

我国海洋水库建设研究与思考

王越¹, 孙永福^{1,2}, 杨树清³, 宋玉鹏^{1,2}, 王柯萌¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室 青岛 266237;
3. 伍伦贡大学土木、采矿与环境工程学院 伍伦贡 2522)

摘要:随着我国经济与人口重心向沿海地区的快速转移,水资源成为制约沿海地区经济发展的重要因素。为解决日益紧迫的淡水问题,我国采取包括海洋水库在内的诸多措施。文章简述海洋水库的概念与分类,回顾海洋水库的修建历程,并对海洋水库修建的关键性问题进行探讨。研究结果表明:综合对比地下水开采、内陆水库、海水淡化、污水回用、跨流域调水和海洋水库等水资源管理方式,加之考虑沿海地区水资源的分布特征,海洋水库在沿海地区具有良好的技术可行性、环境持续性以及明显的社会效益;海洋水库的建设有利于沿海水资源的充分利用,是解决沿海地区淡水危机的重要措施和实现“陆海统筹”的关键技术,有利于“山顶到海洋”全过程的监控、管理和开发;结合海洋水库的修建现状和发展趋势,提出海洋水库建设的思考与建议。

关键词:海洋水库;淡水资源;水资源管理;水利工程;陆海统筹

中图分类号:TV62;P748 文献标志码:A 文章编号:1005-9857(2019)12-0038-09

Research on Construction of Marine Reservoir in China

WANG Yue¹, SUN Yongfu^{1,2}, YANG Shuqing³, SONG Yupeng^{1,2}, WANG Kemeng¹

(1. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;
2. Marine Geology and Environment Laboratory Process, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong 2522, Australia)

Abstract: Water resource becomes an important factor restricting the economic development with the rapid transfer of economy and population center to coastal areas. The government and related departments had put forward many solutions, including marine reservoirs to solve the shortage of fresh water. This paper briefly described the concept and classification of marine reservoir, reviewed the construction process, and discussed the key problems of reservoir construction. Comprehensive comparison of groundwater exploitation, inland reservoir, water desalination, wastewater recycling, inter-basin water transfer, and marine reservoir, combined with the coastal water resources distribution characteristics, discovered marine reservoir had good technical feasibility, environmental sustainability and obvious social and economic benefits. The construction of

marine reservoir was conducive to the utilization of coastal water resources, and solve the coastal water crisis. It is also a key technology to realize and the monitoring, management and development of the whole process of “mountaintop to ocean”. In the end, this paper put forward some suggestions based on the current situation and developing trend of marine reservoir construction.

Key words: Marine reservoir, Freshwater resources, Water resources management, Hydraulic engineering, Land-sea coordination

0 引言

水资源是世界上最重要自然资源之一,充足的淡水资源不仅为社会发展提供物质基础,而且为人类文明提供精神支持^[1]。随着社会的快速发展,清洁水资源的供应压力与日俱增:联合国环境规划署(UNEP)指出 2025 年将有 2/3 的世界人口面临缺水的问题^[2];美国国家工程学院将清洁水源的获取列为 21 世纪最大的挑战之一^[3];联合国《2018 年世界水资源开发报告》显示全球水资源的需求正以每年 1% 的速度快速增长,且增长速度在未来 20 年呈递增趋势^[4]。水危机在当代不仅是社会问题,更是经济问题,甚至成为制约未来经济发展的重要因素。

由于巨大的人口和工农业生产压力,沿海地区淡水资源紧张的问题更为突出。我国近海海洋综合调查与评价专项(908 专项)显示,我国 11 个沿海省(自治区、直辖市)所辖 52 个沿海城市有 90% 存在不同程度的缺水问题^[5]。目前沿海地区的水资源供应已不能满足需求,探索新的水资源供应方式刻不容缓,其中建设海洋水库(coastal reservoirs)是解决沿海淡水危机的重要措施之一,也是陆海统筹的时代要求。本研究就沿海水资源的特殊性、海洋水库的建设历史以及建设的关键问题,对沿海地区建设海洋水库进行分析论证。

1 沿海水资源的特征

我国降水存在严重的区域差异,绝大部分降水集中在沿海地区,其中近 2/3 的降水汇入海洋,仅有 1/6 的降水得到有效利用^[6]。因此,沿海地区虽然降雨量大、径流总量大和淡水资源丰富,但径流的季节性差异导致水资源无法被充分利用:雨季降雨量大,且水质较好,但蓄水能力不足,往往引发洪涝灾害,大量淡水在洪期汇入海洋;而旱季径流较小,

