

牛栏江-滇池补水工程

改善滇池水环境引水调控技术及应用

马巍 浦承松 谢波 周丰 等 著

NIULANJIANG-DIANCHI BUSHUI GONGCHENG

GAISHAN DIANCHI SHUIHUAJING

YINSHUI TIAOKONG JISHU JI YINGYONG



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

牛栏江-滇池补水工程

改善滇池水环境引水调控技术及应用

马巍 浦承松 谢波 周丰 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了滇池流域的水资源条件、开发利用特点、河湖水环境质量特征及其水质演变成因,并结合牛栏江-滇池补水工程论证的技术需要,系统地提出了滇池流域水资源配置与优化方案,揭示了滇池流域水文与非点源迁移转化规律,解决了复杂地形遮挡影响下滇池湖泊水动力与入湖污染物迁移转化过程的模拟难题,分析预测了牛栏江-滇池补水工程改善湖泊水环境效果,建立了新的水文情势条件下滇池-德泽水库联合调度运行机制,提出了牛栏江-滇池补水工程入湖实施方案,为牛栏江-滇池补水工程规划、设计、近期调度运行与科学管理等提供了科学依据。

本书可为流域水资源、水环境、水生态修复等学科的研究者提供参考,也可为流域水污染综合治理、河湖水系连通、湖库联合调度等方面的管理者提供参考与借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

牛栏江:滇池补水工程改善滇池水环境引水调控技术及应用 / 马巍等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014.5

ISBN 978-7-5170-1948-0

I. ①牛… I. ①马… III. ①滇池—流域—跨流域引水—水利工程 IV. ①TV67

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第088251号

书 名	牛栏江-滇池补水工程改善滇池水环境引水调控技术及应用
作 者	马巍 浦承松 谢波 周丰 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 20印张 474千字
版 次	2014年5月第1版 2014年5月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

滇池是镶嵌在云南高原的一颗明珠，是我国著名的淡水湖泊，是春城昆明生存和发展的摇篮，具有工农业供水、防洪、旅游、航运、水产养殖、调节气候等多种功能，在云南省及昆明市国民经济和社会发展中具有十分重要的地位和作用。滇池地处金沙江一级支流普渡河上游，长江、珠江、红河三大流域分水岭地带，水资源极度匮乏，流域内城市和社会经济发展与水土资源极度不匹配，水资源开发利用超过 100%，水体被多次重复利用，污染物不断累积入湖，水体交换速度慢，湖水自净能力差，加之环保措施滞后和农业面源污染难以控制，导致滇池水环境从 20 世纪 70 年代后期水质逐步下降，近 20 年来湖泊水质在 V 类和劣 V 类间波动。一段时期，全年性蓝藻水华蔓延全湖，严重破坏了滇池的水生态系统和生物多样性，滇池饮用水水源地功能完全丧失，直接影响到了广大人民群众的生活质量和身心健康，严重制约了云南省经济社会的可持续发展，是国家重点治理的“三湖”之一。

党中央、国务院高度重视滇池治理和保护工作，“九五”以来，连续 3 个五年计划均把滇池纳入国家“三湖”治理的重点。2007 年 6 月 30 日，温家宝总理在国务院“三湖”治理紧急座谈会上指出：“‘三湖’抓紧治理已经迫在眉睫，刻不容缓。”“要进一步做好调水引流工作，积极实施‘滇池引水’工程，增强湖泊的生态水量，增强湖水的自净能力。”“我以为这是中国生态环境建设带有标志性的工程，也是在生态环境方面我们对人民以至对人类负责的一个表现”“‘三湖’治理，太湖是重点，滇池是难点”。云南省委、省政府高度重视滇池治理工程，在滇池水污染成因和水资源条件分析及总结近 20 年滇池治理经验的基础上，科学提出了实施环湖截污和交通、外流域引水及节水、入湖河道整治、农业农村面源治理、生态修复与建设和生态清淤六大工程，六大工程措施的关系是层层递进、互为补充，缺一不可，最直接、最有效的措施是环湖截污和生态补水。牛栏江-滇池补水工程是滇池综合治理的关键，是加快湖泊水体循环与交换、从根本上提升滇池流域水环境和水资源承载能力、恢复滇池良性生态的关键性措施，可为滇池环湖截污创造良好的水资源条件，与其他五项污染源控制措施互相配合，实现滇池流域综合治理方案的总体目标。

