

上海青草沙投资建设发展有限公司  
上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会

编 顾金山·主编

# 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设 关键技术研究与应用

上海科学技术出版社

CHANGJIANGKOU JIANGXIN DAXING BIXIANXUDAN SHUIKU JIANSHE  
GUANJIAN JISHU YANJIU YU YINGYONG



# 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设 关键技术研究与应用

上海青草沙投资建设发展有限公司 编  
上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会  
顾金山 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

长江口江心大型避咸蓄淡水库建设关键技术研究与应用/上海青草沙投资建设发展有限公司,上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会编. —上海:上海科学技术出版社,2017.12

ISBN 978-7-5478-3819-8

I. ①长… II. ①上…②上… III. ①长江口—大型水库—水利建设—研究 IV. ①TV632.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281761 号

长江口江心大型避咸蓄淡水库建设关键技术研究与应用  
上海青草沙投资建设发展有限公司 编  
上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会  
顾金山 主编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 889×1194 1/16 印张 16 插页 8  
字数: 400 千字  
2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷  
ISBN 978-7-5478-3819-8/TV·7  
定价: 130.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

## 编委会



主 编 顾金山

副 主 编 陆忠民 卢永金 叶源新

编 委 顾金山 周建国 陆晓如 顾玉亮 叶源新 韩 蒙  
沈庞勇 佟宏伟 石小强 何刚强 陆忠民 卢永金  
刘若元 管 伟

审 稿 沈 恭 谭企坤 袁雅康 顾宝根 吴今明 范庆国  
徐惠良 唐胜德

特约编辑 章 宇 王晓鹏 顾 贇

编 辑 肖 丽 朱 俊 乐 勤 王晓鹏 顾 贇 吴彩娥  
袁建忠 刘新成 刘小梅 楼启为 黄兴英

摄 影 陆忠民 周 菁 郑宪章

主要编写人员 (按姓氏笔画排序)

丁玲	丁磊	丁付革	王冬珍	王志林	王侃睿	王晓鹏
王路军	邓鹏	卢永金	卢育芳	叶源新	乐勤	冯建刚
朱建荣	刘桦	刘磊	刘小梅	刘东坤	刘汉中	刘华锋
刘新成	关许为	纪洪艳	严丽芳	苏爱平	杜小弢	李杰
李锐	李国林	李爱明	李景娟	肖志乔	吴玮	吴焱
吴华林	吴彩娥	吴维军	佟宏伟	汪巍巍	沈庞勇	张尧
张学军	陆忠民	陆晓如	陈江海	陈毓陵	陈德春	罗小峰
季荣	金平	周金明	周春天	胡春霞	钟小香	段祥宝
俞相成	施蓓	袁建忠	都国梅	顾贇	顾玉亮	倪燕玉
徐坤	徐波	徐亮	高占学	唐志坚	容之攀	黄国玲
黄建华	曹元生	韩蒙	韩昌海	傅宗甫	舒叶华	曾祥华
谢先坤	谢丽生	谢罗峰	楼启为	潘丽红		

参编单位

上海青草沙投资建设发展有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

上海市水利工程设计研究院有限公司

中交上海航道局有限公司

河海大学

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

上海河口海岸科学研究中心

上海交通大学

华东师范大学



## 内容提要



本书以青草沙水源地水库为例,围绕潮汐河口地区复杂的环境条件及长距离、滩槽相间、双向水流、易冲多变河床上的水库建设难题,开展了大量的试验研究,在咸潮入侵、河床演变、水库总体布局、水力充填工艺深水筑堤、堤坝实施顺序与保滩护底、龙口设置保护及截流、堤坝防渗与检测、泵闸侧向进出水水力控制和整流、堤闸连接段变形协调等方面取得了一系列创新成果,研究过程中的思路及技术手段可为类似工程提供借鉴。

本书适合从事河口治理、水源地水库建设、海堤建设等规划设计、施工和管理的技术人员阅读,也可供相关院校师生参考。

## 序



上海北靠长江、南濒杭州湾、西连太湖、东邻东海。长江、黄浦江、吴淞江(苏州河)等骨干江河穿境而过,境内河湖水系发达。20世纪末以来,河道水质持续恶化,上海逐步成为典型的水质型缺水城市。