且水质较差,无法满足正常的生产和生活需求。同时,沿海地区位于流域汇水的末端,受上游污染的影响,水质较差,该问题在中小型河流中更加突出。

此外,沿海地区的地理位置特殊,受海洋潮汐作用的影响,地表水资源与地下水资源往往淡咸交错,易受海水入侵的影响。地貌通常为河口三角洲平原或海积平原,地势较为低平,地表蓄水能力差,不易建造大型平原蓄水水库,但存在海湾和潟湖等天然蓄水地貌。

2 水资源管理方式

数十年来,绝大部分的城市供水依靠河流、水库和地下水开采,但相对单一的水资源供应模式难以解决当前与未来的水资源紧缺问题。为保证清洁和安全供水,相关政府部门开展海水淡化、跨流域调水和废水回用等诸多尝试,有些成效显著,有些成效欠佳,但积累了宝贵的经验和教训。目前沿海地区的水资源供给方式多为内陆水库、地下水开采、海水淡化、废水回收、跨流域调水和海洋水库等。

2.1 地下水开采

地下水开采在我国水资源供应中占比很大,目前全球的地下水普遍处于过度开采的状态,且沿海地区的地下含水层与海洋相连,过度开采引发的海水倒灌会导致地下水资源被进一步污染,还可能引发地下漏斗、土壤盐渍化和地面沉降等诸多问题。目前沿海地区常建设拦蓄补源性工程和地下水库以治理海水入侵,但建设成本以及对水文地质条件的要求较高。

2.2 内陆水库

除地下水与河流供水外,内陆水库在数十年间发挥了不可替代的作用。与其他供水方式相比,内陆水库的选址须综合考虑地形、地质、水文、环境、人口和生态等方面,因此坝址难寻,土地利用成本也愈加高昂,且会占用耕地并导致一定数量的人口

迁移。此外,内陆水库存在决堤和泥石流等潜在灾害风险,水土流失和泥沙淤积会导致水库库容不断下降——全球内陆水库总库容每年减少 1.0%~1.5%^[7],未来 30 年内将丧失部分蓄水能力。与此同时,水库对径流的拦截使硅、氮和磷等营养元素留在水库中,不仅增加水华的发生频次,也对近海的生态环境和初级生产力产生难以预计的影响。

2.3 海水淡化

与其他供水方式相比,海水淡化不依赖于降水,其设施建于海岸,生产的淡水主要供应沿海地区。截至 2018 年,我国已建成海水淡化场 160 个,日产淡水总规模达 122.6 万 t^[8];2015 年海水淡化超过 220 万 m³/d,对沿海缺水地区新增工业供水量的贡献率超过 5%^[9]。目前最常用的海水淡化技术为反渗透和低温多效蒸馏,淡化成本为 5~8 元/m³,相对高昂。此外,淡化过程中的浓排水处理也具有很高的维护成本和生态成本^[10-11],浓排水会改变附近海域的盐度,对沿海生态系统的功能及其完整性造成难以估计的损害^[12-13]。高压泵和涡轮的噪声污染也会对周围环境产生影响^[14]。总体上看,海水淡化相对于海洋水库来说存在更高的生产成本、能耗损失和污染风险,且其淡水生产率远远不足以满足沿海地区的需求。

2.4 污水回用

污水回用是指城镇污水经处理后形成再生水,回用于工农业生产^[15]。再生水的利用也不依赖于

降水,还可减少污水排放和缓解城市排水管道负荷,具有明显的经济、社会和环境效益^[15]。目前我国再生水利用率可达 15%,规模达 3 885 万 m³/d,平均制水成本为 1.5~3.5 元/t。虽然再生水的制水成本不高,但由于再生水系统独立于市政管网之外,导致运输成本高昂,达 15~20 元/t^[15]。此外,再生水尚未享受税收优惠政策,仅靠财政补贴,对企业生产积极性和再生水水质有很大影响。

2.5 跨流域调水

跨流域调水在一定程度上可以缓解区域性水资源分布不均的问题,是沿海地区重要的供水方式之一,如美国加州调水工程以及我国“南水北调”工程和“引黄济青”工程等。但跨流域调水耗资巨大,须克服许多工程和技术上的难题,如引水沿途的污染问题以及工程建设带来的社会问题和生态问题等。我国“引黄济青”工程耗资 8 亿元,“南水北调”东线一期工程耗资 500 亿元,导致山东段引水水价是地表水的 5 倍以上^[5],且“南水北调”东线的穿黄隧道自建成至今投入使用较少,对社会资源造成极大浪费。总体来看,跨流域调水的水资源供应方案耗资巨大和影响范围广,应在没有替代水资源时才予以考虑。