云南省水利水电勘测设计研究院、中国水利水电科学研究院长期以来一直致力于滇池流域水资源优化配置、入湖污染负荷预测、滇池水环境改善补水量、水环境改善效果等的研究工作。在多年研究的基础上，以牛栏江-滇池补水工程为背景，系统开展了滇池流域水资源配置及优化关键技术、滇池流域水文与非点源污染负荷预测关键技术、复杂地形遮挡影响下滇池湖泊水动力与水质模拟关键技术、区域水资源优化配置下滇池水位-德泽水库联合调度关键技术的研究，形成了牛栏江-滇池补水工程改善滇池水环境的引水调控集成技术。成功预测了不同规划水平年不同设计水文条件下的滇池流域污染负荷产生量、入湖量及其年内变化过程；准确模拟了复杂地形遮挡条件下滇池风生湖流及湖泊内污染物的输移扩散规律，研究了滇池流域入湖污染量与湖泊水质间的响应关系，合理确定了滇池水环境改善的补水量及补水过程，科学预测了流域水污染综合治理对湖泊水质改善效果。在此基础上，首次考虑了滇池水环境改善生态补水量的要求，构建了包括空间上的近距离引水、远距离调水，时间上分近期和远期，战略上从昆明市延伸到滇中地区的昆明市滇池流域多层次水资源配置供给保障体系，并融合水量平衡、情景分析等基础技术方法，建立了滇池-德泽水库联合调度模拟技术，为滇池和德泽水库联合调度的决策提供了技术支持。

引水调控技术科学回答了牛栏江-滇池补水工程建设的必要性和紧迫性、滇池流域水资源优化配置方案、滇池水环境改善需水要求及过程、牛栏江-滇池补水工程调水量、工程规模、滇池水环境改善效果、运行调度等一系列重大问题，成功解决了牛栏江-滇池补水工程在规划论证、项目设计及运行调度中相关科学问题，为牛栏江-滇池补水工程的成功建设、顺利通水及区域水资源优化配置下的两湖库联合调度提供了强有力的技术支撑，为资源型缺水和水质型缺水地区（或流域）水资源优化配置与水源保障研究提供了成功的典型案例，具有很好的技术指导性和重要的应用价值。



云南省水利厅副厅长
2014年3月20日

前言

滇池古称滇南泽，地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带，集水面积 2920km²，涉及昆明市五华、盘龙、西山、官渡、呈贡五区和晋宁、嵩明两县，是云南省人口最集中、经济最发达的地区，是昆明市人民繁衍生息的摇篮，是昆明市的母亲湖，是维系昆明城市生态系统的根基，关乎昆明市的生存发展。

根据《云南省水资源综合规划》有关成果，滇池流域年径流深 188.7mm，水资源总量 5.55 亿 m³，人均水资源量低于 200m³，仅为全省平均水平的 1/25，与国内京津唐地区的人均水资源量相当，属水资源严重匮乏地区。日益短缺的水资源问题，致使滇池流域河湖生态环境用水被严重挤占，湖周无清洁水来源，大量的城市生活和生产废污水早已成为滇池水资源的主要来源之一，从而直接导致近些年来滇池流域水环境问题日益突出，滇池湖泊水环境质量很差，蓝藻水华常年大面积暴发。

20 世纪 60 年代，滇池水质总体为Ⅱ类；70 年代为Ⅲ类，70 年代后期水质逐渐变差；至 80 年代中后期，滇池草海水质下降到Ⅴ类，外海为Ⅳ类；90 年代草海水质为劣Ⅴ类，外海为Ⅴ类。进入 21 世纪，滇池草海、外海水质均长期维持在劣Ⅴ类水平。滇池水质恶化，不仅严重破坏了湖泊生态系统平衡，影响了昆明市旅游业发展；而且还对以滇池为水源的昆明市城市供水系统造成了巨大压力，并不得不从近百公里外的掌鸠河、清水海等地调水解决昆明市主城区供水问题，以保证昆明市城市供水安全。滇池流域资源性缺水 and 水质性缺水并存，“水少、水脏、水景观差”问题是长期困扰滇池治理的难题。

自“八五”以来，滇池湖泊治理一直受到国家和云南省地方政府的长期关注和高度重视。2007 年 6 月 30 日，在国务院“三湖”治理工作座谈会上，温家宝总理指出：“三湖（太湖、滇池、巢湖）治理，滇池是难点。”胡锦涛总书记于 2009 年 7 月 25—28 日在云南省调研时，专门视察了滇池治理工作，对滇池治理工作给予了充分肯定，并提出“按照建设生态文明的要求，深入实施七彩云南保护行动，突出抓好滇池等水污染综合治理”。按照胡锦涛总书记和温家宝总理的重要指示，云南省委、省政府提出要进一步加强对环境保护和生态建设，继续加快滇池治理步伐，以“六大工程体系”为主线，以节能

