

陆源淡水流量对海岸水库海水入侵的影响

陈鹤翔^{1,2}, 金光球^{1,2}, 谢天云³, 张广明^{1,2}, 李凌⁴

(1. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 广州市水务规划勘测设计研究院, 广东 广州 510640; 4. 西湖大学工学院, 浙江 杭州 310024)

摘要:采用平板水槽系统开展了室内物理模型试验,探究了陆源地下水流量与入库地表水流量对海岸水库海水入侵的影响。结果表明:海岸水库的下盐水楔入侵长度与陆源淡水流量呈对数下降关系,随着陆源淡水流量的增大,下盐水楔入侵长度减小趋势减弱;与陆源地下水相比,入库地表水对海岸水库海水入侵的抑制作用更显著;随着陆源淡水流量增大,海岸水库库底盐分减少,上盐水楔比下盐水楔先减小、消失;通过减少地下水的开采和采取调水入库的手段可以抑制海岸水库海水入侵,缓解水库水体的咸化。

关键词:海岸水库;海水入侵;地下水;地表水;平板示踪;盐分迁移

中图分类号:TV697.1⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)04-0029-06

Effects of inland fresh water discharge on seawater intrusion in coastal reservoirs//CHEN Hexiang^{1,2}, JIN Guangqiu^{1,2}, XIE Tianyun³, ZHANG Guangming^{1,2}, LI Ling⁴ (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Guangzhou Institute of Water Plan Investigation & Design, Guangzhou 510640, China*; 4. *School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China*)

Abstract: Systematic indoor physical model experiments of a flat flume system were carried out to explore the influence of inland fresh water discharge on seawater intrusion in coastal reservoirs. The results show that a logarithmic decrease relationship between the invasion length of the lower saltwater wedge and the discharge of inland fresh water exists. The decrement of the invasion length of the lower saltwater wedge decreases with the increasing fresh water discharge. Compared with the groundwater, the surface water has a more significant inhibition effect on seawater intrusion in coastal reservoirs. When the discharge of inland fresh water increases, the salinity decreases at the bottom of coastal reservoirs, and the upper saltwater wedge decreases and disappears earlier than the lower saltwater wedge. Reduction of groundwater exploiting and application of water transfer into the reservoir can suppress saltwater intrusion and relieve watersalinization.

Key words: coastal reservoir; seawater intrusion; groundwater; surface water; platetracing; salt transport

我国水资源短缺问题日益严重,尤其在沿海经济发达地区。河网调蓄作为水资源开发利用的主要方式,虽然在一定程度上利用了水资源,但存在调蓄时间短、可调蓄水量有限等缺点,淡水资源危机仍然很严重^[1]。伴随内陆淡水资源匮乏,向海洋要资源和空间逐渐出现,海水淡化是主要的方式,但技术限制导致淡水资源供应保证率较低^[2],由此海岸水库应运而生。

海岸水库是指建立在河口或海岸,用于存储河流入海的淡水资源、调控水量的综合水利工程^[3]。因具有占有土地少,可充分利用滩涂资源,利用海洋

空间以获取较大水库库容等优势,海岸水库在缓解水资源匮乏上发挥着重要作用^[4]。目前,国内外已有海岸水库投入使用,如中国的北塘水库^[5]、韩国的新万金工程^[6]等。然而海岸水库在运行过程中出现了水库水体盐分过高的问题,这严重影响了海岸水库经济效益的发挥^[7]。在海岸水库的运行过程中如何控制水质并减少咸化现象的发生成为亟待解决的问题。

近年来国内外学者对海岸水库展开了一定的研究。海岸水库的外部边界包括水库水面、侧岸、周围滩涂、入库地表水、底部边界以及防渗墙^[8]。海岸

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51479069)

作者简介:陈鹤翔(1997—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:hexiang_chen@163.com

通信作者:金光球(1979—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:jingq@hhu.edu.cn

