



太湖流域

河湖连通工程水环境改善 综合调控技术



吴时强 周杰 李敏 刘俊杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



太湖流域 河湖连通工程水环境改善 综合调控技术

吴时强 周杰 李敏 刘俊杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

太湖流域是我国典型的平原河网地区,河网水系错综复杂,社会经济发达,城镇化率高,保障流域防洪安全、水资源供给、水环境改善需求是流域河湖水系连通工程体系调控的三大目标。本书在回顾太湖河湖连通工程体系演变的基础上,针对其现状及近期规划实施的工程,分析了工程体系现状调控水动力变化及水环境效果,评价了工程体系调控改善水环境综合效应,研究了综合调度的环境风险评估与应急措施,提出了河湖连通工程体系综合调度技术和应对策略,为太湖流域河湖连通工程体系完善和综合调控方案的制定提供了技术支撑。

本书可供关心和研究太湖流域水环境治理以及河湖连通工程体系调控技术的技术人员和管理者借鉴和参考,也可供水利、环境等专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

太湖流域河湖连通工程水环境改善综合调控技术 / 吴时强等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-3984-6

I. ①太… II. ①吴… III. ①太湖—流域—水资源管理—研究②太湖—流域—水环境—环境管理—研究 IV. ①TV213. 3②X524

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321393号

审图号:GS(2016)2817号

书 名	太湖流域河湖连通工程水环境改善综合调控技术
作 者	吴时强 周杰 李敏 刘俊杰 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
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18印张 445千字 12插图
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
印 数	0001—1000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



前言

河湖水系是水资源的载体，是水环境的重要组成部分，是社会经济发展的重要支撑。在全球气候变化、极端水旱灾害事件频发、经济社会高速发展、水资源短缺与生态环境渐趋恶化等形势下，河湖水系连通工程作为提高水资源统筹调配能力、改善水环境质量状况和增强抵御水旱灾害能力的一种治水方略，已经远远超出了单一水系连通性的学术研究范畴。河湖水系连通工程体系调控，不仅影响流域水资源配置适宜性，而且会对水循环伴随的水环境质量演变产生重要影响，并进一步影响抵御水旱灾害的能力。

近年来，由于河网、湖泊水体水质下降趋势加剧，在截污控源的同时，利用河湖连通工程调控来改善水生态环境已经成为减缓水环境恶化趋势的重要手段。全国重点污染治理的“三湖”均采用河湖连通工程调度方式来改善水系湖泊水环境状况，如引江济巢工程设有凤凰颈、白荡湖、菜子湖三条江湖连通通道，以重建江湖动态联系方式，通过扩大江湖水量交换和加快河湖水体流动，提高巢湖水体自净能力和缩短巢湖换水周期，促进巢湖污染综合治理和水环境状况改善。滇池是我国六大重要淡水湖泊之一，20余年来，滇池草海水质一直为劣Ⅴ类，外海水质在Ⅴ类和劣Ⅴ类之间波动，滇池水环境急剧恶化，水生植物面积锐减，生物多样性被严重破坏。多年来，采取环湖截污、入湖河道综合整治、农村面源治理、生态修复与重建、生态清淤和外流域调水等综合治理措施，加快水污染治理进程，其中截污控污是根本，调水补水是关键。在力行全面截污控污的基础上，通过金沙江支流牛栏江—滇池补水工程等外流域调水补充滇池清洁水，解决了滇池流域水资源严重短缺的“瓶颈”问题，增强了水资源承载能力，加快了水体循环和交换，逐步恢复了滇池流域良性水生生态，达到了最终实现滇池水环境改善的初步效果。

太湖流域北依长江，太湖居中，平原河网湖泊棋布，沟通长江、太湖及

平原湖泊的水系发达。太湖水系由太湖和周围的水网组成，由于人工控制工程的修建，影响了太湖流域水系与长江水系的自然连通性，降低了太湖流域河网与长江水体之间的交换能力，改变了原有河网水系的水体流动性，也导致太湖河网湖泊水系成为强人工干预性水系，客观上削弱了河网水系与湖泊水体的自净能力，减少了河网水体环境容量，近 20 年来，随着流域经济快速发展和人口的高度集聚，流域污染负荷不断增加，加快了流域水环境恶化和湖泊富营养化趋势。