减排、生态工程等水污染综合治理为重点，大力推进滇池流域水环境综合治理，着力在滇池水环境保护上取得新进展。

滇池湖泊水环境模拟结果表明，在牛栏江-滇池补水工程未落实、“六大工程体系”的其他工程全部顺利实施并达到预期治理效果的情景下，到2020年滇池外海丰水年 COD_{Mn} 、TP、TN 3项指标年均水质浓度分别为1.96mg/L、0.112mg/L、1.67mg/L，平水年3项指标浓度分别为1.90mg/L、0.105mg/L、1.65mg/L，枯水年3项指标浓度分别为1.84mg/L、0.106mg/L、1.66mg/L， COD_{Mn} 满足Ⅰ类水质标准，TP、TN属Ⅴ类水质，水质浓度值均接近2020年外海Ⅳ类水质目标要求。由此说明，在滇池流域水资源比较匮乏的情况下，仅通过流域水污染综合治理而不实施外流域补水工程，很难达到预期的治理目标要求。在“六大工程体系”全部落实并达到预期治理效果的条件下，至2020年，各典型水文年下滇池外海水水质（包括 COD_{Mn} 、TP、TN 3项指标）均基本满足规划水质目标要求。从补水后滇池外海水水质达标程度看，枯水年型滇池水质达标情况最好，平水年次之，丰水年相对略差。

规划水平年滇池湖泊水质改善以滇池流域五大水污染综合治理工程体系全面落实并稳定发挥其预期的治污效益为基本前提，外流域补水工程则是改善湖泊水资源平衡、保障湖泊水质基本满足其规划水质目标要求的重要补充。对滇池水环境综合治理而言，“六大工程体系”缺一不可，只有全面落实六大工程措施并充分发挥各项工程的治污、控污、截污效益并增加流域内河湖生态环境用水量、改善湖泊水动力条件、增强湖泊稀释自净能力以及改善滇池入出湖污染物严重失衡的局面，才有可能使2020年滇池外海水水质基本实现规划水质保护目标要求。

牛栏江-滇池补水工程是滇池流域“六大工程体系”中“外流域引水及节水”的重要组成部分。工程主要由德泽水库枢纽、干河提水泵站、坝后电站及干河泵站至昆明（盘龙江）的输水管线工程组成。德泽水库为混凝土面板堆石坝，最大坝高142m；坝后电站位于大坝坝脚下游左岸，装机容量20MW。干河泵站站址位于德泽水库库尾左岸支流——干河的右岸，取水口距德泽水库坝址17.3km，泵站单机设计流量 $7.67\text{m}^3/\text{s}$ ，装机容量为 $4 \times 22.5\text{MW}$ 。输水线路布置于牛栏江左岸，总体走向为SW，线路起点为德泽干河泵站出水池出口，末端为松华坝下游昆明分水闸，输水线路设计流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ 。输水线路落点在松华坝水库下游约3km处的盘龙江左岸，牛栏江来水将沿盘龙江河道进入滇池，连通牛栏江和滇池两大流域。工程建成通水后将每年向滇池补给生态修复用水约5.66亿 m^3 ，将极大改善滇池流域水资源严

重短缺的状况，并大幅度提高滇池的水环境容量。在盘龙江入湖方案基础上，规划对盘龙江两岸实施彻底截污和污水处理厂尾水外排等工作，将盘龙江打造成牛栏江来水的“入湖清水通道”；对滇池外海的唯一天然出湖通道海口河及其控制性工程海口闸进行整治和改造，使滇池水能够顺利地向下游排泄；建立德泽水库和滇池的联合调度运行机制，充分发挥牛栏江-滇池补水工程在缓解滇池流域水资源短缺、改善滇池水环境质量中的支撑性作用，提高滇池的防洪能力并降低其防洪风险；在现有水量水质监测体系基础上，进一步完善滇池流域的水量水质监测网络，为滇池水环境质量评价及“六大工程体系”的水污染防治效果评估提供基础数据，为今后进一步修订并完善德泽水库与滇池的联合运行调度方案提供技术支撑。牛栏江-滇池补水工程已于2013年底正式通水，现正在加紧实施入湖实施方案规划的各项截污、污水外排、联合调度、水量水质监测站网等工作。

国内外的实践经验均表明：滇池湖泊水污染治理是一个庞大的系统工程，汇集了环保、水利、滇管、国土、农业、城建等多个部门，涉及水文、水资源、水环境、水生态、水文化、水景观和水管理等多个学科领域，在经历了30多年的持续治理和投入后，伴随着牛栏江-滇池补水工程的落实，滇池湖泊水污染治理迎来了最关键的时刻，湖泊水质变化亦将出现历史性拐点，并随着“六大工程体系”各项措施的逐步有序推进，实现滇池治理的目标指日可待，云南省委、省政府提出的“滇池清、昆明兴”宏伟蓝图亦将顺利实现。

本书是集体智慧的结晶。作者的科研团队以极为严谨的科学态度参加了编写工作，为本书作出了贡献。本书各章编写分工如下。前言：浦承松，马巍，梅伟，王建春；第1章：马巍，浦承松，顾世祥，谢波；第2章：浦承松，马巍，黄伟；第3章：浦承松，谢波，梅伟、周云、罗佳翠、张玉蓉、苏建广、陈欣、孙艳、杨树德；第4章：马巍，周丰，徐天宝；第5章：周丰，马巍，张仲伟，汤云婷；第6章：马巍，浦承松，罗佳翠，张玉蓉；第7章：马巍，浦承松，陈欣，骆辉煌，杨萧，黄玉美；第8章：马巍，梅伟，浦承松，周云。全书由马巍统稿，马巍、浦承松、谢波校稿。

