

# 河湖水系连通的理论探讨

王中根<sup>1</sup>, 李宗礼<sup>1 2,\*</sup>, 刘昌明<sup>1</sup>, 李原园<sup>2</sup>, 刘晓洁<sup>1</sup>, 郝秀平<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 水利部 水利水电规划设计总局 北京 100120;  
3. 华北水利水电学院 郑州 450011)

**摘要:** 在全球气候变化和水资源形势日趋严峻的背景下,为了从根本上提高水资源统筹配置能力、改善河湖健康状况和增强抵御水旱灾害能力,河湖水系连通作为国家新时期的一个治水方略被提出。当前关于河湖水系连通的理论基础研究要落后于实践,尚在探索之中。论文尝试从河、湖与水系等水循环基本概念入手,探讨水系的结构、特征和连通性,揭示水系连通的水循环物理机制,并进一步分析河湖水系连通的战略思想,探明其中涉及的几个关键水循环基础问题,包括水量平衡、能量平衡、水资源可再生性、水循环尺度等问题,为河湖水系连通战略的实施和理论体系的建立奠定基础。

**关键词:** 河湖; 水系; 水系连通; 水循环; 水资源

**中图分类号:** TV213.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3037(2011)03-0523-07

在全球气候变化和人类活动双重影响下,极端水旱灾害事件呈突发、频发、并发、重发趋势<sup>[1]</sup>,全球水资源形势十分严峻。与世界大多数国家相比,我国面临的形势更为严峻。人多水少、水资源时空分布不均的基本国情和基本水情仍将长期存在;水资源配置能力整体偏低、水资源利用率不高、生产力布局和水土资源不相匹配的问题亟待解决<sup>[2]</sup>,兴水利、除水害,事关人类生存、经济发展、社会进步,是关系我国发展全局的战略性问题。在全面落实最严格的水资源管理制度之际,为了从根本上提高水资源统筹配置能力、改善河湖健康状况和增强抵御水旱灾害能力,2010年1月,水利部陈雷部长在全国水利规划计划工作会议提出“河湖连通是提高水资源配置能力的重要途径”<sup>[3]</sup>。河湖水系是陆地水循环系统的重要组成部分,是水资源形成与演化的主要载体,也是自然生态与环境的重要构成要素。人类文明的起源与发展同河湖水系息息相关,其分布与连通格局从根本上决定了陆地上水资源的分布格局,影响到区域水资源配置与保障能力,影响到与之相关联的自然生态环境系统和人类社会经济的发展与稳定。目前,关于河湖水系连通问题的研究文献很少<sup>[4-6]</sup>,作为国家新形势下的一种治水方略,本文尝试从水循环机理上探讨河湖水系连通问题,揭示河湖水系连通战略所遵循的水循环规律。

## 1 河、湖与水系

### 1.1 基本概念

河流(river, stream)是指在重力的作用下,经常或间歇地沿着地表或地下长条状槽形注

收稿日期: 2011-02-10; 修订日期: 2011-02-20。

基金项目: 中国博士后基金特别资助(201003150); 中央水利前期工作项目(2010518); 国家自然科学基金项目(40730632)。

第一作者简介: 王中根(1973-),男,河南潢川人,博士,副研究员,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangzg@igs-nr.ac.cn

\* 通信作者简介: 李宗礼(1964-),博士,教授级高工。E-mail: lizongli@igs-nr.ac.cn

地流动的水流<sup>[7]</sup>。通常是指陆地河流,即陆地表面成线形的自动流动的水体,是溪、川、江、河的总称。河流可划分为河源、河口和上、中、下游5个部分。其中,河源是指河流的发源地,可以是泉水、湖泊、沼泽或冰川等。河口是河流的终点,即河流汇入海洋、其他河流(例如支流汇入干流)、湖泊、沼泽或其他水体的地方。

湖泊(lake)是指陆地上洼地积水形成的水域宽阔、水量交换相对缓慢的水体<sup>[8]</sup>。湖泊主要通过入湖河川径流、湖面降水和地下水获得水量。按照成因可分为:构造湖、冰川湖、火山口湖、堰塞湖、风成湖、河成湖、海成湖、岩溶湖、人工湖等。

水系(river system, water system)是指流域内大大小小的水体,构成脉络相通的水网系统<sup>[9]</sup>,由干流、各级支流及与河流相通的湖泊、沼泽、水库等组成。其中,河流是组成水系的主体,由单一河流所组成的网络系统也称为河系<sup>[10]</sup>。水系汇集全流域的地表水和地下水,最终注入湖泊、海洋或消失于荒漠。