1991 年发生流域性洪水之后，国务院制订并全面实施了《太湖流域综合治理总体规划方案》，通过 11 项骨干工程的建设，重点提升流域防洪排涝能力。经过多年的努力，太湖流域已初步建成了可供引排调节和控制水流的防洪工程体系，提高了流域防洪标准，可有效防御 1954 年型洪水，也初步形成了利用调水引流技术改善区域水环境的基础设施条件。2002 年 1 月，水利部门启动了引江济太调水试验工程，通过望虞河调引长江水进入太湖流域，增加流域水资源的有效供给，湖区水体水质和流域有关河网水环境得到一定的改善，保障了流域供水安全，提高了水资源和水环境的承载能力，发挥了连通工程在水环境改善方面的作用。在应对 2007 年蓝藻暴发等事件中起到了极大的作用，缓解了区域水环境恶化的趋势。但由于目前流域性调控措施相对较为单一，主要依赖望虞河引水与太浦河排水以及渎山泵站等组成的连通工程，无法满足流域水环境改善的需求。为此自 2007 年蓝藻事件之后，国务院又制定了《太湖流域水环境综合治理总体方案》，厘清了太湖污染的现状和主要问题，明确了太湖水环境治理的总体思路和总目标，涉及江湖连通工程的新孟河延伸拓浚工程、新沟河延伸拓浚工程、走马塘拓浚延伸工程和望虞河西岸控制工程、平湖塘延伸拓浚工程、太嘉河工程等，构建较为完善的流域性江河湖连通工程体系，促进河网水系水体整体流动性，提高流域整体水环境容量，达到改善流域河网水系及湖泊水环境的目标。

随着流域河湖连通工程体系逐步完善，如何充分发挥河湖连通工程体系调水改善区域水环境的综合作用，协调好区域水环境改善和河湖连通工程体系调度措施的关系，减小其不利影响，是一个值得研究的课题。为此，南京水利科学研究院联合太湖流域管理局水利发展研究中心、江苏省水文水资源勘测局共同申报并获批水利部公益性行业专项“河湖连通工程水环境改善综合调控技术”（201301041），针对太湖流域河网水系及湖泊，在评价河湖水系连通工程格局现状及近期连通规划工程的基础上，分析河湖水系连通工程调控对流域河网水系及湖泊水流动力条件的响应关系，研究河湖水系连通工程

调控与水环境主要评价指标变化规律,评估主要连通工程体系综合调控下流域河网水系及湖泊水环境改善效果及控制能力,指出河湖水系连通工程体系存在的局限性,分析河湖连通工程综合调控的水环境风险,提出水环境改善的河湖水系连通工程综合调控技术与策略,为河湖水系连通工程布局调整及综合调控方案的制订提供技术支撑。

本书主要以该项目研究成果为基础,结合其他相关项目成果编著而成。本书共分8章,第1章综述了国内外河湖连通状况及水环境效果评价与调控技术;第2章介绍了太湖流域河湖连通演变及工程状况;第3章分析评价了太湖流域河湖连通工程现状调控水动力变化及水环境效果;第4章结合流域河湖连通工程体系规划,设置了不同分析情景及调度原则;第5章分析评价了不同情景下河湖连通工程调水引流改善水环境综合效应;第6章评估了不同风险源下河湖连通工程体系综合调度的环境风险,提出了相应的应急措施;第7章根据前几章的研究成果,提出了河湖连通工程综合调控技术,探讨调控策略;第8章总结并提出了河湖连通工程体系调控策略和展望。

书稿由吴时强、周杰统稿,第1、2章由吴时强、周杰、李敏、蔡梅撰写,第3章由马倩、刘俊杰撰写,第4章由周杰、吴修锋撰写,第5章由周杰、吴时强、戴江玉撰写,第6章由李敏、蔡梅、王元元撰写,第7章由周杰、李敏、王元元撰写,第8章由吴时强、周杰撰写,杨倩倩参加了本书编著过程的部分校对工作。

研究工作中,得到了太湖流域管理局、江苏省水利厅、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、上海勘测设计研究院有限公司、河海大学、中国科学院地理与湖泊研究所、南京大学等单位领导、专家的大力支持和指导,同时也感谢参与本项目研究工作的沙海飞、戴江玉、范子武、庞翠超、吕学研、邵军荣、肖潇、杨倩倩、王芳芳、王威、曹浩、王勇、何建兵、李蓓、陈红、周宏伟、潘明祥、陆志华、韦婷婷、章杭惠、陈凤玉、李昊洋、陆小明、胡尊乐、沈国华、郑建中、高鸣远等的合作和帮助。本书的出版也得到了南京水利科学研究院出版基金的资助,一并表示感谢。

鉴于太湖流域河湖水系复杂,水生态环境问题凸显,河湖连通工程体系涉及因素众多,情景设计等尚有诸多不确定因素,加上作者水平有限,书中难免有偏颇、遗漏和不妥之处,恳请广大读者和同行批评指正,以利今后深入研究。