上海市委市政府历来高度重视供水安全保障工作,大力推进水源地建设。改革开放以来,全面提升供水安全保障对上海特大型城市的持续快速发展更为迫切。20世纪八九十年代,重点开发利用黄浦江水源,先后建成了黄浦江引水一期、二期工程。然而随着城市进一步发展,单一依靠黄浦江水源难以满足供水安全保障需要。

长江口淡水资源丰沛,南支全水域水质总体达到国家地表水Ⅱ类水标准,符合饮用水水源水质要求,具有巨大的开发利用价值。20世纪90年代初起,上海市有关部门着手组织多方力量对长江青草沙等规划水源地进行长期系统的水文水质监测、研究和论证。2002年12月,《上海市供水专业规划》得到市政府批准,上海原水实施战略转移,大力开发长江水源地,开创上海原水供应“两江并举、多源互补”的新格局。2005年12月,“青草沙水源地原水工程研究成果总报告”获得26位院士专家一致同意。2006年1月,上海市第十二届人民代表大会第四次会议批准青草沙水源地原水工程建设列入《上海市国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》。

青草沙水源地原水工程是上海市解决饮用水水源问题的重大民生工程,工程历经15年论证,5年建设,于2011年6月建成通水,供水范围覆盖上海市中心城区,直接受益人口达1300万。青草沙水源地原水工程建成至今,运行安全可靠,截至2017年10月,已优质供水115亿t以上,大幅提升了城市供水的安全保障能力,为上海的可持续发展,实现2040年卓越的全球城市目标保驾护航。



青草沙水源地原水工程是协同科技创新的重大成果。面对总体规划、避咸蓄淡、江中建库、长距离越江隧道、城区长距离输水系统稳定节能运行等诸多复杂难题,规划、科研、设计、施工者们敢为人先、合力攻关,在中国工程院、上海市科学技术委员会、上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会等部门的指导支持下,开展系列研究,取得大量创新成果,为日供水规模高达 719 万  $\text{m}^3$  原水工程的总体构思、技术攻关、工程实施和安全运行奠定了牢固的基础。

为了全面反映青草沙水源地原水工程的规划、设计、科研、施工、建设管理等方面的研究成果,上海青草沙投资建设发展有限公司和上海市住房和城乡建设管理委员会科学技术委员会组织相关单位继《上海长江口青草沙水源地原水工程论文集》后,编写了《长江口青草沙水源地原水工程规划与研究》《长江口江心大型避咸蓄淡水库建设关键技术研究与应用》《城市供水大型输水工程关键技术研究与应用》。丛书以翔实的资料,系统阐述了青草沙水源地原水工程十多年来的重要研究成果和重大技术方案,凝聚着广大建设者的智慧。希望本丛书的出版,为关注沿海河口城市淡水资源开发利用的研究者和决策者提供有价值的参考,为推进行业科技进步、解决城市供水问题、保障城市可持续发展做出贡献。



中国工程院院士、上海交通大学教授  
上海市中国工程院院士咨询与学术活动中心主任

## 前言



青草沙水源地水库位于上海市崇明区长兴岛西北侧、长江口南支下段南北港分流口水域,水库总面积 $66.15\text{ km}^2$ ,总库容 $5.27\text{ 亿 m}^3$ ,设计日供原水量达 $719\text{ 万 m}^3$ ,受益人口 $1\,300\text{ 万}$ 。

长江口河床演变、水动力条件和工程地质条件极其复杂,气象、水文、主要建筑材料和施工作业条件等对工程建设限制颇多,青草沙水库建设具有涉及范围广、设计施工难度高、施工工期紧等特点,而且在长江口这样复杂的河口建设大型江心水库在国内外均属首次,在水库总体布局、规模确定及水质保障技术、大型潮汐龙口设置与截流技术、长距离江心水力充填堤坝结构与渗控技术、江心大型泵闸建筑技术等方面面临重大挑战,常规工程经验难以直接借鉴,亟须创新突破。