水库外部的海水入侵以及内部的底泥、深潭中的盐分释放是导致水库咸化的主要原因^[9-12]。有研究^[13]表明,地表淡水径流的涌入一方面会导致水库蓄水期表层水体盐度急剧下降,另一方面会提高库水的水头,从而抑制海水入侵;地下水的过度开采会导致地下水位降低,从而导致地下水相对于海水的水头降低,引发海水入侵^[14]。Van Pham 等^[15]对越南南定沿海含水层进行了研究,发现地下水开采是导致地下水位下降和海水入侵的关键因素。孙波等^[16]研究表明,三峡工程枯水期下泄流量增加有利于缓解青草沙水库的盐水入侵。然而这些研究对于地下水、地表水影响海岸水库海水入侵的具体过程和程度尚不清楚。因此,本文开展了室内物理模型试验,考虑了潮汐、陆源地下水及入库地表水的作用,探究了陆源淡水流量对海岸水库海水入侵的影响。

1 试验设计

1.1 试验装置

采用自主研发的一套海岸水库海水入侵的室内模拟装置^[17],该装置已成功模拟了海岸水库的海水入侵、库水咸化以及脱盐的过程^[18-19]。本文旨在对陆源淡水流量对海岸水库海水入侵的过程进行探究,并不针对具体的工程。因此将试验模型进行概化处理,水库尺寸及潮汐振幅和周期的设定参考 Kuan 等^[20]的室内物理模型研究。试验在长 3.5 m、高 0.75 m、宽 0.02 m 的平板水槽中进行(图 1),水槽采用钢化玻璃壁面,从而使试验过程可视。以石英砂作为多孔介质,泥沙区的长度和高度分别为 3.4 m 和 0.7 m,泥沙区底坡的长度和高度分别为 0.4 m 和 0.34 m,坡度为 0.324,防渗墙插入泥沙的深度为 0.04 m。石英砂分布均匀,中值粒径 $d_{50} = 0.24\text{ mm}$,累计粒度分布百分数达到 90%、10% 时对应的粒径的比值 $d_{90}/d_{10} = 2.86$,通过常水头渗透试验测得砂的渗透系数为 $5.0 \times 10^{-3}\text{ m/s}$,通过测量砂的表观密度和堆积密度推算出孔隙率为 0.46。采

用 NaCl 和食用色素 FD&C red 40 示踪剂模拟海水,参考海水的密度及电导率,按照每 33.4 g NaCl 对应 1.6 g FD&C red 40 的比例配制质量浓度为 35 g/L 的海水。试验装置主要用于研究垂直海岸线方向的流动和溶质运移过程,不考虑沿海岸线方向的流动,可将系统简化为二维模型。

如图 1 所示,水槽左侧(内陆方向)为淡水输入控制装置,包括淡水箱、流量计、潜水泵、溢流桶 4 部分。淡水箱通过软管连接流量计装置控制淡水输入,连接淡水区模拟陆源地下淡水输入或直接通入海岸水库模拟入库地表淡水输入。试验过程中可控制和调整固定流量的淡水输入,用以模拟季节性流量对海水入侵的影响。

水槽右侧(海向边界)设置 100 L 的盐水箱作为模拟海水水源,盐水箱通过软管与盐水区连接,并通过潮汐生成器传动装置循环交换补充到盐水区,模拟海洋边界条件。潮汐生成器通过变高度溢流柱产生周期性水位,形成潮汐^[21]。潜水泵将盐水箱中的盐水抽入盐水区,构成循环系统,保证盐水区区内上下区域质量浓度基本一致,避免海水盐度过度分层问题。

充气式可移动挡水堤坝用以模拟海岸水库及海岸水库防渗墙^[22]。试验过程中主要通过实时 24 h 不间断拍照,记录 NaCl 和食用色素 FD&C red 40 示踪剂的运移来模拟整个盐水入侵及污染物云团的运移过程。