## 1.2 水系结构形式

水系结构形式多样,不同结构的水系产生完全不同的水情<sup>[9]</sup>。常见的水系有:①树枝状水系,干支流呈树枝状,是水系发育中最普遍的一种类型,主要发育在地面倾斜平缓、岩性比较一致的地区,如平原地区的河系;②扇形水系,干支流组合而成的流域轮廓形如扇状的水系,汇流时间集中,易造成暴雨成灾,如海河水系;③羽状水系,干流两侧支流分布较均匀,近似羽毛状排列的水系,汇流时间长,暴雨过后洪水过程缓慢,如西南纵谷地区的水系;④平行状水系,支流近似平行排列汇入干流的水系,当暴雨中心由上游向下游移动时,极易发生洪水,如淮河蚌埠以上的水系;⑤格子状水系,河流的主流和支流之间呈直线相交,多发育在断层地带,如闽江水系;⑥网状水系,河流在河漫滩和三角洲上常交错排列犹如网状,如三角洲上的水系。

## 1.3 水系特征参数

水系的特征参数是反映水系结构特性的量化指标。主要包括:①河网密度,单位流域面积内干支流的总长,反映流域水系分布的密度,在相似的自然条件下,河网密度越大,河水径流量也越大;②河系发育系数,各级支流总长度与干流长度之比,河流的发育系数越大,表明支流长度超过干流长度越多,对径流的调节作用越有利;③河系不均匀系数,干流左岸支流总长度和右岸支流总长度之比,表示河系不对称程度,不均匀系数越大,表明两岸汇入干流的水量越不平衡;④湖泊率和沼泽率,水系内湖泊面积或沼泽面积与水系分布面积(流域面积)之比,由于湖泊或沼泽能调节河川径流,促使径流随时间的变化趋于均匀,减少洪水灾害和保证枯水季节用水,因此,湖泊率和沼泽率越大,对径流的调节作用越显著。

# 2 河湖水系连通性分析

## 2.1 河、湖特性

从基本概念看,自然界中的河流、湖泊都是一种水体,是存在于各种自然力所营造的陆地洼地中的水体。不同之处,河流是在长条形洼地中靠重力作用自动流动的水体,是一种更新较快的水体。河流最为重要的特性在于其流动性和连续性,是自然界能量与物质守恒定律在河流水体运动中的体现。河流的流动性和连续性源于自然水循环过程,共同决定了河流水体的可再生(更新)性,河流水体的可再生(更新)能力取决于河源入流量与河口出流量的差额关系。河流的流动性、连续性以及可再生性,共同营造和影响着与其相适应的生态与环境系统,并使河流水体成为一种最为宝贵的可重复利用的淡水资源。维持河流健康存在,

首先,要确保其流动性,如果一条河流失去了流动性,即使原有水体仍然存在,但已经不能称为河流了,原有的河流生态系统也会遭到破坏,或被新的生态系统所取代。其次,要确保其连续性,如果一条河流干枯,即使河道仍然存在,但实际上河流已经消亡,伴随的生态系统也会遭到毁灭性破坏。当然,有些河流是一种间歇或季节性河流,即一年中有时存在,有时干枯消失。这种河流已经处于不健康状态,而与其相关联的生态与环境系统也是十分脆弱的。对于这种河流,人类开发利用和配置水资源的能力也是十分有限的。

湖泊是在较宽阔洼地中存在的水体,是一种水量交换相对缓慢的水体。从湖泊存在的形式看,它既可以成为河流的源头(即河源),也可以成为河流的终点(即河口)。因此,湖泊能够成为连接不同河流水体的“接头”(或“连接器”)。除接受正常河川径流之外,湖泊的入流水源也可以是大气降水、地下水,或者洪泛期的径流,出流也可以是蒸发或下渗。因此,湖泊可以与河流保持相对独立,或者季节性独立存在。湖泊与湖泊之间可通过河流连接或直接连接。湖泊水域面积宽阔,具有相对大的容积,能够有效地调蓄洪水,吸纳洪峰流量,坦化洪水过程;通过将动能转化为势能(湖面升高)缓解洪水破坏力和向下游传播时间。概括而言,湖泊以其较大的水面面积和蓄水能力,能够有效将“来势迅猛”的洪水转化为“平稳”的径流,类似于一种“转换器”;同时,湖泊滞蓄水能力也能有效调节区域降水在时空分布上的不均匀性,起到“蓄水器”作用,实现蓄滞得当、丰枯调剂。另外,湖泊集中接纳水源、缓慢排出的特性,也注定湖泊水体更新相对缓慢的特点。因此,湖泊开发利用更重要的是发挥其在水系中的“连接器”、“转换器”和“蓄水器”作用,发挥其湿地综合生态效应,而不是加快湖泊水体的消耗或排出。