作者

2015年12月



前言

1 绪论	1
1.1 河湖连通工程由来及功能演变	1
1.1.1 河湖水系自然演变与格局	1
1.1.2 河湖连通工程类型与功能	2
1.1.3 河湖水系功能演变	5
1.2 国内外河湖连通状况	6
1.2.1 国外河湖连通状况、典型案例	6
1.2.2 国内河湖连通状况、典型案例	8
1.2.3 目前河湖连通面临的问题	9
1.3 工程体系调控作用及水环境改善评价方法	11
1.3.1 河湖连通工程体系调控技术与效果	11
1.3.2 河湖连通工程水环境改善效果评价方法	12
1.4 河湖连通调控技术研究现状	14
2 太湖流域河湖连通演变及工程状况	16
2.1 流域概况	16
2.1.1 自然概况	16
2.1.2 经济社会概况	16
2.1.3 水利区划	18
2.2 太湖流域河湖连通演变	21
2.2.1 水系演变	21
2.2.2 治水进程	23
2.3 太湖流域河湖水系连通格局分析	24
2.3.1 以区域防洪为主要功能的河湖连通水系格局	25
2.3.2 兼顾水环境改善功能的河湖连通水系格局	25

2.3.3	快速城镇化影响下的河湖连通水系格局	26
2.4	太湖流域水环境现状及改善需求	27
2.4.1	水环境动态演变	27
2.4.2	水环境现状	28
2.4.3	水环境改善需求	30
2.5	太湖流域水利工程体系及其环境效应	32
2.5.1	现状工程体系	32
2.5.2	规划工程体系	34
2.5.3	工程体系的水环境效应	38
3	河湖连通工程现状调控水动力变化及水环境效果分析	42
3.1	河湖连通工程调控实践	42
3.1.1	望虞河调水引流实践	42
3.1.2	湖西区调水引流实践	44
3.2	调水引流工程运行对沿线河网及湖区水量时空分布的影响及其水环境效果	47
3.2.1	引江对望虞河西岸水位的影响	47
3.2.2	引江对望虞河西岸水流特征影响	48
3.3	现有河湖连通工程调控影响区域及流域河湖水系连通工程现状水环境 改善调控能力评估	51
3.3.1	调水引流对望虞河水环境影响分析	51
3.3.2	调水引流对望虞河西岸河网水环境影响分析	55
3.4	引水调控对贡湖湾水质的影响	64
3.4.1	监测点位布置	65
3.4.2	引水对贡湖湾水环境的影响	67
3.4.3	引水对贡湖湾藻类的影响	73
3.5	存在的问题及对策	75
3.5.1	存在的问题	75
3.5.2	对策与措施	78
4	河湖连通工程体系综合调控方法	82
4.1	数学模型及参数率定	82
4.2	太湖流域调水引流工程综合调控目标和原则	87
4.2.1	调控目标	87
4.2.2	调度原则	91
4.3	流域调控情景设置及综合调控分析工况设计	93
4.4	河湖连通多目标综合调控问题探讨	95
5	河湖连通工程调水引流改善水环境综合效应评价	98
5.1	河湖连通工程体系对长江与太湖流域之间水量交换的驱动作用	98
5.1.1	引江济太调度	98

5.1.2	太浦河大流量供水试验性调度	98
5.1.3	区域引排调度实践	99
5.1.4	连通调控促进河网与长江水量交换	100
5.2	典型调控方案下河网水系及湖泊水流驱动作用及其水循环系统水动力特性 ...	102
5.2.1	走马塘工程	102
5.2.2	新沟河延伸拓浚工程	108
5.2.3	新孟河延伸拓浚工程	113
5.3	江湖水系连通工程对流域水环境的改善效应	118
5.3.1	走马塘工程	118
5.3.2	新沟河延伸拓浚工程	130
5.3.3	新孟河延伸拓浚工程	138
5.4	连通工程体系综合调控对太湖的影响	145
5.4.1	太湖水动力特点	145
5.4.2	调水引流对湖区水动力的影响	150
5.4.3	调水引流对湖区水环境的影响	157
6	河湖连通工程体系综合调度的环境风险评估与应急措施研究	164
6.1	河湖连通工程综合调控的防洪、水资源、水环境风险评估方法	164
6.1.1	风险评估方法	164
6.1.2	风险评估方法在水相关领域的应用	167
6.1.3	太湖流域水量水质模拟系统	168
6.2	太湖流域河湖连通工程综合调控风险评估及应对调控措施	170
6.2.1	风险情景设计	170
6.2.2	流域骨干引水河道常态引水的污染迁移风险分析	177
6.2.3	遭遇区域突发性暴雨风险评估与应对	206
6.2.4	遭遇流域性干旱风险评估与应对	227
6.2.5	遭遇流域水环境风险情景评估与应对	245
6.3	应急调控预案	257
6.3.1	流域引水过程遭遇区域突发性暴雨风险应急预案	257
6.3.2	取调水过程遭遇流域性干旱枯水风险应急预案	258
6.3.3	引供水过程遭遇流域水环境风险应急预案	259
7	河湖连通工程综合调控技术与策略研究	260
7.1	改善河网水环境的河湖连通工程体系调控技术	260
7.1.1	新孟河延伸拓浚工程引水初期调控技术	260
7.1.2	湖西区入太湖水质控制调控技术	261
7.1.3	望虞河与走马塘联合调度技术	262
7.2	太湖流域河网区水体有序流动的调控对策探讨	262
7.3	规避或降低风险的应急调控对策及应对策略	264