1.2 工况设置

影响海岸水库海水入侵的陆源淡水主要为地下水和入库地表水,分别探究不同流量的地下水与入库地表水的影响规律,分析相同流量的地下水与地表水产生影响的不同之处。试验的流量设定参考了 Kuan 等^[23]的研究,试验工况设置见表 1,其中工况 1~4 用于研究陆源地下水流量对海岸水库海水入侵的影响,工况 5~8 用于研究入库地表水流量对海岸水库海水入侵的影响。

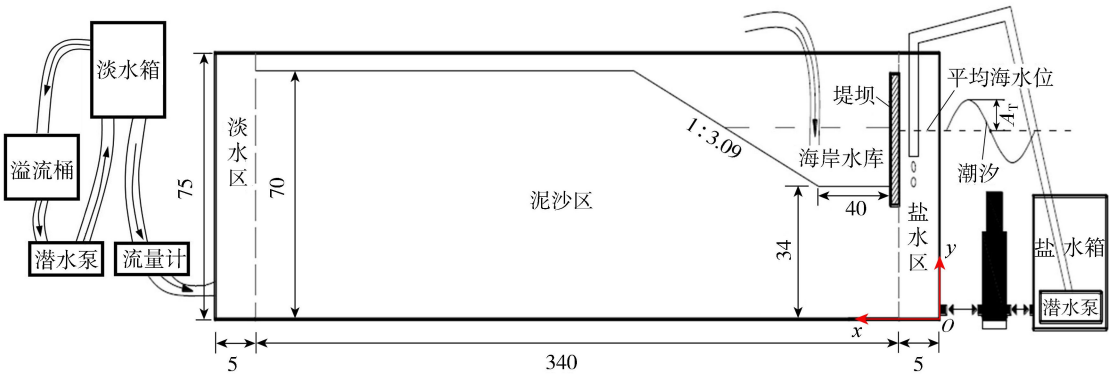


图 1 平板水槽系统布置示意图(单位:cm)

表 1 试验工况

工况	陆源 地下水流量/ (mL·min ⁻¹)	入库地表水 流量/ (mL·min ⁻¹)	平均海 水位/cm	潮汐 振幅/cm	周期/s
1	4	0	42.4	6.8	60
2	8	0	42.4	6.8	60
3	12	0	42.4	6.8	60
4	16	0	42.4	6.8	60
5	0	4	42.4	6.8	60
6	0	8	42.4	6.8	60
7	0	12	42.4	6.8	60
8	0	16	42.4	6.8	60

2 结果与分析

2.1 海岸水库对海水入侵的影响

海岸水库的建设对海岸带区域的生态环境保护和地下水资源修复有一定的影响。选取一典型工况(工况3),与Kuan等^[20]试验结果进行对比,分析有无堤坝条件下海水入侵情况。当盐水楔在12 h内不再发生变化时,认为系统达到稳定状态,图2为工况3的最终稳定状态。

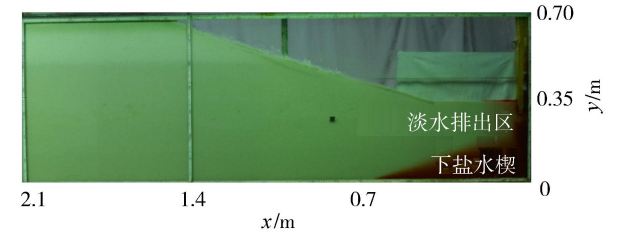


图2 堤坝条件下最终稳定状态

Kuan等^[20]试验在无堤坝条件下,最终稳定状态时,下盐水楔入侵长度较长,整个海岸带斜坡区域均受到海水入侵的影响,上部形成了椭圆状的上高盐度区,下部形成了下盐水楔以及处在二者之间的淡水排出区。上高盐度区产生原因是海水水位的波动引起了地下水位的波动,导致地下水在水位波动区域循环流动,在此非饱和区存在毛细管力作用,使