针对水库建设的特点和难点,上海青草沙投资建设发展有限公司组织相关勘测设计、施工和科研单位,综合运用现场测验、数值模拟、物模试验等手段联合攻关,在长江口水、沙、盐和水库水质、水力充填堤坝渗流特性等自然规律的认识与把握,潮汐河口避咸蓄淡水库“泵闸联动、自流为主”的取水方式,河口长距离水力充填堤坝的结构与施工,特大水域圈围龙口布设与截流,河口沙洲新沉积土上的水工建筑物基坑围护、变形控制、水力控制及堤闸连接段协调变形控制等方面均取得了突出的创新成果,研究成果已在上海青草沙水库建设中得到了成功运用,有力地保障了水库的顺利建成,经济、社会和环境效益巨大。

青草沙水源地的成功建设,实现了上海市水源地的战略转移,形成上海“两江并举、多源互补”的水源地格局,从根本上扭转了上海市合格水源严重短缺的局面,为沿海河口地区充分利用淡水资源、解决城市供水难题提供了一个有效的解决方案。在此,对所有参与、关心和支持长江口江心大型避咸蓄淡水水库建设关键

技术的研究者和决策者表示衷心的感谢!

希望本书的出版能对致力于解决城市水危机的决策者和研究者有所启迪和帮助,并对促进沿海河口地区结合河势控制开发利用淡水资源、满足城市供水需求起到积极的作用。

**编 者**

2017年10月



<b>1 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设研究背景 .....	1
1.2 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设研究内容 .....	3
1.3 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设研究技术与成果 .....	4
1.3.1 潮汐河口江心避咸蓄淡水库总体布局及水质保障技术 .....	4
1.3.2 大型潮汐龙口设置及截流成套关键技术 .....	6
1.3.3 长距离江心水力充填堤坝结构与实施技术 .....	8
1.3.4 江心新沉积土地基上大型泵闸建筑关键技术 .....	10
<b>2 潮汐河口江心避咸蓄淡水库总体布局及水质保障技术</b>	<b>13</b>
2.1 概述 .....	13
2.1.1 研究背景 .....	13
2.1.2 主要研究内容 .....	14
2.1.3 研究目标及技术路线 .....	15
2.2 长江口咸潮入侵规律及青草沙水域典型盐度过程 .....	16
2.2.1 长江口咸潮入侵原型观测 .....	16
2.2.2 长江口咸潮入侵影响因素分析 .....	17
2.2.3 长江口咸潮入侵规律分析 .....	20
2.2.4 特枯水情下青草沙水库取水保证程度研究 .....	25
2.2.5 代表性水文条件与典型盐度过程 .....	29
2.3 长江口水沙基本特征及河势演变 .....	34
2.3.1 长江口来水来沙条件 .....	35
2.3.2 长江口南北港分流口水域水沙基本特性 .....	37
2.3.3 长江口总体河势及影响长江口南支下段河势变化的因素 .....	39

2.3.4	南北港分流口及分流通道基本演变规律	41
2.3.5	北港河势演变分析	42
2.3.6	南港河势演变分析	44
2.3.7	水库坝线沿线滩势分析	46
2.3.8	河势演变趋势预测	46
2.4	江心水库选线及其工程影响预测	47
2.4.1	水库坝线布置的原则	48
2.4.2	研究论证技术	48
2.4.3	研究论证主要成果	49
2.4.4	研究成果应用及坝线布置方案	51
2.5	库内水力控制及水质保持机制	53
2.5.1	防止藻类过度繁殖的水库水力停留时间分析	53
2.5.2	青草沙水库生态动力学模型和富营养化趋势模拟预测	55
2.6	水库总体布局、取水方式及节能调度运行方案	67
2.6.1	水库工程总体布局论证	67
2.6.2	水库取水方式	68
2.6.3	水库运行典型潮型分析	69
2.6.4	水库运行条件分析	71
2.6.5	调度方案和数值模拟分析	72
2.6.6	节能调度运行原则研究	74
2.7	水源地生态保护技术	78
2.7.1	生态环境调查与评估	78
2.7.2	工程建设中的生态环境保护	79
2.8	主要结论	79
<b>3</b>	<b>大型潮汐龙口设置及截流成套关键技术</b>	<b>82</b>
3.1	概述	82
3.1.1	研究背景	82
3.1.2	龙口与截流技术现状	83
3.1.3	主要研究内容和技术路线	86
3.2	大型潮汐围区龙口设置	87
3.2.1	研究目的及研究难点	87
3.2.2	研究思路及主要方法	88
3.2.3	龙口设置条件和设计标准	89
3.2.4	库区分仓与龙口设置	91
3.2.5	龙口规模分析	97
3.3	大型潮汐龙口的水力特性研究与截流预报	99
3.3.1	研究目的及研究难点	99

