拦门沙浅滩地形向水体表层运动,至拦门沙顶时由于水深变浅,垂向混合增强,高度分层的盐水楔遭到破坏,有利于减缓咸潮上溯;另一方面,由于拦门沙浅滩的阻挡,东西两侧深槽成为高盐水上溯的主要通道,由于两侧深槽存在一定的夹角,当底层高盐水体汇合时存在一定的相互顶托作用,从而减缓盐水楔的上溯速度。研究表明,拦门沙每抬高 1.5 m,距离河口 15 km 内平均含氯度约减小 600 mg/L,上溯距离约减少 1 km;距离河口 23 km 内平均含氯度约减小 252 mg/L,上溯距离约减少 500 m^[8,32]。

4 结 语

珠江河口是粤港澳大湾区的核心区域,珠江河口咸潮防控对粤港澳大湾区水安全保障极为重要。目前,在上游来水偏枯、网河区干流河道大规模下

切、拦门沙萎缩、海平面持续上升、不利风况出现概率增加的形势下,珠江河口咸潮发展态势不容乐观。本文通过分析珠江河口不同动力特征口门咸潮运动机理和上溯规律,系统梳理了珠江河口咸潮面临的新形势及主要问题,在珠江河口的若干抑咸策略基础上,创建了统筹流域、三角洲和河口的珠江河口咸潮“上补-中蓄-下阻”综合防控体系,初步构建了粤港澳大湾区咸潮防控理论框架,可有效保障珠江河口特枯年份或连续枯水年份应急供水安全,为提升珠江河口咸潮防控能力、保障粤港澳大湾区水安全提供支撑,也可为我国其他河口乃至世界河口咸潮防控提供参考。

参考文献:

[1] 陈文龙,刘万根,张康,等. 粤港澳大湾区水资源安全战略思考 [J]. 中国水利, 2022 (5): 54-57. (CHEN Wenlong, LIU Wangen, ZHANG Kang, et al. Strategic thinking of water resources security in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Water Resources, 2022(5):54-57. (in Chinese))

[2] YUAN R, ZHU J. The effects of dredging on tidal range and saltwater intrusion in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(6): 1357-1362.

[3] 杨芳,何颖清,卢陈,等. 珠江河口咸潮变化形势及抑咸对策探讨 [J]. 中国水利, 2021 (5): 21-23. (YANG Fang, HE Yingqing, LU Chen, et al. Changes of seawater invention situation in the Pearl River Estuary and salinity reduction solutions [J]. China Water Resources, 2021(5):21-23. (in Chinese))

[4] 杨芳,邹华志,卢陈,等. 东江三角洲咸潮加剧原因和对策探讨 [J]. 中国水利, 2022(4):28-30. (YANG Fang, ZOU Huazhi, LU Chen, et al. Study on reasons and measures to increasing seawater intrusion in Dongjiang Delta [J]. China Water Resources, 2022(4):28-30. (in Chinese))

[5] 王艺霖,苏程佳,陈晓宏,等. 磨刀门水道枯水期咸潮变化趋势及成因 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (2): 37-43. (WANG Yilin, SU Chengjia, CHEN Xiaohong, et al. Change trend and cause of salt tide in Modaomen Channel during dry seasons [J]. Water Resources Protection, 2019,35(2):37-43. (in Chinese))

[6] 李军,吴旭树,王兆礼,等. 基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究 [J]. 水利学报, 2021, 52 (4): 486-497. (LI Jun, WU Xushu, WANG Zhaoli, et al. Changes of drought characteristics in future in Pearl River Basin describing by a new comprehensive standardized drought index [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(4): 486-497. (in Chinese))

[7] 袁菲,何用,许劭婧. 近期珠江三角洲地形演变特征及

趋势 [J]. 泥沙研究, 2022, 47 (1): 59-64. (YUAN Fei, HE Yong, XU Jiejing. Recent topographical evolution characteristics and trend of the Pearl River Delta [J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(1):59-64. (in Chinese))

[8] 朱泽文,刘丙军. 珠江河口拦门沙演变对咸潮上溯的影响 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (11): 48-51. (ZHU Zewen, LIU Bingjun. Research on the influence of evolution of sand bar in the Pearl River Estuary on saltwater intrusion [J]. Water Resources and Power, 2021,39(11):48-51. (in Chinese))

[9] 胥加仕. 2021 年珠江流域抗旱保供供水工作实践与启示 [J]. 中国水利, 2022(1):8-11. (XU Jiashi. Practice and enlightenment of drought prevention and water supply for the Pearl River Basin in 2021 [J]. China Water Resources, 2022(1):8-11. (in Chinese))

[10] 李杰,李媛媛,吉红香. 粤港澳大湾区供水安全对策研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42 (增刊 2): 1-5. (LI Jie, LI Yuanyuan, JI Hongxiang. Study on water supply safety countermeasures in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Pearl River, 2021, 42 (Sup2): 1-5. (in Chinese))

[11] LUYUN J R, MOMII K, NAKAGAWA K. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3/4): 227-236.

[12] ABDOULHALIK A, AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: experimental and numerical study [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 199: 62-73.

[13] ABDOULHALIK A, AHMED A, HAMILL G A. A new physical barrier system for seawater intrusion control [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 416-427.