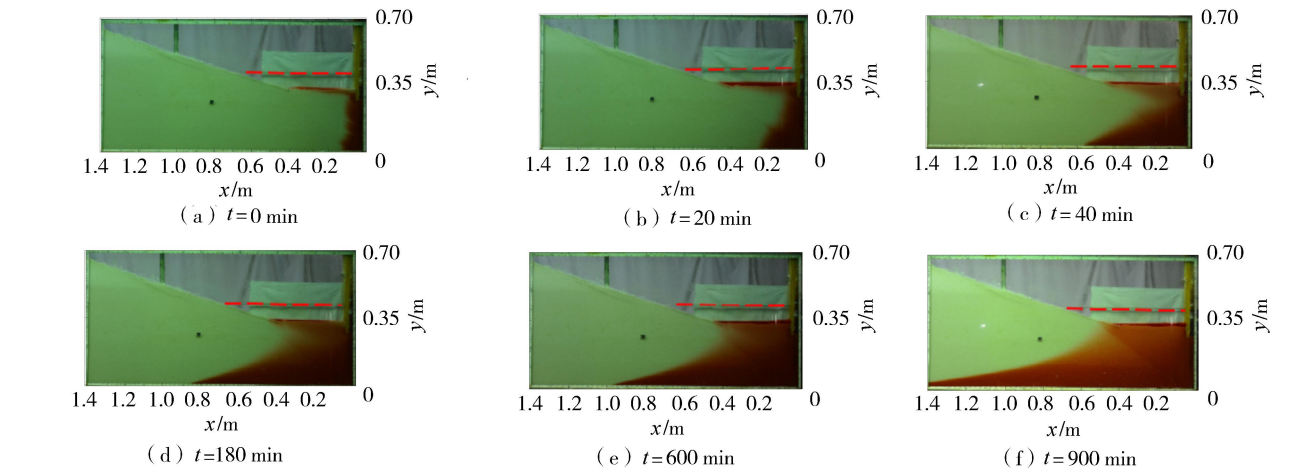


图3 工况1 海岸水库海水入侵的过程

部分海水在此区域滞存,形成上高盐度区,最终达到稳定^[24-25]。

从图2可见,建有堤坝后,最终稳定状态时,下盐水楔的入侵长度和高度分别为67.2 cm和18.8 cm,海岸水库的海水入侵得到了较好的控制,淡水与海水之间的交换被控制在防渗墙底部的含水层区域。此外由于防渗墙及海岸水库的存在,地下水水位不会随海平面发生强烈波动,因此,海岸区域的海水入侵受到抑制,并且无上高盐度区生成。

2.2 海岸水库海水入侵的过程

图3为工况1海岸水库海水入侵过程,图中虚线为水库蓄水水位。由图3可知,试验初始阶段,海水通过防渗墙底部及水库底部入渗,下盐水楔开始形成;入侵时间 $t=20\text{ min}$ 时,水库底部发生剧烈咸化,并且水库底部泥沙区在海水入侵及库底入渗咸化的双重作用下已有大面积咸化,形成上盐水楔; $t=180\text{ min}$ 时,海水入侵程度进一步加强,下盐水楔长度继续增长,水库底部的泥沙区整体已表现出明显的咸化,上盐水楔和下盐水楔逐渐连成一个整体,淡水排出区逐渐减小; $t=900\text{ min}$ 时,上盐水楔和下盐水楔两部分已连为一个整体,并在淡咸水交界区域呈现较强过渡带。

试验从开始入侵到稳定阶段持续了60 h,从0~60 h中每10 h选取一组共7组数据,记录其下盐水楔入侵长度,并将数据进行无量纲化(将入侵长度 L 除以防渗墙底部距水槽底部的距离 H ($H=0.3\text{ m}$),将入侵时间 t 除以潮汐周期 T),得到入侵长度与时间关系如图4所示。由图4可见,随着入侵时间的延长,下盐水楔长度一直在增加,但入侵速度逐渐变慢直至接近稳定值。此外,图3中下盐水楔高度始终保持33.4 cm,表明盐水在整个入侵过程中一直会影响到水库底部水体,造成水体持续咸化。