3.3.2	研究思路及主要方法 .....	100
3.3.3	龙口水流特性 .....	102
3.3.4	框笼施工安放和抛石截流时机分析 .....	106
3.3.5	截流过程龙口水流数值跟踪预报技术与应用 .....	108
3.4	大型潮汐龙口的护底与截流工艺 .....	110
3.4.1	研究目的及研究难点 .....	110
3.4.2	研究思路及主要方法 .....	111
3.4.3	深水软基上龙口护底结构 .....	111
3.4.4	高流速大型龙口截流工艺与钢框笼抛石结构 .....	113
3.4.5	大型潮汐龙口截流施工组织与节点控制技术要求 .....	114
3.5	大型潮汐龙口截流施工关键技术 .....	116
3.5.1	研究目的及研究难点 .....	116
3.5.2	研究思路及主要内容 .....	116
3.5.3	1 300 g/m <sup>2</sup> 高强土工织物编织和缝制工艺 .....	116
3.5.4	龙口护底保护结构施工工艺 .....	117
3.5.5	60 t 尼龙网兜石和 30 t 混凝土方块水下安放自动脱钩吊具 .....	118
3.5.6	大型钢框笼吊装及抛石截流施工关键工艺 .....	120
3.5.7	龙口施工综合监测技术 .....	121
3.6	主要结论 .....	122
<b>4</b>	<b>长距离江心水力充填堤坝结构与实施技术</b> .....	<b>124</b>
4.1	概述 .....	124
4.1.1	研究背景 .....	124
4.1.2	研究内容 .....	125
4.1.3	技术路线 .....	125
4.2	水力充填砂袋堤坝结构与施工工艺 .....	127
4.2.1	深槽段堤坝建设的自然条件特点 .....	127
4.2.2	深槽段堤坝结构与施工控制 .....	127
4.2.3	筑坝工艺创新 .....	130
4.3	实施顺序与防冲保滩分析论证 .....	139
4.3.1	研究目标 .....	139
4.3.2	堤坝实施顺序 .....	140
4.3.3	防冲保滩 .....	145
4.3.4	建设期河势滩势动态跟踪监测与效果分析 .....	160
4.4	水力充填堤坝渗流特性研究及控制技术 .....	162
4.4.1	水力充填堤坝渗透特性研究 .....	163
4.4.2	水力充填堤坝渗流数值分析技术研究与应用 .....	169
4.4.3	深厚透水地基上水力充填堤坝渗控措施研究与应用 .....	173

4.4.4	防渗墙质量检测方法及评价标准研究 .....	179
4.5	主要结论 .....	184
<b>5</b>	<b>江心新沉积土地上泵闸建筑关键技术</b> .....	<b>186</b>
5.1	概述 .....	186
5.1.1	研究背景 .....	186
5.1.2	研究内容 .....	187
5.1.3	技术路线 .....	188
5.2	潮汐河口大型取、输水泵闸建筑水力控制技术 .....	189
5.2.1	取水泵闸选址及进出口流态特征分析 .....	189
5.2.2	侧向进水泵闸进口流态控制技术 .....	195
5.2.3	泵闸出口消能防冲技术 .....	199
5.2.4	闸井式输水口形式与流态控制技术 .....	205
5.3	复杂工况条件下结构计算分析及变形协调控制技术 .....	213
5.3.1	复杂工况条件下结构内力及变形仿真计算分析 .....	213
5.3.2	多建筑物变形协调控制技术研究 .....	217
5.3.3	新沉积土江滩上堤坝与建筑物地基变形协调控制关键技术 .....	220
5.4	江心透水地基泵闸深基坑复合围护体系及地基处理关键技术 .....	224
5.4.1	江心泵闸施工特点和难点 .....	224
5.4.2	江心透水地基泵闸深基坑的特性研究 .....	224
5.4.3	江心泵闸围堰特点及构筑方案研究 .....	226
5.4.4	泵闸深基坑支护与开挖技术研究 .....	227
5.4.5	深基坑支护应力与变形分析 .....	235
5.5	主要结论 .....	237