云南省水利厅副厅长、牛栏江-滇池补水工程建设指挥部常务副指挥长刘加喜对本项研究工作给予了大量的关心和支持，并在百忙之中为本书作序，水利部水利水电规划总院廖文根副总工、云南省水利厅张天明总工、高嵩总规划师、李伯根处长、蔡云华处长对本项研究工作进行了大量指导，参与此项研究工作的还有李锦秀、禹雪中、李翀、李科国、彭文启、邓雯、刘晓波、马莉青、蒋艳、冯顺新、殷淑华、冯晓东、谢志国、杜学才、周锐等，在编

写过程中，得到了云南省水利厅、云南省牛栏江-滇池补水工程领导小组办公室的大力支持，在此一并致谢。

由于时间有限，本书难免有疏漏之处，请读者不吝指正。

作 者

2014 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外有关调水工程概况	2
1.3 牛栏江-滇池补水工程论证的技术需求	8
第 2 章 滇池流域自然环境概况	14
2.1 滇池流域自然环境特征	14
2.2 滇池流域经济社会状况	22
2.3 滇池流域水环境质量状况	23
2.4 滇池流域水体污染成因及防治对策研究	40
第 3 章 滇池流域水资源优化配置方案	46
3.1 滇池流域水资源基本特征	46
3.2 滇池流域经济社会发展的水资源需求	51
3.3 滇池湖泊水环境改善的水资源需求	58
3.4 滇池流域可供水量分析	63
3.5 滇池流域水资源优化配置方案	65
3.6 牛栏江-滇池补水工程的战略地位和作用	67
3.7 牛栏江-滇池补水工程及规模确定	70
3.8 小结	75
第 4 章 滇池流域水环境数值模拟关键技术	77
4.1 研究思路	77
4.2 滇池流域水文与非点源过程模拟技术	79
4.3 复杂地形影响下滇池水环境模拟技术	97
第 5 章 滇池流域入湖污染物总量控制方案	123
5.1 滇池流域水污染治理方案与实施效果	123
5.2 规划水平年滇池流域入湖污染负荷预测	133
5.3 规划水平年滇池水环境容量核算	150
5.4 滇池流域水环境容量控制优化方案	157
5.5 小结	162

第6章 牛栏江补水改善滇池水环境效果预测..... 165

6.1 滇池湖泊水动力特性 165

6.2 引水对滇池水动力水质影响分析 171

6.3 牛栏江补水对滇池水质改善效果预测 180

6.4 小结 209

第7章 牛栏江-滇池补水工程入湖实施方案 211

7.1 环湖截污工程入湖负荷控制效果分析 211

7.2 牛栏江-滇池补水工程入湖实施方案研究..... 221

7.3 牛栏江-滇池补水近期入湖水质改善效果预测..... 269

7.4 牛栏江-滇池补水近期入湖水量水质监测方案..... 292

7.5 2013—2015年滇池运行调度方案 298

7.6 小结 298

第8章 结语..... 301

8.1 主要研究成果 301

8.2 建议 306

参考文献 307

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

滇池地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带,流域面积 2920km^2 ,是昆明市生存和发展的摇篮,具有工农业用水、调蓄、防洪、旅游、航运、水产养殖和调节气候等多种功能,对昆明市经济社会发展和“四季如春”的宜人气候形成至关重要。滇池四周自然景色十分秀丽,东有金马山,西有碧鸡山,北有蛇山,南有白鹤山;名胜古迹荟萃,沿岸有“万里云山一水楼”大观楼,滇中名胜之首西山公园,湖光掩映的观音山,深处柳荫的疗养胜地白鱼口,郑和故里昆阳的月山公园等。北部有一天然湖堤将滇池分隔为南北两片水域,中间有一航道相通。北部水域俗称草海,水面面积 10.8km^2 (1887.4m 高程时,下同);南部水域俗称外海,湖面面积 298.2km^2 ,是滇池的主体部分。1997 年位于滇池草海西岸的西园隧道工程竣工以后,天然湖堤得到进一步加固并修筑了船闸及节制闸,成为现今分隔草海、外海水体的船闸大堤。草海、外海各有一个人工控制的出口,分别为位于西北端的西园隧道和西南端的海口中滩闸,其中西园隧洞设计最大泄量为 $40\text{m}^3/\text{s}$,海口河设计最大泄量 $80\text{m}^3/\text{s}$ 。滇池湖岸线长 163km ,湖水面积为 309km^2 ,平均水深 5.3m ,湖容积 15.6 亿 m^3 。