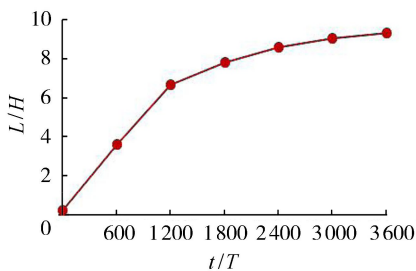


图4 工况1入侵长度-时间关系

2.3 陆源地下水流量与入库地表水流量对海岸水库海水入侵的影响

图5为地下水与地表水不同流量 Q 条件下海水入侵稳定状态对比,图中虚线为水库蓄水水位。

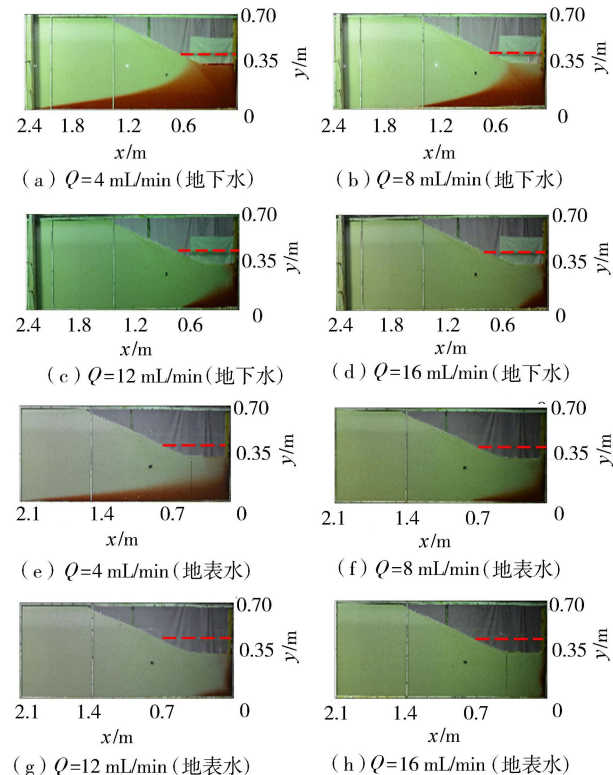


图5 地下水与地表水不同流量条件下海水入侵稳定状态对比

对比不同陆源地下水流量条件下的结果可知,流量为 4 mL/min 时,海水入侵程度明显,引发海岸水库底部大面积咸化,海水可从防渗墙底部渗入,海水入侵区域影响到整个地下含水层。流量由 4 mL/min 增大到 8 mL/min 时,海水入侵状态减弱,表现为库水盐分减少,地下淡、咸水交界区域逐渐明显,过渡带逐渐萎缩,上、下盐水楔逐渐分离;继续增大流量至 12 mL/min 时,此趋势进一步加强,上、下盐水楔区域逐渐减小;流量为 16 mL/min 时,上盐水楔基本消失,已无法影响到海岸水库内水体。但是,海水在潮汐振荡作用下,通过防渗墙底部渗入海岸水库的现象始终存在,这将持续影响库体盐度。

对比不同入库地表水流量条件下的结果可知,

入侵区域主要在防渗墙底部,有盐水楔形成。入库流量为 4 mL/min 时,存在水库库底咸化现象,形成下盐水楔,库底泥沙区域受到明显的海水入侵影响。随入库地表水流量增大,水库库底咸化逐渐消失,上盐水楔减小、消失,下盐水楔入侵长度及入侵高度逐渐减小。

将相同流量地下水及地表水的结果进行对比,发现地表水条件下的海水入侵程度更弱。与地下水相比,地表水条件下盐水楔的入侵长度平均减少 41.6 cm ;在地下水条件下库体普遍存在咸化现象,上盐水楔现象明显,而地表水条件下仅在流量为 4 mL/min 条件下有少量的库底咸化现象。图5的结果可解释枯水期海水入侵严重及海岸水库剧烈咸化的原因,与实际情况类似^[26-27]。因此,减少地下水开采或采取调水入库能较好地减弱海水入侵,有效防止海岸水库水体咸化。

