

文章编号:0559-9350(2018)01-0002-07

长江流域水资源调控与水库群调度

陈进

(长江水利委员会长江科学院, 水资源与生态环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 长江流域不仅存在着干旱缺水问题, 也普遍存在水质性缺水和水生态功能退化问题, 迫切需要加强严格的水资源管理和水利工程系统的优化调控。随着三峡、南水北调中线等重大水利工程建成运行, 为流域水资源调度提供了必要的工程手段, 而三条红线等水资源管理措施的推进, 使长江流域水资源管理和水利工程调控水平显著提高。本文首先回顾随着经济社会发展长江流域水资源供需关系变化, 水库建设和水资源调控发展历程, 然后通过引江济太工程调度、汉江的丹江口水库和长江三峡等控制性水库调度实践, 讨论长江水资源综合调控技术进展及存在的问题, 最后对于未来水资源综合调控中的科学、技术和管理方面需要开展的研究进行展望。

关键词: 长江; 水资源调控; 水库群; 多目标调控

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170889

1 研究背景

长江流域主要位于亚热带季风气候区, 多年平均降雨量约 1 100 mm, 多年平均入海流量 9 190 亿 m^3 , 多年平均水资源总量为 9 958 亿 m^3 , 属于我国水资源相对丰富地区^[1], 但由于长江流域常住人口达到 4.46 亿人, 人均水资源量 2 233 m^3 , 仅略高于全国平均水平, 为世界人均水资源量 1/4 多, 人均水资源并不丰富, 再加上山丘区面积占 80% 以上, 不少地区仍然存在工程性缺水问题。

从 1949 年到 1980 年, 长江流域人口从 1.6 亿人增加到 3.5 亿人, 耕地面积和农田有效灌溉面积显著增加, 总用水量从 314 亿 m^3 增加到 1 325 亿 m^3 , 年均增长率为 4.7%, 其中耕地面积和有效灌溉面积分别从 1 948.1 万 hm^2 和 287.7 万 hm^2 增加到 2 105.5 万 hm^2 和 1 310.0 万 hm^2 , 分别增长了 1.08 倍和 4.5 倍^[2], 同期修建了多达 4 万多座水库和 500 多万座塘坝(也称山塘)^[3], 而工业用水及居民生活用水占比较小, 两者合计仅占总用水量的 21%。虽然修建了大量水库和灌渠, 但在一些山丘区仍然存在工程性缺水问题, 如四川盆地、湖南衡邵、江西赣南、河南南阳、鄂北和滇中等地区。从 1980 年到 2011 年(见表 1), 农业用水 1 029 亿 m^3 , 之后农业用水基本稳定下来^[4], 只是受气候影响, 年际间略有波动, 而工业和生活用水占比逐渐增加, 用水结构发生明显变化, 农业用水比例下降, 工业和生活用水比例增加。从 60 多年用水结构的变化可以看出, 前 30 年长江流域用水主要以农业为主(农业用水曾占比近 80%), 后 30 年, 工业化和城镇化发展迅速, 工业和生活用水显著增加。从 2007 年以后, 长江流域总用水量一直维持在 2 000 亿 m^3 左右, 农业用水比例一直维持在 50% 左右。随着工业和生活用水的不断增加, 使得废污水排放总量也快速增加, 1982 年废污水排放总量为 127 亿 m^3 , 到 2016 年废污水排放总量达 353 亿 m^3 , 34 年间增加了 2.8 倍, 而相应废污水处理及收集能力没有同步增加, 加上大量尚未有效控制的农业面源污染, 长江水系一些支流、湖泊和中小水库水污染越来越严重^[5], 水资源保护问题突出, 成为制约水系连通和水资源调控的重要因素。

收稿日期: 2017-09-11; 网络出版日期: 2018-01-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180123.1449.003.html>

作者简介: 陈进(1959-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水资源和水环境管理研究。

E-mail: 624257111@qq.com; chenjin@mail.crsri.cn

表1 长江流域用水结构及水库数量变化

(单位: 亿 m³)

年份	用水总量	农业用水	工业用水	生活用水	用水结构: 农业/工业/生活	水库总数/(万个)	总库容	总兴利库容	大型水库数量/个
1980	1325	1029	198	82	78/15/6	4.8	1222	670	105
2011	2009	972	747	273	48/37/14	5.16	3607	1800	282

从长江流域水利工程建设看, 93%的水库和绝大多数水闸和灌区都是1980年以前建设的, 早期绝大多数水库主要功能就是农业灌溉, 现在许多水库增加了供水和旅游功能。大型水库中的63%是在1980年以前建设的, 但绝大多数控制性水库(丹江口和柘林等水库除外)都是1980年以后建成的, 所以, 1980年以前, 长江干支流水资源调控主要通过水闸和泵站, 取水总量不大, 而水库调节局限在支流或者地区层面。随着三峡等控制性水库和南水北调中东线一期工程的建成, 全流域及跨流域水库群联合调度成为可能。长江流域已经建成水闸38 204座, 其中大型水闸265座, 这些水闸累计过流、抽排能力超过2万 m³/s, 在水资源调控中占有重要地位, 如长江中下游每年通过水闸引江水量都在600多亿 m³以上, 所以需要统筹考虑流域或者区域大型水库与大型水闸联合调度。此外, 长江水系通航河流3 600多条, 通航里程总计达7.1万 km, 占全国内河比重达56%, 长江流域水利工程调度需要考虑航运要求。目前, 长江水资源调控已经开始从单一工程向水利工程群联合调度发展, 调度的目标从防洪、发电向抗旱、供水、航运、生态和应急等多目标发展, 对调控技术和管理要求越来越高。