7.4 河湖连通工程体系调控策略	266
7.4.1 常态调控策略	266
7.4.2 应急调控策略	268
8 河湖连通工程综合调控效果与对策	270
参考文献	275

1 绪 论

1.1 河湖连通工程由来及功能演变

1.1.1 河湖水系自然演变与格局

地表水与地下水分水线所包围的集水区或汇水区称为流域,流域内所有河流、湖泊等各种水体,组成脉络相通的水网系统,称为水系。自然状态下的河湖水系由水流自由发展而成,是经过自然演变后形成的具有自然性和完整性的网络系统。河、湖、沼泽、湿地、地下水、地表水、环境是水系网络的节点,长期自然的推进过程形成了各个节点之间的连通关系。俗话说“水往低处流”,水系的流向、形态、流域面积、河网密度等特征与地形、气候关系密切。流域的河流形态、水系结构、调蓄能力以及景观特征等受水系分叉、河网密度、河流分级等自然因素影响,有明显的地域特点^[1]。

河湖水系是地表水资源的主要存储空间,是水循环形成的载体,是流域生态环境的重要组成部分,更是人类经济社会发展的支撑^[2]。河湖水系的生态系统不仅是自然物种繁衍、多样性演进最为适宜的环境,更是人类社会文明发展和进步最为活跃的地方,人类依河而生存,逐水而兴旺。在社会的发展进程中,人类的生产活动也不断影响着河湖水系的连通格局,社会经济的快速发展和用水需求的不断增加,使得自然形成的河湖水系已经演变成自然-人工复合水系,环境特征多样,生态结构复杂,除包括河流、湖泊、湿地等自然水体外,还包括人工修建的闸坝、堤防等水工程形成的水库、渠系、蓄滞洪区以及人工河道、人工湖泊等人工水体。

我国幅员辽阔,江河湖泊纵横分布,流域面积在 100km^2 以上的河流有 2 万多条,水域面积在 1km^2 以上的湖泊有 3000 多个,大大小小的河流湖泊构成了我国复杂的河网水系。河流大多顺地势自西向东流入海洋,绝大多数河流分布在外流河流域,主要水系包括长江、黄河、淮河、海河、珠江、松花江和辽河;内陆河水系大都发育在封闭的盆地内,大致可分为新疆、甘肃、内蒙古、青海、藏北五个内陆河地区。湖泊分布主要取决于湖水的补给条件,按地理位置划分,主要分为东部湖区、东北湖区、蒙新湖区、青藏高原湖区、云贵湖区五大湖区,长江中下游平原和青藏高原是湖泊分布最为集中的区域。按湖水的含盐度划分,可分为淡水湖和咸水湖,其中淡水湖面积占全国湖泊总面积的 45%,主要分布在外流河流域附近,咸水湖则主要分布在内流河流域。

从生产生活方式、水土资源开发方式、人水关系以及连通状况等角度,李原园等^[3]将我国河湖水系格局的演变进程划分为四个时期,见表 1.1。

表 1.1 河湖水系演变进程

历史时期	生产方式	水土资源开发方式	人水关系	连通状况
远古	渔猎采摘	逐水而居	完全自然演变，人类被动适应	自然连通状况
古代	传统农业	局部开发	自然演变为主，人类逐步适应	局部连通改造
近代	近代工业	区域开发	自然因素为主，人类主动改造	连通状况改变
现代	现代工业	规模开发	演变关系复杂，人类影响加大	连通状况复杂

(1) 河湖水系的形成和发展初期。由于远古时期剧烈的地质结构运动，我国形成了西高东低的三级阶梯地势，阶地隆起为水流提供了巨大的势能，使得一些互不连通、相互独立的内陆水系汇集成河，逐步演变为从源头到入海口、自西向东的总体流势。此时河湖水系受自然因素影响完全处于天然演变状态，具有自然缓慢、突变剧烈的特点。

(2) 水系的发育和格局调整时期。古代是我国主要江河湖泊不断发育、自然因素主导的水系格局不断调整的时期，在自然营力的持续作用下，我国主要河湖水系的连通格局基本形成，该时期的水系演变仍以自然演变为主，但逐渐出现一些顺应自然规律的开发利用与人工干预。