2.6 水资源供应方式对比

在沿海城市建设海洋水库,在淡水资源的管理、供应范围以及对生态环境的影响等方面存在明显优势(表 1)。

表 1 水资源供应方式对比^[16]

项目	地下水	内陆水库	海水淡化	污水回用	跨流域调水	海洋水库
建设难度	—	高	低	低	高	较低
土地资源	—	占用面积较大	占用工业用地	占用工业用地	占用面积较大	—
年能源消耗/(kW·h)	—	—	4×10 ⁹	2×10 ⁹	—	—
潜在灾害	地面沉降、土壤碱化等	决堤、泥石流、泥沙淤积等	影响近岸生态结构	—	人为干预过多,对大范围生态结构影响较大	改变生态环境
污染方式	陆源污染	陆源污染	海水污染	—	陆源污染	陆源和海水污染
社会问题	—	移民	—	—	移民	—
维护成本	低	低	高	高	高	低
使用寿命/a	—	100	20	20	100	100
可持续性	可持续	可持续	区域性影响	可持续	区域性影响较大	可持续

由表 1 可以看出,综合考虑社会、环境、生态和经济等因素,海洋水库不占用土地资源,不易引发泥石流、滑坡和堰塞湖等潜在地质灾害,避免大规模人口迁移,并充分利用自然条件提供清洁安全的淡水,同时减小沿海地区雨季的洪涝灾害,将洪期优质的淡水资源存蓄入海,满足沿海地区日益扩大的水资源需求。

3 海洋水库

3.1 概念和类型

在过去数十年间,我国绝大部分蓄淡方式是建造蓄淡工程。蓄淡工程一般分为依江河而建的内陆水库和依海而建的海洋水库 2 种形式,其中海洋水库是指在沿海建造的储存淡水资源的蓄水工程^[6,16],包括建设于河口、滩涂和海湾等的蓄淡水水库,根据拦河坝、水质、地质和水源等方面的要求选择建库位置^[10]。

(1)河口海洋水库修建于河流入海口,在河口段建坝成库,通常建设在集水面积较小的流域,内蓄淡水、外避咸潮,如浙江胡陈港水库和象山大塘沽水库等。

(2)滩涂海洋水库也称海涂水库,在河口浅滩或潮滩修筑堤坝和围滩建库,属于避咸蓄淡水水库,根据筑坝地点分为河口浅滩海洋水库和潮滩海洋水库。典型的河口浅滩海洋水库包括上海宝钢水库、陈行水库和青草沙水库,其中青草沙水库建于长江河口江心,与一般的河口浅滩水库稍有差别,属于河口江心水库;典型的潮滩海洋水库有江苏如东东陵水库。

(3)海湾海洋水库要求集水面积较大,即在海湾建坝成库。早期著名的海洋水库工程如荷兰须德海工程、韩国新万金工程和香港船湾水库等均属于典型的海湾海洋水库。

除根据建设位置对海洋水库进行分类外,根据建设时间和蓄水方式可将海洋水库分为第一代海洋水库和第二代海洋水库^[3,16]:①第一代海洋水库直接建坝封堵河流入海成库,对入库水源不存在按需择优入海的理念,缺少水质管理和分类的基础设施,其水质往往极大地受水源的影响,艾瑟淡水湖、Sihwa 淡水湖和陈行水库等早期建设的海洋水库绝

大部分属于第一代海洋水库;②与第一代海洋水库不同,第二代海洋水库不直接封堵河口,而是通过建设相应的基础设施,实现河水等水源的按需择优入海,从源头控制水库水质,如上海青草沙水库。