为进一步量化海水入侵与流量的关系,将结果作无量纲化处理,得到入侵长度-流量关系如图6所示,其中 $Q_{\max}$ 为设计的最大流量, $Q_{\max} = 16\text{ mL/min}$ 。考虑到当流量趋近于0时,入侵长度必定趋近于正无穷,因此采用对数函数对入侵长度-流量关系进行拟合。由图6可见,对数函数的拟合效果较好;随着流量的增大,入侵长度的减少逐渐变缓。因此在实际工程中,对于枯水期水库水位较低的情况,适当采取调水入库的措施会减弱海水入侵。

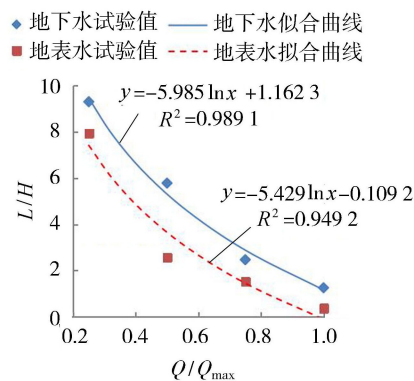


图6 入侵长度-流量关系

3 海岸水库与海岸带的室内物理模型讨论

海岸水库的研究是在海岸带基础上,在室内物理模型的设定和研究方面,海岸水库与海岸带既有联系也有不同。国内外关于海岸带的室内物理模型研究,一般选取玻璃珠、均质泥沙、石英砂等作为含水层填充介质置入水槽来模拟海岸带的均质土壤,模拟海水一般用 NaCl 和颜色示踪剂配制。最初,Rumer等^[28]设计了室内物理模型并得出了海水入侵的移动速率,但是模型中将淡水流量设置为0。

在此基础上,Mualem 等^[29]在模型中采用了固定水头作为淡水一侧的边界条件,但是海水一侧仍未考虑潮汐作用。Zhang 等^[30-31]在对沿海含水层中的污染物迁移进行研究时,采用的物理模型不仅采用了固定水头作为淡水侧边界条件,还在海水一侧考虑了潮汐,用潮波生成器产生周期变化的海水位,将潮汐简化为线性变化。此后,Kuan 等^[20,23]对物理模型继续改进,一方面在海水一侧通过变高度溢流柱产生了正弦潮汐,另一方面在淡水侧使用了固定流量代替固定水头,以避免潮汐引起的水位过高对淡水流量的影响。

海岸水库的室内物理模型设定与海岸带的不同在于:需要在含水层上方设置水库并蓄水,形成地下水-库水-海水水体之间互相作用与交换的复杂水动力条件。这个不同点会进一步引起以下物理现象:①防渗墙的存在阻断了部分海水与含水层的接触;②淡水排出区域发生后移,由于密度流的作用,地下水会通过防渗墙底部区域排出,并且位于下盐水楔之上;③海水越过防渗墙底部进行入侵,导致水库水体发生咸化。目前关于海岸水库的室内物理模型研究较少。金光球等^[17]设计了一套完整的室内物理模型并研究了海岸水库的海水入侵情况,边界条件采用了固定淡水流量和正弦潮汐。在此基础上,李梦迪^[18]通过改变地下水流量探究了陆源地下水对海岸水库脱盐的影响,莫玉铭^[19]通过在水库底部加入深潭探究了深潭对海岸水库海水水体咸化的影响。目前关于海岸带以及海岸水库的研究仍然是个热点。在未来的研究中,需要将室内物理模型从二维拓展到三维;需要从野外尺度上进行深入研究;此外,可采用数值模拟进一步探究其水动力及盐分运移的过程和机理。