(3) 自然-人工复合水系格局的稳定时期。在近代，随着人类科技水平和生产能力的提高，河湖水系格局不断与经济社会发展格局相匹配，人类活动通过改变河流边界条件、水沙条件，对河湖水系频繁实施防洪建设、河湖围垦、水资源开发利用等活动，更加深入地影响河湖水系的演变，呈现出自然演变缓慢、人工干预增强的趋势。河湖水系逐渐从连片、支叶形转变成线带状、网格型的形态，水面面积缩小，河湖水系的水动力减弱，河流淤积加重，自然-人工复合水系结构复杂。

(4) 水系连通方式不断丰富、格局逐步完善的时期。该时期河湖水系格局直接受人类活动影响，人类在利用河湖水系时，给水资源带来巨大的压力负荷，导致部分河湖严重萎缩，连通性减弱，水旱灾害频发。现代人们开始注重人水和谐，坚持可持续发展治水理念，在多个方面对河湖水系连通产生影响，河湖水系连通工程多以防洪抗旱、航运、水资源配置和水生态环境保护与修复等功能为目的。

经过漫长的自然演变和持续的江河开发治理，目前我国已形成以七大江河等自然水系为主体、人工水系为辅的河湖水系及其连通格局，河势基本得到控制，河湖功能得以发挥。

人类社会的发展与河湖水系及其演变密切相关。河湖水系及其连通状况不仅决定了水资源格局和水资源承载能力与环境容量的大小，而且对生态环境和水旱灾害风险产生重要影响。

1.1.2 河湖连通工程类型与功能

1.1.2.1 河湖水系连通的概念

水是生命之源，是一切生物赖以生存和社会经济赖以发展的物质基础。然而，水资源的时空分布不均，一些地区水资源承载能力不足，区域经济发展受限，加上人类用水方式的多样化，各种水问题相继出现。为了改善和解决这些水问题，人类采取一系列调配统筹水资源的行为或活动，其中包括河湖水系连通工程的建设^[4]。河湖水系的相互连通关系是

流域内各种水体的形态分布与连接状态的综合描述,人们逐渐意识到河湖水系连通的重要性。2009年,水利部部长陈雷首次提出河湖水系连通这一重大战略举措^[5],旨在提高水资源统筹调配能力、改善生态环境质量状况和增强抵御水旱灾害能力。

近年来,关于河湖水系连通的研究不断增多和深化,国内部分学者做了一些探索性的研究,讨论了河湖水系连通概念及内涵,初步构建了河湖水系连通概念框架和理论体系;一些学者对水系连通性概念及内涵在一定程度上进行了界定,探讨了水系连通性的重要意义及评价方法。

2005年,长江水利委员会编写的《维护健康长江,促进人水和谐》研究报告中,首次提出了水系连通性概念,并将水系连通性定义为:河道干支流、湖泊及其他湿地等水系的连通情况,反映水流的连续性和水系的连通状况^[6]。这一概念强调了河流、湖泊在水系连通性中的重要作用。张欧阳等^[7]进一步研究讨论指出,水系连通性包含两个基本要素:一要有能满足一定需求的保持流动的水流;二要有水流的连接通道;夏军等^[8]从科学范畴定义水系连通性为:在自然和人工形成的江河湖库水系基础上,维系、重建或新建满足一定功能目标的水流连接通道,以维持相对稳定的流动水体及其联系的物质循环的状况。其实,“脉络相通”便是水系的连通性,这一定义客观地解释了河湖水系连通,但与目前水利部为解决日益严重的水问题而提出的河湖水系连通战略尚有一定的差异。在总结相关研究的基础上,结合河湖水系连通的战略目标、构成要素,窦明等^[9]、李宗礼等^[10]给出了河湖水系连通概念的进一步解析,即以实现水资源可持续利用、人水和谐为目标,以改善水生态环境状况、提高水资源统筹调配能力和抗御自然灾害能力为重点,借助水库、闸坝、泵站、渠道等各种人工措施和自然水循环更新能力等手段,构建蓄泄兼筹、丰枯调剂、引排自如、多源互补、生态健康的水系连通网络体系;徐宗学等^[11]提出将通过自然营力或工程措施建立河湖水系之间的水力联系,统称为水系连通,目前所提到的河湖水系连通往往指后者,定义为“以可持续发展与人水和谐为原则,以水安全和流域生态健康为目标,基于水循环理论,通过工程措施以及水库闸坝调度等手段,建立河湖库不同水体之间水力联系的措施和行为”。

河湖水系连通本质上是根据河、湖特性,统筹考虑连通区域的经济社会、生态环境等各方面的水情、工况和需求,通过自然与人工手段进行科学有效的连通,构建脉络相通的水网体系,实现人水和谐可持续发展^[12]。

1.1.2.2 河湖水系连通的类型

河湖水系连通实践古已有之,结合国内外河湖水系连通的实践经验,在河湖水系连通概念和内涵的基础上,依据河湖水系连通的主要影响因素,参照李宗礼等^[13]、窦明等^[9]、夏军等^[8]提出的有关分类原则和分类体系,总结河湖水系连通的主要类型有以下几种:

(1) 按连通对象,可分为河河连通、河湖连通、河湖与湿地连通、河湖与城市水网连通、多对象复杂连通。

(2) 按连通区域和水系特点,可分为缺水區(北方平原区、北方丘陵区、西北干旱区)连通、丰水区(南方丘陵区、西南高原区、松嫩平原区)连通、河网区(长江中游河网区、下游河网区)连通。

(3) 按连通空间尺度,可分为国家层面水网连通、流域层面水网连通(跨流域连通、

流域内连通)、区域层面水网连通(省级层面连通、市县层面连通、城市内部连通)。

(4) 按连通时间尺度,可分为长期连通(又称常态连通)、短期连通(又称非常态连通,如季节性连通、年度性连通、应急性连通)。

(5) 按连通目的和功能,可分为水资源调配型连通、生态环境修复型连通、水旱灾害防御型连通、综合效益型连通。

1.1.2.3 河湖水系连通的功能

河湖水系连通的目的是解决我国水资源条件与生产力不匹配问题,最终实现人水和谐。其功能主要表现^[14]为:合理调配水资源,保障人类的生存与发展,实现水资源可持续利用,遵从自然规律,提高河湖健康保障能力,保障经济社会可持续发展的良好环境,应对气候变化和突发事件,提高抵御重大水旱灾害能力。细化河湖水系连通功能,形成具体的功能体系^[15],如图1.1所示。

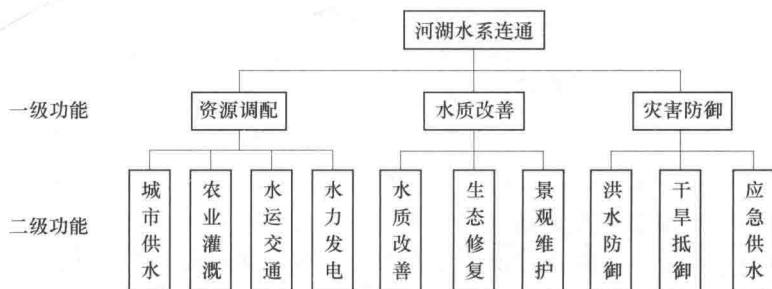


图 1.1 河湖水系连通的功能体系

(1) 提高水资源统筹调配能力。我国水资源时空分布特点决定了其与大部分地区的人口、生产力布局以及土地等其他资源不相匹配。河流上下游、干支流的水力联系随着河湖治理、河湖滩涂围垦等而改变,流域、区域与行业之间用水竞争加剧,部分地区水资源承载能力不足,供水安全的风险正在逐步加大,水资源供需矛盾日益突出。

根据水资源条件和生态环境的整体特点,开展河湖水系连通工程的建设,可以增加外调水量,同时可以将已建的水利工程连通起来,达到丰枯相互调剂的目的,从而增加当地的水资源可利用量,提高供水保证率,以水资源的可持续发展支撑经济社会的可持续发展。

(2) 改善水生态环境状况。在经济快速发展地区,工业、生活污水排放量日益增大,河湖水体污染严重,水生态环境状况恶化;另外,部分地区为开发利用水资源,修建大量闸坝,改变或阻隔了河湖水系原有的水力联系,水体流速减缓,天然河湖、湿地的调蓄能力降低,水体自净能力和水环境承载力降低;水体富营养化现象加剧,生态自我修复能力下降,水质型缺水严重。

在严格控制污染物排放的前提下,通过河湖水系连通工程的建设,可以加速水体流动,加快水体置换频率,增加水环境容量,达到稀释水体、降低污染物浓度、提高水体自净能力、改善水环境的目的,从而增强水环境承载能力,保障生态安全。

(3) 增强水旱灾害抗御能力。洪涝和干旱灾害一直是我国主要的自然灾害,严重制约着我国社会经济的正常运行,加之气候变化和人类活动的影响,极端事件发生频率不断增

加。众多湖泊、淀洼的调蓄能力大幅下降,中小河流淤积、堵塞和萎缩现象严重,部分河道的调蓄、输水、排水等功能受到严重影响。

河湖水系连通不仅为洪水提供畅通出路,维护洪水蓄滞空间,而且能够为干旱地区调配水源,维持水资源供给,有效降低洪涝灾害风险,保障防洪和供水安全。河湖水系连通将成为提高径流调控与洪水蓄泄能力、增强抵御水旱灾害能力的有效途径。

总体而言,河湖水系连通工程的实施,可以将不同水系连通起来产生综合效应,发挥多种功能,一方面可以增加调蓄容积,有效减少洪涝灾害,恢复战略应急水源,提高供水保障;另一方面可以促进流域污染治理,改善河湖水质,提高区域生物多样性,恢复水生态环境健康。除此之外,还有利于改善内河航道,促进内河航运更好的发展。