3.2 建设历程

海洋水库的正常蓄水位略高于海平面,沿海淡水湖和潟湖可视为天然的海湾水库^[10]。早期的海洋水库建设主要依托于填海造陆工程,是填海造陆工程的附属品。最早的海洋水库依托于 1918 年荷兰建设的须德海工程,该工程建坝围海,于 1932 年形成艾瑟淡水湖,属典型的海湾海洋水库,水域面积达 $1\,240\text{ km}^2$ ^[10],水深 5~6 m,可供农业、渔业与生活用水^[17]。1965 年日本为解决水资源短缺问题,先后在利根川等河流修建河口和海湾海洋水库,不仅为城市生产提供充足的淡水资源,而且减少洪涝灾害的发生^[18]。20 世纪 80 年代韩国建设新万金工程^[19],通过围海造陆增加农业用地,并在汉城(首尔)附属建设 Sihwa 淡水湖,原计划为当地提供充足的生活和工农业用水,但蓄水时清污并蓄导致水质欠佳,原计划被迫修改,现成为世界最大的潮汐发电厂。新加坡缺少可供利用的淡水资源,但年降雨量巨大,为扩大集水面积和积蓄清洁雨水,于 2008 年建设滨海湾大坝围海成库,形成典型的海湾海洋水库,除满足新加坡 10% 的淡水资源需求外,还抵挡咸潮和海水入侵,保障湾内水质和居民生活。

我国最早的天然海洋水库可追溯至 6 000 年前的杭州西子湖,杭州西子湖曾与海域相连,后由于地质运动与泥沙淤积逐渐与海洋分离,被改造成可供利用的淡水湖泊^[20]。香港海洋水库的建设极大地降低其淡水资源的获取成本,不必依赖于海水淡化等昂贵的取水方式,保障经济高速发展:1968 年香港修建用于城市供水的船湾水库,其主体工程长 2 070 m、高 40 m,库容达 2.3 亿 m^3 ,使香港的蓄水能力增加 2 倍,是当时世界最大的达到饮用标准的淡水水库,也是世界第一座以城市供水为目的而建设的海洋水库;1978 年香港修建 2 条高达百米的大坝封闭海湾,修建万宜水库,库容达 2.73 亿 m^3 ,使香港的供水能力翻番,基本解决其迫在眉睫的淡水

危机^[18,21]。

20 世纪 80 年代我国沿海地区经济快速增长,为保障供水和饮水安全,我国在经济较发达的东南沿海地区兴建一批以防潮和灌溉为目的的海洋水库^[22],如浙江的四灶浦海涂水库、大塘沽水库和胡陈港水库,上海的宝钢水库和陈行水库,厦门的杏林湾水库等。除水库外,福建九龙江支流两溪,广东潮阳龟头、汕头、韩江三角洲和湛江等地区均修建大量的挡潮闸,以阻挡外潮和内蓄河水。虽然挡潮蓄淡工程可提供大量淡水资源,但该类工程严格意义上仅是海洋水库的初始阶段,即仅在出海口对径流进行拦截,多数未考虑与周边的间接汇水面积和配套开发,建设也较粗糙。2011 年上海为解决地区供水危机而修建青草沙水库,集水面积达 66.16 km²,坝长 48.4 km,有效库容达 4.38 亿 m³;青草沙水库的修建开辟上海地区新的供水源地,且综合考虑供水、排污和景观设计等功能,建立较完备的现代海洋水库系统,可为上海地区持续供水。

我国早期的海洋水库建设以河口水库和滩涂水库为主,水库建设的规划性和设计性较弱,且绝大部分未与区域内的淡水资源相联系和建设配套引水工程,而是仅解决小范围区域的淡水供应问题。新建的海洋水库(如上海青草沙水库)已初步形成集供水、排污、净化和休闲为一体的现代海洋水库。

3.3 主要功能

3.3.1 提供清洁淡水

海洋水库的主要功能是提供清洁淡水,满足当地和中下游的用水需求,缓解地下水和内陆水库等的供水压力。不同库址的海洋水库可为供水区域提供不同的水资源,以减少清洁和淡化压力,如位于长江口的陈行水库和宝钢水库可分别满足上海地区的生活和工业用水需求。

3.3.2 防洪减灾

除供水外,海洋水库的建造在一定程度上可起到防洪减灾、抵御咸潮和防止海水入侵的作用。与内陆水库相似,海洋水库可在雨季洪峰到达前排空库内蓄水,积蓄洪期淡水,在关键时刻发挥分洪减灾的作用,减少沿海地区的洪涝灾害。同时,水库

大坝可用做防潮堤,在一定程度上防止潮流侵袭以及风暴潮和地震海啸引起的灾害。作为沿海与海岸的隔离带,库内淡水还可抵御咸潮入侵和补充沿海地下水资源。

3.3.3 生态修复和环境保护

由于河口进入海洋的污染物占海洋污染物总量的 70%~80%,利用海洋水库净化入海淡水是海洋环境“源头治理”的有效手段,对于渤海湾和深圳湾等污染重灾区的生态环境修复具有重要意义。同时,水库的附属设施建设(如湿地等)可在处理城市污水和径流污染的同时,营造城市景观,建设城市生态文明。海洋水库的建设也可调节入海水量,以调研和计算为基础,在控制优质淡水入海的同时,可允许上游适量拦坝提水。