## 1.1 长江口江心大型避咸蓄淡水库建设研究背景

上海北靠长江,南濒杭州湾,西连太湖,东邻东海。全市多年平均地表径流量为 24.15 亿  $\text{m}^3$ ,人均本地水资源量仅 133  $\text{m}^3$ 。但上海市具有丰富的过境水,太湖多年平均来水 106.6 亿  $\text{m}^3$ ,长江干流多年平均过境水 9 004 亿  $\text{m}^3$ ,总计 9 110.6 亿  $\text{m}^3$ 。长江口南支全水域水质基本符合国家地表水 II 类水质标准。然而由于地表水水质受污染严重,水环境质量得不到保证,上海其他地区的地表水水质却一般都达不到 II~III 类标准。上海被纳入全国 36 个水质型缺水城市之列,在 2000 年被联合国确定为 21 世纪全球饮用水严重缺乏的六大城市之一。

为了解决上海城市远景供水需求,自 20 世纪 90 年代初起,上海市有关部门就着手组织各方力量对长江青草沙等上海远景规划水源地进行长期系统的水文水质监测、研究和论证。

2002 年 12 月,上海市人民政府批准了《上海市供水专业规划》。规划明确指出,上海原水实施战略转移,大力开发长江水源地,提高长江原水供水份额,形成上海原水供应“两江并举、三足鼎立”的格局。

2006 年 8 月,上海城投(集团)有限公司组织编制了《青草沙水源地原水工程系统方案》,规划青草沙水源地 2020 年供水规模为 719 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,供水范围为杨浦、虹口、浦东等 10 个中心城区全部以及宝山、普陀、青浦、闵行和崇明等 5 个区的部分地区,受益人口超过 1 000 万人。青草沙水源地原水工程系统主要由青草沙水库及取输水泵闸工程、长江过江管工程和陆域输水管线及增压泵站工程等 3 个项目组成,分别立项建设。

青草沙水库是我国第一座建于复杂潮汐河口江心的大型避咸蓄淡水库,可借鉴经验和资料较少,而长江口河床演变、潮流水动力、咸潮入侵规律、工程地质条件等极其复杂,存在诸如选址选线、避咸蓄淡、河势维稳、江心成库、深水筑堤、龙口设置及截流、堤坝渗流控制、低滩取输水泵闸建筑、水库水环境保护与运行调度等一系列技术难题和特点,主要体现在以下几个方面。

### 1) 复杂河口地区水库总体布局

长江口平面形态呈喇叭形,长江主流在徐六泾以下由崇明岛分为南支和北支,南支在吴淞口以下由长兴岛和横沙岛分为南港和北港,南港被江亚南沙和九段沙分为南槽和北槽,使长江口呈“三级分汊、四口入海(北支、北港、北槽和南槽)”的河势格局,河势十分复杂。特别是青草沙水库所在河段是长江口区



近百年来滩槽变化频繁、河床冲淤较为剧烈的河段,河势演变规律十分复杂,在南北港分流口区域圈围建库,一方面需要考虑工程实施可能对河势产生的影响,另一方面要考虑河势的变化也会对工程本身安全带来影响,需要提出相应的工程应对措施。