河湖水系连通的提出是解决我国水资源短缺、水环境恶化、水灾害频发等问题的一个重大举措,是实现水资源可持续利用的治水新思路。同时,河湖水系连通工程也是一项复杂的系统工程,仍需继续深入研究,不断丰富其理论,并结合工程实践,因地制宜、合理调度,才能更好地发挥其功能,有效解决水资源问题。

1.1.3 河湖水系功能演变

河湖水系格局的自然演变伴随着河湖水系功能的演变,影响河湖水系及其连通状况演变的主要因素有自然因素和人为因素两方面,其中人类社会的生存发展与河湖水系连通及其功能息息相关,相互影响、相辅相成。人类从逐水而居到逐水而兴,由开始的开发利用河湖水系到后来的逐渐改造河湖水系,更好地服务于人类的社会经济发展,河湖水系的功能不断改变,从传统的供水、防洪、排涝、抗旱、航运、军事等单功能的开发利用向统筹水资源调配、兼顾水生态环境修复等多功能综合利用转变。

我国是世界上河流水系最为发达和人为开发最早的国家之一,中华民族文明发展的每一个阶段都与河流水资源的开发密切相关。

(1) 远古时期。河湖水系初成,处于天然演变状态,完全受自然因素影响控制,人类生活主要以渔猎采摘为生,基本没有抵御自然灾害的能力,只能择水而栖,被动地适应和屈从自然。这个时期的河湖水系功能单一,主要为人类提供生存的环境和水资源,满足人类基本生存用水需求。

(2) 古代时期。主要江河湖泊不断发育、自然因素主导的河湖水系格局逐渐形成并不断调整。人类逐水而兴,河湖水系发挥了重要作用,其功能除了供水外,还有灌溉、航运、军事等。伴随水系发展的还有严重的水旱灾害,人类为了生存和发展,不断地与洪水作斗争,采取人工措施进行干预,河湖水系起到了防洪、排涝的作用。此时河湖水系的利用还处于开发起步阶段,只是一些顺应自然规律的开发治理与人工干预。

(3) 近代时期。河湖水系不断调整,自然-人工复合河湖水系格局逐步稳定并形成。伴随人类科技水平和生产能力的提高,对河湖水系格局与经济社会发展格局相匹配的需求也越来越高,防洪建设、河湖围垦、水资源开发等活动频发,河湖水系的边界条件和水沙条件不断被改变。河湖水系不仅要满足人类的基本生活用水需求,还有更高的工农业生产、水力发电、航运、河流生态用水等的需求。此外,还有为了缓解水资源供需矛盾采取的调水措施,用于污水稀释、改善生态环境和维持湖水稳定。

(4) 现代时期。现代河湖水系格局直接受人类活动影响,连通方式不断丰富,水系格

局逐步完善。河湖水系在为人类服务的同时,面临的压力不断增加,水资源与水环境承载能力不足,河湖功能与作用发生改变。在水资源利用方面,倡导以人为本、人水和谐可持续发展理念,由注重水系开发利用向注重水资源调配和生态保护发展,由注重水量向水量-水质-水生态相结合发展,由局部向跨流域、跨区域统筹协调管理发展^[16]。河湖水系除了满足人类的基本生活生产用水外,河湖水系连通工程等水利措施的建设,完善了防洪工程体系,优化了水资源配置,同时也保护了水生态环境。人类通过实行最严格的水资源管理,来保障经济社会发展的安全、健康、可持续用水。

河湖水系参与了水的循环过程,是水资源的重要载体,在自然界中为动植物和人类提供了水源,是社会不可或缺的一部分。伴随人类从早期改造河湖水系到后来治理河湖水系,河湖水系功能也不断演变,从供水、灌溉、军事、航运到工业用水、水力发电、防洪、抗旱,再到稀释污染的自净化功能、为生物提供栖息环境、治理水污染、改善水环境等,无不体现着与人类经济社会发展的密切联系。在今后人水和谐的人类用水治水理念下,河湖水系将更好地发挥其功能,为人类社会可持续发展服务。

1.2 国内外河湖连通状况

水是一切生命之源,是人类生存和社会经济发展必不可少的物质基础,早在远古时代人类就循水而居。但是受自然地理及气候等方面因素的影响,全球降水量的时空分布极其不均,洪涝、干旱灾害频发,与区域发展格局不相匹配问题也一直存在。为了解决这些水问题,人类在很早以前就开始开挖沟渠引水灌溉,开凿运河运送货物发展贸易,建设许多河湖水系连通工程来人为调配水资源。