4 海洋水库建设的关键性问题

4.1 选址建堤

海洋水库的主要功能是为工农业生产和居民生活提供优质的淡水资源,汛期洪水入海,枯季淡水沿河道上提,向河道输入清洁淡水^[23]。主体大坝可依据水源水质、区域地形地貌、开发活动和设计要求等选择建筑材料,一般为混凝土坝和土坝等固体大坝,且拦河坝排列方式与内陆水库相同^[24]。目前我国绝大部分海洋水库由拦河坝在河口形成,积蓄洪期径流^[25]。

我国早期的海洋水库绝大部分使用固体大坝等硬结构建造,建造成本高昂,主体坝位于海水之中,其设计长度和库容与海底形态和地质等因素有关。青草沙水库等新一代海洋水库就地取材,采用土工布沙袋的方式建设水库大堤,具有建设成本小和速度快等优点;坝高须考虑潮汐波高等因素,以防止潮流与咸水入侵;由于海洋水库压差较低,建设过程不必过分考虑渗流问题^[25]。此外,我国早期的海洋水库约有 50%为滩涂水库,与河口和海湾水库相比建筑物较简单,由坝体、抽水站和放水闸组成,技术难度较低;坝体常为大断面均质土坝,迎水坡设干砌石护坡,抽水站按设计水量装机,防水闸为涵洞式,用于供水河网和水库泄空^[26]。

河口和海湾水库一般建设防波堤围海建库,如韩国新万金工程相继修建 4 条防波堤,汇锦江、万倾

江和东津江三江淡水存储入库^[19],故库址要求满足一定的集水面积,且雨季有大量的淡水汇入或有持续稳定的径流输入。

硬结构的不透水性导致水库无法进行适当的水交换,且水库径流挟污和海水倒灌等问题难以解决,因此可通过软坝和两级屏障实现径流分配和污水分离^[6]:主屏障采用固体大坝,高于潮汐和波浪高度,以防止海水入侵;次屏障采用软坝分离海水,通过设置缓冲区,区分污水和清洁淡水^[10],既防止海水污染水库淡水,又避免陆地径流污染海水,从而储存高质量的淡水资源。

相较于传统海洋水库,适当采用橡胶软坝等软结构不仅可降低水库建设成本和提供更加灵活的设计方案,而且可进一步选择水源、提升水质、降低水库运营成本及其潜在的生态影响。如使用软坝可预留鱼类的季节性洄游通道,减少人工设施对海洋生态的影响^[25]。

4.2 淡化排咸

水库建成蓄水后,水质咸化会限制水库的功能和淡水资源的有效利用。水体咸化与降雨量、蒸发量、盐淡水掺混率、闸坝泄漏、海水渗透入侵、滩地返咸和底泥盐分释放等因素有关^[27-28],如大塘沽水库在 1979 年和 1986 年旱季因底泥处理和海水未彻底抽排而两度返咸,河口海洋水库和海湾海洋水库的水体盐度常因蒸发量和降雨量呈现季节性变化。

已有学者对水库的返咸机理和淡化过程进行研究。Rimmer^[29]、高增文等^[30-31]和张效龙等^[32]先后利用室内土柱和水槽实验研究底泥释放盐分的机理;毛献忠等^[33]利用 Delft 3D 研究漩门二期海洋水库在流域径流下的自然淡化过程;余堃^[34]对水库内盐分的变化趋势进行预测;French 等^[35]采用数值模拟的方法研究底泥盐分释放对海洋水库盐度变化的过程。根据观测数据与模拟结果,河口海洋水库与海湾海洋水库至少需要 10 年的自然淡化才可达到工农业和生活用水的标准^[36],滩涂海洋水库需 15 年的自然淡化才可正常运行,在此期间水库蓄水只适宜养殖、灌溉或工业用水,不可供生活用水^[37]。