#### 2) 咸潮入侵与水库规模及节能环保型运行方式

长江口受外海咸潮入侵影响,水库规模及蓄水运行时机取决于对咸潮入侵规律的掌握。不同于一般河口,长江口的咸潮入侵有来自外海的咸潮上溯,但在工程区附近出现的咸潮还有来自北支咸潮倒灌的。受北支喇叭口形态影响,咸潮倒灌南支,成为长江口咸潮入侵的一大特征。加上咸潮入侵受径流、潮汐和风对水流的影响共同作用,机理和规律十分复杂。

长江口水域水动力条件十分复杂,水质变化、咸潮入侵以及河势演变等直接影响避咸蓄淡水库取水的可靠性,取水口位置和取水方式的合理选择是直接影响水库供水安全、取水建筑物规模和水库运行成本的关键。

同时,长江水中营养盐浓度较高,水库具有浅水型湖泊的特点,水库建成后库区水流变缓,具有富营养化风险,易导致库区水质恶化,须通过库型优化、引排布局、优化水库调度并辅以建立良性生态系统等措施保持和改善库区水质。

#### 3) 长距离江心水力充填堤坝结构及深水筑堤与护滩防冲

青草沙水库地处长江口河口江心,南北港分流口、暗沙众多,河床泥沙可动性较强,并且受水流及潮流往复作用,水流流态复杂,互动因素较多。水库在北港江中的堤坝主要沿涨潮沟外侧江心沙脊布置,水域开敞,工程远离岸边、无掩护、堤线长,施工作业繁杂,施工环境恶劣,并穿越多个大型涨潮沟。

由于涨潮沟的形态是特有水动力条件作用下的一种不稳定平衡状态,流场、波浪或泥沙条件的改变,极易引起带状沙脊冲刷,而且一旦冲刷启动,冲刷的速度往往很快,可能引起大片沙脊消失。施工筑堤的阻水扰流也极易引起沙洲冲刷和河势调整。因此,研究合理的施工顺序,选择合理的堤坝施工作业面、进占速度以及适宜的防冲保滩结构,维护沙洲或沙脊稳定,避免施工过程中和施工后堤坝沿线滩地冲刷和河势急变,是水库建设面临的一大技术难点。

水库东堤滩面高程为 $-5.0\sim-10.5\text{ m}$ ,横穿涨潮沟深槽,全长约 $3.0\text{ km}$ ,属于深水筑堤。工程所在区域水深、浪大、流急、地基软弱,施工作业面窄,而且缺乏石料,缺乏陆上推进筑堤的条件。

#### 4) 深厚透水地基上的水力充填堤坝受双向水头作用的渗流控制

青草沙水库堤坝须承受库内外两侧高达 $7.0\sim 8.0\text{ m}$ 的双向水头作用,且水库环库堤坝采用充填管袋斜坡堤、抛填袋装砂斜坡堤结构,其特点是堤身两侧及下部主要由土工织物管袋充填砂土堆叠而成,堤身中上部由砂性土散吹形成,为非常规的土堤,其渗透规律不同于均质堤坝,受力条件及变形特征均不同于山区水库的大坝。因赶潮施工,填筑质量控制困难,加上地基土多为砂性土或粉性土,极易发生渗透破坏,危及堤坝安全。在潮汐河口以水力充填法建设水库堤坝的类似工程经验不多,其渗透特性、渗透稳定控制标准以及可大规模操作的、可靠的渗控措施是需要攻关研究的技术难点。

#### 5) 大型龙口设置与截流工艺

龙口设置与截流是水库施工建设的关键节点。青草沙库区的水域面积达 $49.8\text{ km}^2$ ,圈围堤坝的龙口受双向水流作用,龙口流速大,流态复杂。龙口受潮汐往复流作用,周期性的潮汐变化影响使得适宜连续作业天数一般仅 $6\sim 8\text{ d}$ ;工程区缺乏石料和陆上抛石作业条件;软土地基易冲难护,且一旦发生冲刷极难控制。截流作为水库建设的关键工序,不但关系到工程的成败,更关系到工程的经济效益、政治影响以及人身安全等多个方面,应从组织落实、计划安排、技术分析、后备方案的确定等方面进行周密分析、论证和落实。