滇池四周群山环抱,中间为滇池盆地,汇集了滇池流域所有来水,包括环湖四周高强度的农田开发形成的非点源污染径流。滇池地处昆明市主城区下游,承纳了昆明主城区所有的生产和生活废污水,加之滇池流域地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带,流域水资源总量十分有限 (5.55 亿 m^3),且流域内人口稠密,人均年水资源量不足 200m^3 ,仅为云南省平均水平的 $1/30$,与全国著名缺水地区京津塘的人均水资源量相当,属水资源严重匮乏地区。日益匮乏的水资源问题,致使湖泊生态环境用水被严重挤占,同时大量的城市生活、生产废污水源源不断地排入滇池,直接导致滇池流域水环境问题日益突出,湖泊水质污染日益严重,湖泊蓝藻水华常年暴发,从而出现资源性和水质性缺水共存的局面。“水少、水脏、水景观差”问题是长期困扰滇池治理的难题。

20 世纪 60 年代滇池水质为 II 类,70 年代下降到 III 类,70 年代后期水质逐渐变差,至 80 年代中后期,草海水质下降到 V 类,外海为 IV 类;90 年代草海水质为劣 V 类,外海为 V 类。进入 21 世纪,滇池草、外海水质均长期维持在劣 V 类水平。滇池水环境快速恶化,不仅严重破坏了湖泊水生态系统平衡,影响了昆明市旅游业发展;而且还对以滇池为水源的昆明市城市供水系统造成了巨大压力,并不得不从近百公里外的掌鸠河、清水海等地调水解决昆明市主城区供水问题,以保证昆明城市供水安全。

长期以来,滇池严重的水环境问题得到了中央和地方各级政府的高度重视,并采取了一系列的工程措施、管理措施和生物措施,对滇池流域水污染问题进行综合治理。滇池流



域先后实施了草海底泥疏浚、截污和污水集中处理、农村面源污染治理、生态系统修复及水土流失治理等工程,采取限期治理、达标排放、执法监督等措施。如1998年10月1日开始实施的滇池流域禁磷限磷活动,使流域内的无磷洗衣粉覆盖率达到90%以上;1999年3月31日起开展全流域工矿企业废水达标排放检查的“零点行动”,并在流域内建设8个集中污水处理厂,组建了昆明市排水公司;1997年6月开工建设滇池北岸截污工程;1999年4月开始实施的草海污染底泥疏浚、滇池蓝藻清除、松华坝水库内谷昌坝疏挖等措施;松华坝、柴河、大河等水库径流区植树造林及滇池防护林建设,大观河治理、盘龙江淤泥疏浚、湖滨农村面源污染控制,水土流失整治等面源污染治理措施。“十五”和“十一五”期间,各级部门加大了滇池水污染治理力度,其中“十一五”期间共完成投资171.42亿元,涉及67个项目。完成投资中,中央投资23.36亿元,占总投资的13.6%;省级投资54.32亿元,占总投资的31.7%;市级投资93.74亿元,占总投资的54.7%。上述项目的实施对滇池入湖污染物控制、流域生态修复和入湖河道治理等起到了重要的作用,滇池水污染防治取得了阶段性成果。但水体富营养化、生态环境恶化和水资源严重匮乏的状况尚未根本扭转,治理工作的长期性、复杂性、艰巨性仍十分突出,距离水功能区划的水质目标还有较大差距。

借鉴国内外湖泊治理的成功案例,并总结过去几十年来滇池治理的经验与教训,云南省和昆明市及时调整了滇池治理思路,以流域为单元,突出综合治理,从源头抓起,将污染治理与产业结构、城乡布局调整相结合;以污染治理为重点,充分与已有工作相衔接,强调综合治理的系统性,从而构建了“五大任务”和“六大工程体系”。五大任务主要包括:转变发展方式,统筹城乡发展;点面结合,全面开展入湖污染治理;采用多种措施,修复和保护生态环境;通过水资源调配,解决流域缺水;加强科技示范和监管能力建设。六大工程体系主要包括:环湖截污和交通工程、外流域调水及节水工程、入湖河道整治工程、农业农村面源治理工程、生态修复与建设工程、生态清淤工程。从入湖污染物治理、生态修复与重建、补充流域水资源3个方面构建综合治理工程体系。其中入湖污染物治理包括环湖截污和交通工程、入湖河道治理工程、农村农业面源治理工程,旨在从源头上阻断污染物入湖,是综合治理和湖泊水质改善的关键性工程,直接关系到滇池水环境治理的成败;生态修复与重建包括生态修复与建设工程、生态清淤工程,是阻断入湖污染物后,巩固治理效果、恢复河湖自然生态必备的手段,是治理效果可持续性的保证;外流域引水及节水工程是解决滇池流域内水资源严重短缺,滇池流域河湖生态用水严重被挤占、湖泊换水周期过长,只靠入湖污染物治理和生态修复不能达到预期治理目标情况下的必然选择。这六大重点工程体系层层递进,互为补充,是滇池水环境综合治理的核心内容。