4 结 论

- a. 海岸水库下盐水楔入侵长度与陆源淡水流量呈对数关系,随着陆源地下水流量、入库地表水流量的增加,海水入侵程度减弱,且流量越大,下盐水楔入侵长度减弱的趋势越平缓。
- b. 与陆源地下水相比,入库地表水条件下的下盐水楔入侵长度更小,海水入侵程度更弱,表明入库地表水对海岸水库海水入侵具有更显著的抑制作用。
- c. 陆源淡水流量的增大会使海岸水库库底盐分减少。流量增大过程中,上、下盐水楔分离,上盐水楔比下盐水楔先减小、消失,上盐水楔消失后,已无法影响到海岸水库内水体,然而海水在潮汐振荡作用下,会通过防渗墙底部渗入海岸水库。
- d. 可通过减少地下水的开采或采取调水入库

的手段抑制海岸水库海水入侵,缓解水库水体的咸化。

参考文献:

[1] 葛小平,王船海,王卫平,等. 沿海围垦区蓄淡工程优化布局[J]. 水利经济,2012,30(3):51-53. (GE Xiaoping, WANG Chuanhai, WANG Weiping, et al. Layout optimization of freshwater-storage projects in coastal reclamation areas[J]. Journal of Economics of Water Resources,2012,30(3):51-53. (in Chinese))

[2] 刘树模,李爱斌,叶亮. 我国大型海水淡化供水工程技术经济分析[J]. 科技创新导报,2015,12(16):56-61. (LIU Shumo, LI Aibin, YE Liang. The engineering economy analysis of large-scale seawater desalination water supply project in China [J]. Science and Technology Innovation Herald,2015,12(16):56-61. (in Chinese))

[3] 林鹏智,龚泽林. 中国河口海岸水库发展现状与展望[J]. 人民长江,2019,50(7):1-8. (LIN Pengzhi, GONG Zelin. Development review and prospects of coastal reservoirs in China[J]. Yangtze River,2019,50(7):1-8. (in Chinese))

[4] 王文,张鹭,杨云. 沿海地区常规水资源开发利用方法与策略[J]. 水利经济,2014,32(4):35-38. (WANG Wen, ZHANG Lu, YANG Yun. Methods and strategies for development of conventional water resources in coastal regions[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014,32(4):35-38. (in Chinese))

[5] 吴光红,李金中,李学菊. 天津滨海地区城市供水调节水库水质咸化原因与改善途径[J]. 水资源保护,2010,26(1):29-31. (WU Guanghong, LI Jinzhong, LI Xueju. Cause and prevention countermeasures of water salinization of city water supply reservoir in the coastal region of Tianjin[J]. Water Resources Protection,2010,26(1):29-31. (in Chinese))

[6] 卢勇. 韩国新万金填海工程及其对黄河造陆规划的启发[J]. 东北亚论坛,2010,19(4):98-104. (LU Yong. Research on Korea ' s Saemangeum project and its enlightenment to land-making of Yellow River Delta[J]. Northeast Asia Forum, 2010, 19 (4): 98-104. (in Chinese))

[7] 高增文,李宇浩,秦志新,等. 水位变化条件下海湾水库盐分达标探讨[J]. 水科学进展,2017,28(5):763-769. (GAO Zengwen, LI Yuhao, QIN Zhixin, et al. Salinity of water in an estuarine reservoir under water level decrease[J]. Advances in Water Science,2017,28(5):763-769. (in Chinese))

[8] JIN G, MO Y, LI M, et al. Desalinization and salinization: a review of major challenges for coastal reservoirs[J]. Journal of Coastal Research,2019,35(3):