## 2.2 水系连通性

水系是由流域内大大小小的河流、湖泊等水体构成脉络相通的水网系统。河流和湖泊是构成水系的两个最基本的水体要素,水库、沼泽也可以看作某种形式上的湖泊。“脉络相通”便是水系的连通性。文献[5]探讨了水系连通性内涵,指出水系连通性包含两个基本要素:①要有能满足一定需求的保持流动的水流;②要有水流的连接通道。判断连通性的好坏也取决于两个条件:①水流在满足一定需求情况下的连续性;②连接通道是否保持畅通。并给出了长江流域水系连通的3种基本类型:①河流与河流连通;②河流横向连通,即河流与湖泊等连通;③河流纵向连通,即河流与水库等连通。

实际上,河流是构成水系的主体,水系完全可以只由大大小小的河流构成。湖泊是水系中的“连接器”、“转换器”和“蓄水器”,水库也是一种人工湖泊。水系的连通性是天然存在的,否则不成为水系。通过自然与人工手段,包括修建人工河渠、水库、闸坝等,调整水系中河与河、河与湖(湿地)、湖与湖等之间的连通关系,有效地保证水系连通性,增加水系应对环境变化的适应能力。从而维持水系长期、稳定、健康存在,源源不断为经济社会发展提供清洁的淡水资源。

水系连通性本质上是受流域(区域)水循环背景条件和过程影响,由水系的结构形式(如树枝状水系、网状水系等)和水系特征参数(如河网密度、湖泊率等)所决定的。例如,南方平原河网区湖泊密布、河流纵横交错的水系,其连通性自然要好于北方缺水地区频频干枯断流的水系。这也是水循环下垫面因素(如地形、土壤、植被、土地利用等)和长期区域气候因素(如降水、气温、辐射等)综合影响的结果。

维持水系连通性实质上就是保持河流水体的流动性和连续性,发挥湖泊水体的调蓄水能力和湿地生态效益,实现河流健康与河流水体可持续开发利用,实现湖泊的长久健康稳

定存在,达到良性水循环的综合目标。

### 3 河湖水系连通战略

#### 3.1 战略思想

在全球气候变化、极端水旱灾害事件频发,我国经济社会高速发展、水资源短缺与生态环境恶化等新的形势下,河湖水系连通作为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。其战略思想应该是:在水资源开发利用中充分发挥陆地上河流、湖泊这两类最重要水体在陆地水循环中的地位与作用,根据河、湖所具有的特性,通过自然与人工手段进行科学有效地连通,形成具有引排顺畅、蓄滞得当、丰枯调剂、多源互补、可调可控的脉络相通的水网体系。通过大网络结构水系的构建,平衡降水时空分布不均性,增强应对全球气候变化和抵御大的水旱灾害能力;通过畅通的水系网络,实现丰枯调剂、多源互补的水资源开发利用新局面,缓解生产力布局和水土资源不相匹配的矛盾,提高经济社会高速发展过程中水资源的配置与保障能力;利用水系的连通性,统筹调配,维持河、湖的健康与长久稳定存在,发挥其生态综合效益,增强区域自然生态与环境系统的稳定性,实现流域(区域)良性水循环。

#### 3.2 关键问题

河湖水系连通战略的实施,从水资源统筹调配,实现和维持良性水循环的角度,需要关注以下几个水循环基础问题。

(1) 水量平衡。是某一时段内研究区的输入与输出水量之差等于该区域内的蓄水变量。研究区可以是全球、区(流)域或单元水体(如河流、湖泊、沼泽等)。水量平衡是物质守恒定律在水循环中的一种表现形式,是水文水资源学的基本原理之一。

河湖水系连通战略的实施,通过工程措施(如调水工程,修建闸坝、水库等)调节自然水系连通性,必然改变原有水系的结构性形式和特性,打破原有水量平衡关系。需要及时调整基于历史观测数据所制定的水资源配置方案,重新研究区(流)域水循环的变化和新的水量平衡关系。掌握水量平衡原理,科学合理地改变水的时空间分布格局,才能化“水害”为“水利”。反之,会破坏自然生态与环境,造成湖泊干枯、河道断流、地下水位不合理升降等,导致水资源枯竭。