1.2 国内外有关调水工程概况

地球上可利用的河川径流及湖库水资源的空间分布十分悬殊。以干旱著称的非洲,虽然有一半面积年均降水量在500mm以下,但刚果盆地和几内亚海湾沿岸一带年降水量却超过1500mm。苏联水资源总量较为丰富,其河川年均径流量仅次于巴西,位居世界第2位,但人口稀少的北部和东部高寒地区却占苏联水资源总量的88%;而集中了3/4人口



和 4/5 的工农业产品的南部和西南部水资源量仅只占 12%。美国东部湿润，水资源较丰富；西部干旱，年降水量多在 550mm 以下，其中有的地区不足 100mm。我国东南沿海和西藏东部湿润，年降水量多在 1000~2000mm，其中墨脱地区年降水量多达 3000~4000mm；而西北地区干旱，年均降水量只有 164mm，仅占全国年均降水量的 9.5%，其中新疆塔里木盆地中心部分仅为 10mm（陈玉恒，2002）。于是大规模、长距离、跨流域调水就自然成为人类重新分配水资源，缓解缺水地区供需矛盾的主要途径，引起国际社会的广泛重视，自 20 世纪中期跨流域调水规划便应运而生了。据不完全统计，目前世界已建、在建和拟建的大规模、长距离、跨流域调水工程超过 160 项，分布在 24 个国家，其经济效益和社会效益明显。

1.2.1 国外主要跨流域调水工程概况

在世界的大江大河上几乎都能找到跨流域调水工程的影子。世界著名的调水工程有：美国加利福尼亚州的北水南调工程、以色列的北水南调工程、澳大利亚的雪山工程、秘鲁东水西调工程、巴基斯坦的西水东调工程等，苏联的调水工程更是世界著名（陈玉恒，2002；庆晋，2004）。

1. 美国：北水南调工程

美国已建大型调水工程 10 多处，但从工程规模、调水量、调水距离、工程技术和综合效益等方面衡量，最具代表性的是加利福尼亚州的北水南调工程，这也是美国最大的多目标开发项目。美国西海岸地区，狭长形，位于美国西南部，西临太平洋，面积 41 万 km^2 ，人口 2300 万人。加利福尼亚州北部气候湿润，萨克拉门托河水量丰沛；南部地势平坦，干旱少雨，光热条件好，是美国著名的阳光地带，圣华金河流域及以南地区水资源短缺。全州年径流量 870 亿 m^3 ，其中 75% 分布在北部，而 80% 的需水量位于南部。为了开发南部，联邦政府建设了中央河谷工程，加利福尼亚州政府建设了北水南调工程，两项工程相辅相成，共同把加利福尼亚州北部丰富的水资源调到南部缺水地区。此外，为缓解加州南部缺水，还建设了科罗拉多水道工程和洛杉矶水道工程。

2. 以色列：北水南调工程

以色列北部湿润，南部干旱，降水多集中在每年冬季 11 月至次年 3 月，4—10 月为干旱少雨的季节，中北部年降水量约为 400~1000mm，南部年降水量为 25~250mm，年降水总量约 100 亿 m^3 ，利用率约 18%，其余则蒸发及注入海洋。由于南北降水相差悬殊，水资源地区分布极不均衡，即 80% 的水资源在北方，2/3 需要灌溉的土地却在南方，南部地区严重干旱缺水，给经济和社会发展，尤其是农业发展带来很大困难。

北水南调工程是以色列最大的工程项目，也是以色列中南部的用水命脉和生命线，亦称以色列国家输水工程，即把北方较为丰富的水资源输送到干旱缺水的南方。起始水源地位于以色列东北部的太巴列湖，太巴列湖东为叙利亚，西为以色列，由于地处裂谷，湖水位为 -213~-209m，高低水位差之间水容积为 6.7 亿 m^3 ，作为湖泊运行控制，湖底最深处 -253m，湖水面积 168 km^2 ，高水位时太巴列湖可蓄水 43 亿 m^3 ，除去损耗及下泄约旦河 0.4 亿 m^3 ，以色列北水南调工程年均抽太巴列湖水 4.0 亿 m^3 左右。



3. 澳大利亚：东水西调工程

澳大利亚位于南半球，四面临海，国土面积 768 万 km^2 ，全境年平均降水仅有 470mm，是世界上降水量较少的地区；加之气候干旱、蒸发量大，因此又是一个水资源相对短缺的国家。为解决内陆干旱缺水问题，澳大利亚在 1949—1975 年期间修建了第一个调水工程——雪山工程，该工程位于澳大利亚东南部，运行范围包括澳大利亚东南部 2000 km^2 的区域，通过大坝水库和山涧隧道网，从雪山山脉的东坡建库蓄水，将东坡斯诺伊河的一部分多余水量引向西坡的需水地区。沿途利用落差发电供首都堪培拉、墨尔本、悉尼等城市民用和工业用电，同时可提供灌溉用水 74 亿 m^3 。该工程耗时 25 年，总投资 9 亿美元，是全世界最庞大、最复杂的综合水利和水电站工程之一，被认为是现代世界七大土木工程奇观之一。