据统计^[4],目前世界上至少40个国家建成了比较大型的350余项河湖水系连通工程,主要分布在美国、加拿大、俄罗斯、印度、巴基斯坦、中国、澳大利亚等国家。

1.2.1 国外河湖连通状况、典型案例

最初的河湖连通工程主要是为了满足农业生产发展的需要。早在公元前2400年,古埃及兴建了世界上第一个河湖水系连通工程,从尼罗河引水到埃塞俄比亚南部,以满足地区灌溉和航运用水需求,在一定程度上促进了埃及文明的发展。

18世纪后期,工业革命对国外河湖水系连通建设起到了巨大的推动作用,同时经济产业的发展增大了对水路运输的需求。到19世纪末,一些国家先后兴建了一些以航运为目的水系连通工程,如举世闻名的基尔运河、苏伊士运河和巴拿马运河等。20世纪以来,河湖连通的重要性受到了越来越多的重视,许多国家开始兴建各种用途的河湖连通工程,满足人类对水资源的需求,支撑社会经济的发展。据统计资料,世界上许多大型的水系连通工程都是在20世纪40—80年代建设的。20世纪80年代后期,一些发达国家的河湖水系连通工程建设速度放慢,而发展中国家仍大力建设。这些河湖水系连通工程的功能主要体现在军事和航运、灌溉和供水、江河湖泊治理、水资源配置和水生态环境修复等方面。早期的河湖连通目标单一,多为引水灌溉,后期除了灌溉还兼顾航运、城市供水、水力发电、生态环境保护等作用,给整个地区的经济发展带来了显著的经济和社会效益。进入21世纪以来,随着水生态环境问题的日益加剧,以水生态环境治理为主要目的的河湖水

系连通工程逐渐增多。表 1.2 列举了国外著名的河湖连通工程^[16-18]。

表 1.2 国外著名的河湖连通工程

序号	所在地	工程名称	功能和目的	首次送水年份
1	加拿大	韦兰运河工程	发电、航运	1829
2	美国	芝加哥调水工程	供水、灌溉、水环境治理	1900
3	苏联	伏尔加—莫斯科调水工程	灌溉、城市供水、发电、航运	1937
4	美国	中央河谷工程	灌溉、城市及工业供水、防洪、发电、航运、环境保护	1940
5	美国	全美灌溉系统	供水、灌溉、发电等	1940
6	以色列	北水南调工程	灌溉、城市供水	1953
7	美国	科罗拉多—大汤普森调水工程	灌溉、防洪、城市及工业用水、水力发电、旅游等	1959
8	苏联	卡拉库姆运河工程	灌溉、城市及工业用水	1962
9	美国	加利福尼亚北水南调工程	灌溉、城市及工业供水、防洪、发电	1973
10	澳大利亚	雪山调水工程	灌溉、发电、工农业用水	1974
11	加拿大	魁北克调水工程	水力发电、灌溉、城市供水	1974
12	伊拉克	底格里斯—塞尔萨尔湖—幼发拉底调水工程	防洪、灌溉	1976
13	巴基斯坦	西水东调工程	耕地灌溉、发电、防洪	1977
14	印度	萨尔大萨哈亚克工程	灌溉	1982
15	芬兰	赫尔辛基调水工程	供水	1982
16	哈萨克斯坦	额尔齐斯—卡拉干达运河工程	供水	1982
17	美国	中央亚利桑那工程	灌溉、供水	1985
18	秘鲁	马赫斯调水工程	灌溉	1986
19	埃及	西水东调工程	灌溉、城市供水	1998
20	南非	莱索托高原调水工程	工业供水	1998
21	德国	巴伐利亚州调水工程	供水、灌溉	1999
22	尼日利亚	古拉拉调水工程	供水、发电	2007

美国加州北水南调工程是一项宏大的跨流域河湖连通工程，输水渠道南北绵延千余公里，年调水总量超过 140 亿 m^3 ，为加州南部的经济和社会发展、生态环境改善提供了充足的水源，河湖连通工程的成功建设，使加州发展成为美国人口最多、灌溉面积最大、粮食产量最高的一个州。

澳大利亚雪山调水工程是世界上最复杂也是澳大利亚最大的一项水利建设工程，用来解决内陆干旱缺水问题，年调水量超过 30 亿 m^3 ，通过大坝、水库和山涧隧道网，从雪山山脉的东坡建库蓄水，使南流入海的雪山融水向西调至墨累河等需水地区，满足下游灌溉用水的需求，沿途还产生了巨大的发电效益。

巴基斯坦西水东调工程是当今世界上满足灌溉等需求的调水量最大的工程，从西三河向东三河调水，年调水量达 148 亿 m^3 ，解决了东三河下游的灌溉用水等问题，曼格拉和塔贝拉两大水库的建设，也发挥了极大的防洪效益和发电效益，为巴基斯坦整个经济社会的发展提供了强大的动力。