[14] 高华斌,唐兵. 应对长江口咸潮入侵的临界流量经验模型研究 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37 (4): 25-29. (GAO Huabin, TANG Bing. Empirical model of critical flow rate in response to salt water intrusion in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(4):25-29. (in Chinese))

[15] 陈祖军,阮仁良,韩昌来,等. 长江口水源地咸潮入侵应对预案体系 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 52-58. (CHEN Zujun, RUAN Renliang, HAN Changlai, et al. Pre-plan system for saltwater intrusion into water sources area of Yangtze Estuary [J]. Water Resources Protection, 2019,35(5):52-58. (in Chinese))

[16] 李光辉,孙志林,胡世祥,等. 盐水入侵理论预测模型及其在钱塘江河口的应用 [J]. 水力发电学报, 2016, 35 (11): 9-15. (LI Guanghui, SUN Zhilin, HU Shixiang, et al. Predictive model for salt water intrusion and its application in the Qiantang Estuary [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (11): 9-15. (in

- Chinese))
- [17] 李若华,马继侠,张舒羽,等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River Estuary under strong tide[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):37-44. (in Chinese))
- [18] 刘晋,黄春华,曾桂珍. 珠江梯级水库群联合抑咸优化调度方案研究[J]. 广东水利水电,2016(7):9-12. (LIU Jin, HUANG Chunhua, ZENG Guizhen. Study on cascade reservoir operation in Pearl River for saltwater tide control[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2016(7):9-12. (in Chinese))
- [19] 何治波,吴珊珊,张文明. 珠江流域防汛抗旱减灾体系建设与成就[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(10):71-79. (HE Zhibo, WU Shanshan, ZHANG Wenming. Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Pearl River Basin[J]. China Flood & Drought Management,2019,29(10):71-79. (in Chinese))
- [20] 诸裕良,闫晓璐,林晓瑜. 珠江口盐水入侵预测模式研究[J]. 水利学报,2013,44(9):1009-1014. (ZHU Yuliang, YAN Xiaolu, LIN Xiaoyu. Study on prediction model of saline intrusion in Pearl River Delta[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(9):1009-1014. (in Chinese))
- [21] 卢陈,袁丽蓉,高时友,等. 潮汐强度与咸潮上溯距离试验[J]. 水科学进展,2013,24(2):251-257. (LU Chen, YUAN Lirong, GAO Shiyu, et al. Experimental study on the relationship between tide strength and salt intrusion length[J]. Advances in Water Science, 2013,24(2):251-257. (in Chinese))
- [22] DYER K R. Estuaries:a physical introduction[M]. 2nd ed. Singapore:John Wiley & Sons,1997:195.
- [23] 方神光,崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):14-18. (FANG Shengguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):14-18. (in Chinese))
- [24] 潘明婕,杨芳,荆立,等. 台风“纳沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制[J]. 水资源保护,2019,35(4):42-48. (PAN Mingjie, YANG Fang, JING Li, et al. Dynamic mechanism of salinity intrusion in Modaomen Waterway during typhoon “Nesat” transit[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):42-48. (in Chinese))
- [25] 卢陈,刘晓平,高时友,等. 珠江磨刀门河口调水压咸的时机研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2014,29(2):197-204. (LU Chen, LIU Xiaoping, GAO Shiyu, et al. Investigation of the timing of water diversion to restrain saline water intrusion in Modaomen Estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014,29(2):197-204. (in Chinese))
- [26] 尹小玲,张红武,方红卫. 枯季磨刀门水道咸潮活动与压咸控制分析[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2008,23(5):554-559. (YIN Xiaoling,ZHANG Hongwu,FANG Hongwei. Hydrodynamic analysis and control on saline water intrusion in Modaomen Waterway during the dry season[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2008,23(5):554-559. (in Chinese))
- [27] 闻平,戚志明,刘斌. 西北江三角洲压咸流量初步研究[J]. 水文,2009,29(增刊1):74-75. (WEN Ping, QI Zhiming, LIU Bin. Research on flow capacity for repelling saltwater intrusion in the North and West River Delta[J]. Journal of China Hydrology, 2009,29(Sup 1):74-75. (in Chinese))
- [28] 涂新军,吴海鸥,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))
- [29] 孔兰,陈晓宏,刘斌,等. 咸潮影响下磨刀门水道取淡时机初探[J]. 水资源保护,2011,27(6):24-27. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, LIU Bin, et al. A preliminary study on fresh water extraction time under influence of salt tide in Modaomen Channel[J]. Water Resources Protection, 2011,27(6):24-27. (in Chinese))
- [30] 李彬,孔俊,叶荣辉,等. 基于底层盐水楔扰动的磨刀门咸潮上溯防控研究[J]. 水文,2022,42(1):67-74. (LI Bin, KONG Jun, YE Ronghui, et al. Study on measures of saltwater intrusion control in Modaomen waterway based on disturbing the bottom salt wedge[J]. Journal of China Hydrology, 2022,42(1):67-74. (in Chinese))
- [31] 罗丹,卢陈,高时友. 潜伏式抑咸活动拍门的研究[J]. 人民珠江,2011,32(4):1-2. (LUO Dan, LU Chen, GAO Shiyu. Research on latent active flap gate for saltwater resistance[J]. Pearl River, 2011,32(4):1-2. (in Chinese))
- [32] 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))

(收稿日期:2022-04-13 编辑:熊水斌)