4. 巴基斯坦：西水东调工程

巴基斯坦大部分地区为亚热带气候，南部为热带气候，年均降水量不足 300mm，干旱、半干旱地区占国土面积的 60% 以上。巴基斯坦为农业国，耕地集中在印度河平原，由于气候干旱，农业生产很大程度依靠引水灌溉。印度河是巴基斯坦最主要的河流。印度河流域灌溉历史悠久，有世界上最大的灌溉系统。巴基斯坦西水东调工程是当今世界上调水量最大的工程，年调水量为 148 亿 m^3 。印度河发源于中国，经克什米尔进入巴基斯坦，全长 2880km，年径流量 2072 亿 m^3 。巴基斯坦为开发利用印度河水资源和水电资源发展经济，于 1958 年实施印度河流域计划，包括西水东调工程，从西三河向东三河调水，工程于 1960 年开始实施，到 1977 年基本建成。工程总投资 21 亿美元，灌溉农田 2300 万亩。工程进一步完善印度河平原的灌溉体系，使东三河流域广大平原地区的农、牧、工业等获得持续不断的发展，并使巴基斯坦由原来的粮食进口国变成不仅粮食自给，而且每年还可以出口小麦 150 万 t、大米 120 万 t 的国家。

目前世界上著名的调水工程除了上面介绍的，还有非洲最大的引水项目——莱索托高地工程、印度萨尔达-萨哈亚克调水工程、哈萨克斯坦额尔齐斯-卡拉干达运河调水工程、伊拉克的底格里斯-塞尔萨尔湖-幼发拉底调水工程和马来西亚的东水西调计划等。苏联已建的大型调水工程有 15 项之多，年调水量达 480 多亿 m^3 ，主要用于农田灌溉，国内进行调水工程研究的研究所就有 100 多个。所有这些工程，都发挥了显著的生态效益和经济效益，直接影响到各国国力的增强，同时，也为我国南水北调工程和牛栏江-滇池补水工程、滇中引水工程等提供了有益的借鉴。

1.2.2 国内有关跨流域调水的相关典型案例

我国多年平均水资源总量为 28124 亿 m^3 ，其中多年平均河川径流量为 27115 亿 m^3 ，仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国、印度尼西亚，居世界第六位（李浩然等，2007）。我国人均水资源量为 2189 m^3 ，仅为世界平均值的 29% 左右，居世界第 121 位（宋先松等，2005）。同时受季风气候的影响，我国水资源的时空分布极不均衡，总体上由东南沿海向西北内陆逐渐减少，北方地区水资源贫乏，南方地区水资源相对丰富；夏秋季节雨水相对较多，冬春季节雨水稀少。由于我国水资源时空分布不均，加之南北方水资源与人口、耕地呈逆向分布，北方地区人多水少，单位耕地面积水资源量较低，农业灌溉用水紧



张,地下水超采非常严重,严重制约了农业的进一步发展,尤其是西北地区,农业用水挤占了生态用水,导致区域生态环境持续恶化;南方地区经济社会较发达,但河湖水质污染较重,水质型缺水现象较为普遍,如“三湖(太湖、巢湖和滇池)”地区。结合国内外的调水经验,实施大规模、长距离、跨流域的调水就自然成为我国重新分配南北方水资源,缓解北方缺水地区(尤其是黄淮海流域及西北内陆河地区)供需矛盾的主要途径,使水资源跨流域的合理配置成为支撑我国经济社会可持续发展的必然选择。

目前我国跨流域或区域水资源配置工程主要包括三类:

(1)以解决流域或区域性水资源短缺为主,以保障受水区经济、社会与人口、资源与生态环境的协调发展,如南水北调工程、滇中引水工程、引黄济津工程、东深供水工程等。

(2)作为流域或区域水环境综合治理对策的有机组成部分,引相对清洁的水源进入受纳水域,以加快受纳水域的水动力条件,提高受纳水体的自净能力,缓解受水流域的水质污染情势,改善区域水环境质量,如引江济太工程、引钱(唐江)济西(湖)工程、引江济巢(湖)工程、牛栏江-滇池补水工程等。

(3)通过水利工程恢复历史原有的河湖水系连通格局,有效减缓因自然环境变迁和近代人类活动加剧对区域河湖水系和区域水资源配置的双重影响,并减缓人类活动对连通湖泊水质的影响,改善湖泊水生态环境质量,如武昌大东湖生态水网连通工程、呼伦湖水资源配置工程等。下面分别以南水北调工程、引江济太工程及武昌大东湖生态水网工程为代表,进行简要分析与说明。