(2) 能量平衡。能量守恒定律是水循环运动遵循的基本规律之一,水的三态转换和运移时刻伴随着能量的转换和输送。对于水循环系统而言,它是一个开放的能量系统,与外界有着能量的输入和输出。太阳辐射是水循环的原动力,也是整个地球大气系统的外部能源。对于河流水系而言,势能与动能的合理转换,是调节河流水体运动和降低洪水破坏力的关键,也是制定河湖水系连通规则的理论基础。

在河湖水系连通战略实施中,需要考虑河湖水体的空间分布和水循环下垫面条件,根据河流、湖泊水体所蕴含的能量,制定水系连通方案。尽可能遵循河流、湖泊水体的势能与动能转换规律,不仅要获取清洁的水电能源,而且保持水系连通性和河流、湖泊水体流动更新的能力。尽可能遵循“水往低处流”规律,来沟通水系连接,利用河流、湖泊水体自身的能量,维持水体的流动性,如大型跨流域南水北调工程。

(3) 水资源可再生性。是水资源区别于其他资源的最为重要的自然属性,源于周而复始的自然界水循环运动,使水资源具有取之不竭的特点。但是,水资源可再生能力在一定的空间和时间范围内是有限的。不论是河流、湖泊、地下水等任何一种赋存形式的水体,如果

人类取用水量超过其更新能力, 就要造成水资源的枯竭。据计算<sup>[1]</sup>, 大气中的水汽平均每年转化成降水 44 次, 平均每 8 d 多循环更新一次; 陆地上河流水体平均每 16 d 多更新一次, 地下水体的更新就长达数月、数年或更长时间。

河湖水系连通战略实施不仅要保护和改善自然生态环境, 更为重要的目标是要提高水资源统筹调配能力, 增强水资源开发利用与保障能力。因此, 维持河湖水体的可更新能力是河湖水系连通所要遵循的基本准则, 这是实现水资源可持续利用的水循环基础。增强河湖水系连通的流动性和连续性, 是增强水资源再生能力的关键和必要条件。

(4) 水循环尺度。地球科学问题普遍存在尺度效应, 这也是地学研究的一大特色。水循环问题的研究自然也具有尺度效应, 即随着时空尺度的扩展, 原有在微观、小尺度层面上得出的经验和规律就会发生改变, 不再适合宏观尺度水循环问题的解决。

河湖水系连通具有多时空尺度的特性, 从国家层面看, 加快南水北调工程建设, 构建我国“四横三纵、南北调配、东西互济”的水资源战略配置格局。从区域层面看, 加快跨流域调水工程建设, 继续搞好引江济太、引黄济津济淀、珠江压咸补淡等应急调水, 提高区域水资源承载能力。从相邻河湖看, 综合采取控源截污、清淤疏浚、生态治理、水系连通、科学调度等措施, 恢复河湖生态系统及其功能, 构建引得进、蓄得住、排得出、可调控的江河湖库水网体系<sup>[2]</sup>。

河湖水系连通战略实施应随着时空尺度的变化而不同。在空间尺度上, 流域内部水系相邻河湖的沟通、跨流域水系的连通、全国大尺度的水系网络化, 所遵循的水循环规律和边界条件完全不同, 不能用小尺度的河湖水系连通经验, 去解决不同气候分区条件下的跨水系连通问题。在时间尺度上, 分别对应小时、日、月(年)的次洪问题、水资源管理问题、区域水资源配置问题, 所要遵循的河湖水系连通与调度规则也完全不同。

因此, 遵循自然界水循环规律, 实施河湖水系连通战略, 才能真正提高水资源统筹配置能力、生态环境质量和防洪保安能力。

#### 4 结语

在全球气候变化、经济持续高速发展和水资源形势日趋严峻的背景下, 国家提出的河湖水系连通治水方略, 是人类水利史上一项超记录的复杂巨系统工程。这不仅仅是关于水利工程建设的问题, 而且是多学科交叉、涉及多部门领域的复杂系统问题。目前, 河湖水系连通工程实践要先于理论, 亟需从自然界水循环机理上, 探讨河湖水系连通战略所要遵循的自然规律。本文从河、湖与水系等水循环基本概念入手, 探讨水系的结构、特征和连通性, 分析河湖水系连通的战略思想内涵, 探明其中涉及的几个关键水循环基础问题, 为河湖水系连通战略的实施和理论体系的建立奠定基础。