- [9] 钟启明,陈建生,陈亮. 滨海地区海水入侵的一种测定方法[J]. 水利水电科技进展,2007,24(1):50-52. (ZHONG Qiming, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Method for measurement of seawater intrusion in coastal areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,24(1):50-52. (in Chinese))
- [10] 车友明,胡海星,文磊. 海水入侵区域咸化土壤对上层水质影响的室内试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(增刊2):17-18. (CHE Youming, HU Haixing, WEN Lei. Laboratory experiment on the effect of saline soil on upper water quality in seawater intrusion zones [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(Sup2):17-18. (in Chinese))
- [11] 林若兰,卓文珊,曾珂,等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响[J]. 水资源保护,2020,36(1):66-75. (LIN Ruolan,ZHUO Wenshan,ZENG Ke,et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in East four portals of Pearl River [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):66-75. (in Chinese))
- [12] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 钱塘江河口盐水入侵影响因素及数值预报[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):13-19. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Factors and numerical forecast of saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(6):13-19. (in Chinese))
- [13] MAO X Z, CHEN F Y, YU Q W, et al. Numerical prediction of water desalinization in a polder reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(7),79-84.
- [14] ZHANG Q, VOLKER R E, LOCKINGTON D A, et al. Numerical investigation of seawater intrusion at Gooburrum, Bundaberg, Queensland, Australia [J]. Hydrogeology Journal,2004,12(6):674-687.
- [15] VAN PHAM H, LEE S. Assessment of seawater intrusion potential from sea-level rise and groundwater extraction in a coastal aquifer[J]. Desalination and Water Treatment, 2015,53(9):2324-2338.
- [16] 孙波,刘曙光,顾杰,等. 三峡与南水北调工程对长江口水源地的影响[J]. 人民长江,2008(16):4-7. (SUN Bo, LIU Shuguang, GU Jie, et al. Numerical study on impact of water regulation of TGP and South-to-North Water Diversion Project on water source area of the Yangtze Estuary[J]. Yangtze River,2008(16):4-7. (in Chinese))
- [17] 金光球,谢天云,KUAN W K,等. 潮汐作用下盐水入侵的实验:平板示踪装置系统及操作方法[J]. 实验室研究与探索,2015,34(2):57-61. (JIN Guangqiu, XIE Tianyun, KUAN W K, et al. Effects of tide on salt intrusion: experimental setup and methods[J]. Research and Exploration in Laboratory,2015,34(2):57-61. (in Chinese))
- [18] 李梦迪. 陆源地下水对海岸水库库底脱盐过程的影响[D]. 南京:河海大学,2016.
- [19] 莫玉铭. 深潭对海岸水库水体咸化的影响[D]. 南京:河海大学,2018.
- [20] KUAN W K, JIN G Q, XIN P, et al. Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers [J]. Water Resources Research,2012,48(2):W02502.
- [21] 金光球,关伟强,沈城吉,等. 一种室内潮波生成器及其使用方法;2014105358658[P]. 2016-08-31.
- [22] 金光球,谢天云,唐洪武,等. 一种室内模拟海岸水库堤坝的充气式挡水装置的使用方法;2014100737395[P]. 2015-12-30.
- [23] KUAN W K, XIN P, JIN G, et al. Combined effect of tides and varying inland groundwater input on flow and salinity distribution in unconfined coastal aquifers [J]. Water Resources Research,2019,55(11):8864-8880.
- [24] NIELSEN P. Tidal dynamics of the water table in beaches [J]. Water Resources Research, 1990,26(9):2127-2134.
- [25] ROBINSON C, GIBBES B, LI L. Driving mechanisms for groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(3):L03402.
- [26] 陈泾. 青草沙水库流场、滞留时间及盐水入侵来源[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [27] 侯成程. 长江潮流界和潮区界以及河口盐水入侵对径流变化响应的数值研究[D]. 上海:华东师范大学,2013.
- [28] RUMER R R, HARLEMAN D R. Intruded salt-water wedge in porous media [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1963,89(6):193-220.
- [29] MUALEM Y, BEAR J. The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer[J]. Water Resources Research,1974,10(6):1207-1215.
- [30] ZHANG Q, VOLKER R E, LOCKINGTON D A, et al. Influence of seaward boundary condition on contaminant transport in unconfined coastal aquifers [J]. Journal of Contaminant Hydrology,2001,49(3):201-215.
- [31] ZHANG Q, VOLKER R E, LOCKINGTON D A, et al. Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater [J]. Advances in Environmental Research,2002,6(3):229-237.

(收稿日期:2020-07-11 编辑:骆超)