1. 南水北调工程

南水北调工程是解决我国北方黄淮海流域水资源严重短缺问题的特大型基础设施项目,通过跨流域调水进行水资源的合理配置,以保障受水区经济、社会与人口、资源、环境的协调发展。南水北调工程始于1952年毛泽东主席提出“南方水多,北方水少,如有可能,借点水来也是可以的”宏伟设想。1959年原长江流域规划办公室编制完成的《长江流域综合利用规划要点报告》中,提出分别从长江上、中、下游多处取水,调往西北和华北,接济黄河、淮河和海河的南水北调工程方案。水利部与有关部门和省(直辖市、自治区),通过50多年的规划设计、科学研究和反复研究论证,同时积极响应社会各界提出的众多建议方案或设想,规划选定了南水北调工程东线、中线、西线的调水水源、调水线路和供水范围,与长江、黄河、淮河和海河四大江河相互联接,构成“四横三纵”的工程总体布局。

长江是我国最大的河流,水资源丰富且较稳定,多年平均年径流量约9600亿 m^3 ,特枯年有7600亿 m^3 ,入海水量约占天然径流量的94%以上。从长江流域调出小部分水量,缓解北方地区缺水是可能的,这是南水北调工程选择以长江为水源地的基本依据。同时,从长江调水地理条件优越。长江自西向东流经大半个中国,上游靠近西北干旱地区,中下游与最缺水的黄淮海平原及胶东半岛相邻,兴建跨流域调水工程在经济技术条件方面具有显著优势。

全面分析研究我国的地势、山脉、水系、水土资源分布状况和经济社会状况及其发展趋势,是拟定以长江为水源的南水北调工程布局的依据。南水北调工程东、中、西3条线



路的总体布局,可基本覆盖黄淮海流域、胶东地区和西北内陆河部分地区,基本可以安全、经济地解决北方缺水地区的需水与供水矛盾。西线工程布设在我国最高一级台阶的青藏高原上,居高临下,具有供水覆盖面广的优势;但长江上游水量有限,且工程任务艰巨、投资大,主要向黄河上中游和西北内陆河部分地区供水,相机向黄河下游地区补水。中线工程近期从长江一级支流汉江引水,远景从三峡库区取水。东线工程直接从长江干流下游取水,水量丰富,但因输水线路所处地势较低,在黄河以南需逐级抽水北送,黄河以北地区可以自流,故宜向黄淮海平原东部和胶东地区供水。

南水北调工程东线、中线、西线3条输水线路,可利用黄河由西向东贯穿我国北方的天然优势,采取工程措施后可以与黄河相连接,并通过优化运行调度,实现南水北调工程和黄河之间的水量合理配置。东线工程可利用现有的东平湖退水闸或穿黄工程的南岸输水渠退水闸向黄河补充长江水,又可通过位山引黄渠道、胶东地区输水工程由黄河补给山东的部分用水量。中线工程一方面在穿黄工程南岸设置了退水闸,遇汉江、淮河丰水年,在黄河枯水时可向黄河补水;另一方面规划了从黄河待建的西霞院水库与中线总干渠的连接渠,遇汉江特枯年份,可引黄河水进入中线总干渠应急补水,提高黄河以北地区的供水保证程度。西线工程建成后,除向黄河上中游和西北内陆河部分地区补水外,还可以通过黄河向中线和东线的输水渠道补水。

南水北调工程东线、中线、西线到2050年规划调水总规模为448亿 m^3 ,可基本满足受水区水资源严重短缺的状况,并逐步遏制因严重缺水而引发的生态环境日益恶化的局面。同时依托南水北调工程总体规划方案,随着“四纵三横”骨干水网的逐步形成和畅通,各流域和水系之间通过建设控制建筑物进行水力连接,运用现代化的测报、预报以及通信和监控手段,实施大范围的水资源优化调度,可较大幅度地提高各地区的供水保证程度和充分发挥南水北调工程的效益。

东线工程从长江下游引水,水源丰沛,可利用现有泵站和河道,工程较简单,投资较小,易于分期建设。黄河以南需建设13级泵站提水,总扬程65m。输水工程90%以上可利用现有的河道,沿线有洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖等湖泊调蓄。沿线现有的河道、湖泊均有行洪、排涝、航运和调水功能,省际和地区间水事矛盾多,运行管理较复杂,且沿线水质污染问题突出,尤其是南四湖与东平湖周边地区污染较突出,这是实现东线工程的难点。

中线工程地理位置优越,可基本自流输水,工程投资较大。水源水质好,规划输水线路与现有河道全部立交,水质易于保护。输水渠线所处位置地势较高,可解决北京、天津、河北、河南4省(直辖市)京广铁路沿线城市供水问题,有利于改善受水区生态环境。近期从丹江口水库取水,远景可根据黄淮海平原的需水要求,从三峡库区调水到汉江,有充足的后续水源。作为中线近期水源的丹江口水库,从保证调水并结合防洪要求,需要按正常蓄水位170m加高大坝,移民安置约25万人将成为工程建设的重点和难点问题;同时为避免和减轻调水对汉江中下游工农业取水、航运和生态环境的影响,需要采取必要的工程措施。

西线工程从长江上游通天河、大渡河、雅砻江及其支流调水,与黄河上游距离较近,控制范围大,可向黄河上中游6个省(自治区)及西北内陆河部分地区供水,也可向黄河