除自然淡化外,相应的工程措施可加快海洋水库的淡化排咸过程。在建库前与建库初期,对库内

滩地与库周滩地采取先旱作后水作、种植利于脱盐的草类和增加排咸沟等措施,可加速脱盐过程^[34]。对库内深层盐水的机械抽排可缓解旱季返咸现象。徐永岗等^[38]证明采用水泵抽取水库底部的高浓度咸水可加速水库淡化;王高正等^[39]进一步证明采用小流量机组抽排水库底部的高浓度海水具有更好的工程效益,如大塘沽水库采取深层小流量机械抽排的效果显著;除使用群泵抽吸深水潭高浓度盐水外,相关实验证明在蓄水前开挖排咸沟并结合抽排措施,可较好地抑制海洋水库咸化^[40];此外,可设置低空出流,以优先排出底层高浓度盐水的方式解决库内深层盐水的问题^[16]。然而目前对排咸沟的研究较少,相关研究主要集中在高盐海水的机械抽排。

4.3 分流去污

海洋水库常建设在河口或河口外侧毗邻海域的区域,以便最大限度地汇集径流,若径流未经处理和选择地排放入库,径流中的污染物也将最大限度地汇入水库,故径流水质直接决定水库水质。在径流污染率较高的情况下,若不解决非点源污染的问题,水库水质将受到极大的影响,以至于无法达到使用标准。韩国的 Sihwa 淡水湖正是由于清污并蓄,被迫放弃水库的原有功能^[25]。

干旱期后的初期暴雨一般会携带较多污染物,但雨季是海洋水库清洁淡水的主要来源,故径流的水质存在时间差异,其中 7—10 月径流水质较好,属优质淡水资源^[16]。区分径流水质和按需入库是水库建设的难点所在,目前可通过闸门选择径流的入库时间,也可建造相应附属设施以防止劣质水源入海或初步净化后入海。人工湿地的建设可净化径流水质,将人工湿地与海洋水库并行建设以净化径流水质是近年来海洋水库建设的尝试之一,如上海青草沙水库在设计时考虑径流污水的处理和排放,拟建设城市湿地对生活废水和径流污水进行处理。分流/保护/减灾(SPP)策略的目的是根据水质,将水源在时间与空间上分离,通过不同水闸将清洁淡水汇入水库,污染源通过旁路排放于排污渠处理,以免发生外部污染^[16]。目前河口海洋水库和滩涂海洋水库的建设均综合考虑区域供水,加大集水面积,建设水库排污的配套设施。

除污染外,水体富营养化是库内水质恶化的重要原因,径流污染也会加剧水体富营养化的程度。因此,除治理污染外,控制水体在库内停留的时间是治理富营养化的有效途径。张宏伟等^[41]提出通过优化闸门调度,控制库内水体停滞时间,如上游涨潮引水和落潮挡水,下游涨潮挡水和落潮开闸排水,以提高水体运行效率,防止藻类大量滋生影响水质。

5 对海洋水库建设的思考

5.1 系统权衡

沿海海域一般具有水产、港口、潮汐和滩涂等优势海洋资源,不同海洋资源的开发互相叠置、互相牵制,存在较强的功能冲突。海洋水库的建设不仅要利用部分海洋空间资源,而且可能牺牲滩涂养殖和港口开发等活动。海洋资源之间若不能得到及时有效的协调,不仅影响近海资源的开发利用,而且会对近海生态环境和资源造成难以挽回的损失,对水库建设和区域经济发展产生影响。因此,在进行海洋水库建设评估时,不应完全从地质地貌方面评估,更应从综合开发近海资源的角度考虑,将海洋水库建设列入近海综合开发规划,考虑其长远的经济效益和社会效益。此外,依据当地的地质地貌条件选择合适的海洋水库类型,并与周边基础设施进行配套设计。

5.2 综合设计

海洋水库在设计时应在当地水资源管理系统下对取、蓄、供、用、排进行全过程的统筹管理。取水环节综合利用各类水资源供应方式,实现各种水资源的联合利用。将土地规划和产业结构调整与水库开发相结合,污水处理厂等基础设施建设须综合考虑水库防污工程,提高防污标准和污水治理力度^[41]。蓄水环节应预咸与排污兼顾,将水资源与防洪工程和防污工程相结合,同时完善水质管理系统和水质标准体系,检测水源水质,设计排水方案,对不同水质的水资源做到分区蓄水。将海洋水库建设与生态用地规划和区域经济发展规划等相结合,满足水面率和生态用地的要求,进行总体优化,最大限度地节约投资和土地资源。