#### 参考文献(References):

- [1] [http://www.cfen.com.cn/web/meyw/2010-03/23/content\\_612568.htm](http://www.cfen.com.cn/web/meyw/2010-03/23/content_612568.htm) [EB/OL].
- [2] [http://www.gov.cn/jrzq/2010-03/22/content\\_1561485.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2010-03/22/content_1561485.htm) [EB/OL].
- [3] [http://www.gov.cn/gzdt/2009-10/27/content\\_1450200.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2009-10/27/content_1450200.htm) [EB/OL].
- [4] 马蔼乃. 全国河流水系网络化与渤海淡化工程思考[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(1): 20-22. [MA Ai-nai. Thinking about whole country water system network and Bohai Bay desalt. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(1): 20-22.]
- [5] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5. [ZHANG

- Ou-yang ,XIONG Wen ,DING Hong-liang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin. *Yangtze River* ,2010 ,41(1) : 1-5. ]
- [6] 张欧阳,卜惠峰,王翠平,等. 长江流域水系连通性对河流健康的影响[J]. 人民长江,2010,41(2): 1-5. [ZHANG Ou-yang ,PU Hui-feng ,WANG Cui-ping ,*et al.* Impact of drainage connectivity on river health in Yangtze River Basin. *Yangtze River* ,2010 ,41(2) : 1-5. ]
- [7] 河流[river][EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/20512.htm>.
- [8] 湖泊[lake][EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/9464.htm>.
- [9] 水系[river network][EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/186480.htm>.
- [10] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书: 上册[M]. 东营: 中国石油大学出版社,2000. [SUN Hong-lie. Resources Science Foundation of China: Vol. 1. Dongying: China Petroleum University Press ,2000. ]
- [11] 左其亭,王中根. 现代水文学[M]. 第二版. 郑州: 黄河水利出版社,2006. [ZUO Qi-ting ,WANG Zhong-gen. Modern Hydrology. Second Edition. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press ,2006. ]

## Discussion on Water Cycle Mechanism of Interconnected River System Network

WANG Zhong-gen<sup>1</sup>, LI Zong-li<sup>1,2</sup>, LIU Chang-ming<sup>1</sup>, LI Yuan-yuan<sup>2</sup>,  
LIU Xiao-jie<sup>1</sup>, HAO Xiu-ping<sup>3</sup>

- (1. Institutes of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 3. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** Climate change and human activities affected water supply and water management, and brought a lot of water issues, such as drought, flood, water shortage, deterioration of water environment, etc. In order to fundamentally increase water resources allocation ability, improve ecological environment quality, and enhance the capacity to withstand flood and drought disasters, in China, a new national strategic plan on the constructing river system network was put forward. We have called this plan as IRSN (Interconnected River System Network) plan. To grasp the strategic thinking of IRSN, this paper, based on the basic concept of river, lake, and water system, discussed the hydrological characteristics of rivers and lakes, and analyzed the role of rivers and lakes in the river system network, and pointed out that the river is the main component and lake is the “connector”, “converter” and “storage device” of constructing river system network, and reservoir can be seen as an artificial lake. How to keep the river water mobility and continuity and play the role of lake water storage capacity and ecological benefits as wetland, are the keys to IRSN plan. This paper presents four basic water cycle issues that should be concerned in the implementation process of IRSN plan. First is about water balance. As the structure and characteristics of the natural water system were changed by engineering measures (such as water diversion project, construction of dams, reservoirs, etc.), the original water balance must be broken. We need to re-examine the new relationship of water balance of the changed river water system. Second is energy balance. The connection of rivers and lakes should be done according to the conversion law of water, the potential energy and kinetic energy, and as far as possible using water bodies own energy to maintain water mobility. Third is about water resources renewability. Just improve river mobility to enhance water resources renewability in river water network. This is the most basic goal of IRSN plan. Fourth is about water cycle scale. As for different water cycle scales, the water connectivity rules are different. So, IRSN plan has the characteristics of multi-temporal and multi-spatial scales. As IRSN plan is an important new plan on water management in China, the related theoretical researches have lagged behind the practices. The purpose of this study is to promote the establishment of theoretical system on IRSN plan. The results of this paper will lay the theoretical basis of hydrology for implementation of the IRSN strategic plan.

**Key words:** river and lake; river system; Interconnected River System Network (IRSN); water cycle; water resources