5.3 协同开发

建设海洋水库并不意味着传统的蓄水模式和

水资源管理方式失去价值,海洋水库不可能完全替代内陆水库、海水淡化和污水处理等淡水资源获取方式,而是对现有蓄水方式的补充,在一定程度上可缓解沿海地区淡水资源的短缺问题。若海洋水库满足部分城市的用水需求,现有淡水资源供给方式可适当调整,向内地供水适当倾斜,缓解径流上游过度拦水和地下水过度开发等问题。再生水供水设施、污水处理设施和管网建设应加大投入,完善相关政策法规,建立污水回用管理体系和合理的价格机制。

径流与其泥沙和污染物将陆地与海洋联结,并构成陆海统筹的重要方面,关系到水资源、水环境和海岸线等重要领域。因此,不同部门的协同监管和适当开发对于陆海生态环境保护和生态环境质量提升具有重要意义。

5.4 不良影响

5.4.1 动力机制

目前世界海洋水库建设历史较短,海洋水库建设对海洋生态环境的影响尚未完全凸显。拦海大坝的建设不可避免地会改变海域的动力和物质条件,打破原有平衡,改变物质输运过程、河口水文过程和海底地形地貌。

5.4.2 生物生态

海洋水库及其附属设施建设将人为改造原有的海洋或湿地生态系统,尤其是促淤和填海工程将迫使海洋生态系统向陆地生态系统转化,直接影响海洋生态效益。库内水体盐度在旱、涝季的骤然变动和纳潮量的改变可能对库内水产养殖产生极大的威胁,并可能改变库内原有的生态系统结构,使种群结构向单一化、低级化和淡水化演变,更易发生单一种群的暴发式增长。库区与水源地的开发建设可能对自然保护区等生态敏感区造成一定的影响^[41],若水库建设海域位于鱼类洄游区,拦口坝的建设会影响鱼类的季节性洄游甚至生物资源的可持续发展。水库建设对入海径流的拦截会影响硅、磷等营养物质向海洋的输送,进而影响近海海洋生态系统的循环和生产力的储存。

5.4.3 水质污染

径流污染是海洋水库建设亟须解决的问题,虽

然目前可通过软、硬坝组合建设,修建城市生态湿地和监测径流污染等手段防控径流污染,但在沿海海域水质普遍较差的大环境下,控制海洋水库的水质可能比预想中的更为困难。此外,潮汐作用减弱引起的水体交换不畅可能导致对入海污染物的稀释能力下降,使海域生态环境进一步恶化^[37]。雨季径流冲刷带来的泥沙在水库中淤积,将导致水库库容减少,若水库在早期蓄淡避咸期间由于库内水体运转不畅导致水体富营养化,将对海洋水库的水质产生较大影响^[41]。

6 结语

我国沿海地区优质淡水资源短缺的问题亟须解决,虽然政府部门已尝试跨流域调水等措施,但新的水资源管理方案亟待提出。相较于传统水库,海洋水库具有成本低、影响小和不占用耕地等优点,且可充分利用沿海时空分布不均的淡水资源,将排洪入海转变为蓄洪于海,减轻洪涝灾害对沿海城市的威胁。入海淡水资源具有自然资源属性,应纳入国家战略资源,统筹“山顶到海洋”全过程的监控、管理和开发。总体来说,海洋水库的建设具有良好的技术可行性、环境持续性和社会经济效益,有利于沿海水资源的充分利用,是解决沿海淡水危机的重要措施,也是实现陆海统筹和协调发展的重要方向。

参考文献

[1] 宋蕾.水资源管理法律问题研究[M].北京:中国政法大学出版社,2015.

[2] SHATAT M, WORALL M, RIFFAT S. Opportunities for solar water desalination worldwide: review[J]. Sustainable Cities and Society, 2013, 9: 67—80.

[3] YANG S Q. A preliminary feasibility study for a backup water supply-coastal reservoir in Southeast Queensland, Australia [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2015, 64(4): 470.

[4] 徐靖.联合国公布《2018 年世界水资源开发报告》[J].水处理技术, 2018(4): 35—36.

[5] 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(4): 35—38.

[6] LIN P, YANG S Q. Coastal reservoir by soft-dam and its possible applications[J]. Recent Patents on Engineering, 2011, 5

(1): 45—56.

[7] WHITE R. Evacuation of sediments from reservoirs[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2001.

[8] 黄立业, 李莎, 史筱飞, 等.山东省海水淡化产业发展对策研究[J].工业水处理, 2019(8): 5—8.

[9] 王文, 杨云, 崔巍, 等.沿海地区非常规水资源开发利用方法与策略[J].江苏农业科学, 2015, 43(4): 1—4.

[10] LIU J, YANG S, JIANG C. Coastal reservoirs strategy for water resource development: a review of future trend[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2013(3): 336—342.

[11] BENNETT A. 50th anniversary: desalination; 50 years of progress[J]. Filtration+Separation, 2013, 50(3): 32—39.

[12] LATTEMANN S, HÖPNER T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination[J]. Desalination, 2008, 220 (1/3): 1—15.

[13] MENACHEM E, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333 (6043): 712—717.

[14] UNEP. Seawater desalination in mediterranean countries: assessment of environmental impact and proposed guidelines for the management of brine[Z]. 2001.

[15] 曹淑敏, 陈莹.我国非常规水源开发利用现状及存在问题[J].水利经济, 2015, 33(4): 47—49.

[16] YANG S Q, KELLY S. The use of coastal reservoirs and SPP strategy to provide sufficient high quality water to coastal communities[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2015(5): 80—92.

[17] MAASDAM R. Trends in water quality and algal growth in shallow frisian lakes, the Netherlands[J]. Water Science & Technology, 1998, 37(3): 177—184.

[18] 张爱莉, 赵其芬.山东省兴建河口海湾水库前景预测[J].山东水利, 1999(6): 31—32.

[19] 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.

[20] 杭州市地方志编纂委员会.杭州市志[M].北京:中华书局, 1995.

[21] 梁国昭.香港缺水问题与东江水资源开发[J].热带地理, 1997, 17(2): 131—138.

[22] 周一军.沿海围垦区蓄淡工程优化布局探讨[J].科技资讯, 2014(36): 125—126.

[23] 高学平, 郭磊, 涂向阳, 等.入海洪水资源的海洋水库开发模式研究[J].海洋学报(中文版), 2007, 29(6): 141—146.

[24] YANG S Q. Coastal reservoirs [P]. Singapore: 200504653-7, 2005.

[25] YANG S Q, FRENCH R. Coastal reservoirs: an Australian water storage option[J]. Australasian Journal of Water Re-

sources,2017(2):89-97.

[26] 岑亚达.新颖的水资源开发工程:海涂水库[J].浙江水利科技,1994(3):63-64.

[27] 李海妮,陈飞星.海涂水库水体淡化影响因素分析[J].东北水利水电,2005,23(10):42-44.

[28] 姜翠玲,裴海峰.天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J].湖泊科学,2007,19(4):428-433.

[29] RIMMER A.The mechanism of Lake Kinneret salinization as a linear reservoir[J].Journal of Hydrology,2003,281(3):173-186.

[30] 高增文,郑西来,吴俊文.海湾水库蓄水初期底质与淡水盐分交换的试验研究[J].水科学进展,2006,17(2):170-175.

[31] 高增文,李宇浩,赵全升,等.海湾水库沉积物对水体咸化影响的时间尺度[J].水科学进展,2015,26(2):221-226.

[32] 张效龙,朱鸣鹤,郑西来.环境因素影响下海湾蓄淡水水库底泥盐分释放试验研究[J].海洋通报,2010,29(2):135-142.

[33] 毛献忠,陈甫源,余祈文,等.堵港蓄淡水水库水体淡化预测研究[J].水利学报,2004,35(7):80-85.

[34] 余堃.浙江海涂水库水质淡化的分析与预测[J].环境污染与防治,1996(2):27-29.

[35] FRENCH J A,HARLEY B M,NEYSADURAI A.Desalination of an impounded estuary[C].Environmental Engineering,ASCE,1985.

[36] 潘桂娥,黄罗春,金利军,等.沿海滩涂水库蓄淡技术研究[J].水利规划与设计,2004(2):51-55.

[37] 伍善庆.浅议漩门港围海工程对乐清湾海洋资源及环境的影响[J].经济师,2000(3):17-19.

[38] 徐永岗,李敏中.沿海滩涂水库排咸研究[J].河海大学学报,1998(3):76-80.

[39] 王高正,朱江平.大塘港水库机械排咸技术[J].水利水电科技进展,1998(4):44-46.

[40] 王娟,高增文,赵全升.库底排咸沟对控制海湾水库库水咸化的效应[J].环境科学与技术,2010(S2):33-35.

[41] 张宏伟,吴健,车越,等.长江口青草沙水源地开发的生态环境影响[J].华东师范大学学报(自然科学版),2009(3):38-47.