2 典型支流和水库调控

长江流域经济最发达、最早缺水的地区是太湖流域, 而未来水资源供需矛盾突出、调控难度较大的支流是汉江, 这两个水资源二级分区在长江水资源调控中最具有代表性, 前者于2002年建成了引江济太工程, 后者有加高后的丹江口水利枢纽。三峡水库建成后, 不仅开展了向中下游补水调度、长江口压咸调度, 而且多次开展生态调度试验。

2.1 太湖与引江济太工程 太湖是长江流域经济发展最快, 水资源供需矛盾最突出的地区, 因此修建了引江济太工程^[6], 主要目的是解决干早期太湖及附近水网缺水和水环境容量不足等问题。工程通过望虞河常熟水利枢纽引长江水进入太湖流域。经望亭水利枢纽入太湖的引调水工程, 从2002—2004年开始试验性运行, 2005年以后进入长效运行状态。从2002年到2013年11年间, 累计引调长江水242.6亿 m³, 年均引水量20.21亿 m³, 占太湖流域水资源总量的11.5%, 其中进入太湖水量109.7亿 m³, 年均入湖水量9.14亿 m³, 占太湖水量的21%。

工程运行11年主要成效是: (1)太湖年平均水位抬升0.11 m, 年最低水位提高0.22 m, 较好地解决了季节性缺水问题; (2)促进了湖水的流动性, 缩短了太湖换水周期, 提高了水体自净能力, 改善了太湖及附近河网的水质; (3)成功地应对多次突发水污染事故, 有效地保障了流域供水安全; (4)通过江河间、水网间各类水闸的联合调度, 推动了太湖流域水利工程体系优化调度技术的发展。

目前存在的主要问题有: (1)受望虞河西岸支流污水和东岸分流影响, 多年平均仅有45%水进入太湖, 引水入湖效率偏低; (2)仅靠单进单出引调水对于许多湖弯水动力条件改善程度不大, 不能成为改善太湖水质的主要手段; (3)目前长江水体氮磷等营养物质含量越来越高, 引江水稀释太湖营养物质的作用在下降。虽然通过点源治理, 使太湖水体总氮含量下降, 但磷含量仍然偏高, 所以, 彻底解决富营养化问题仍然应该靠严格控制营养盐入湖, 特别是面源污染控制, 引江水只能起次要作用。未来需要研究在气候变化条件下, 湖流受气候(如风向、水温、降水等)和多通道引水和出流条件下湖流、水位、水质和水生态系统演变规律, 实施更为精准的调度。

2.2 汉江与丹江口水利枢纽 汉江是长江最长的支流, 全长1 577 km, 流域面积15.9万 km², 涉及湖北、河南、陕西、甘肃、重庆和四川等6省市。随着南水北调中线工程一期投入运行, 已经向豫、冀、

京、津等北方地区和城市供水，成为我国最重要的水源地。汉江流域多年平均地表水量 554.7 亿 m^3 ，水资源总量 573.2 亿 m^3 ，与黄河相当，但它是长江流域单位面积产流量较少的支流之一，而水资源利用率很高。以 2014 年为例，汉江流域用水总量 145.04 亿 m^3 ，水资源利用率 25.3%，南水北调中线调水一期 95 亿 m^3 ，理论利用率达到 41.9%，如果再考虑正在建设的引汉济渭工程(10 亿(近期)~15 亿 m^3 (远期))和鄂北调水工程(10 亿(近期)~15 亿 m^3 (远期))等，到 2020 年，汉江水资源利用率将达到 47.1%，成为长江流域水资源开发利用程度最高的支流。虽然汉江干流水质总体良好，但汉江一些支流、江汉平原及湖泊水污染问题突出，汉江中下游河段多次发生水华，需要的环境流量增加。所以，汉江水资源调控不仅存在防洪与供水调度之间的矛盾，也存在水量、水质和水生态联合调度难题，如汉江中下游航运、生态环境最小流量需要 500~600 m^3/s ，与枯季天然来水差距较大，主要靠丹江口水库补水。

加高后的丹江口水库正常蓄水位 170 m，相应库容 290.5 亿 m^3 ，防洪库容 110 亿 m^3 ，为不完全多年调节水库。水库调度的优先次序是：防洪、本流域用水、南水北调引水、发电和灌溉等，协调多目标调度关系十分复杂。首先是防洪与蓄水调度之间，汉江防洪以秋汛著名，如果等秋汛过后再蓄水，水库蓄满率难以保证，而过早蓄水又可能增加防洪风险。原设计防洪调度采用预报预泄，分级补偿方式，防洪限制水位 6 月 21 日到 8 月 31 日为 160 m，9 月底前控制在 163.5 m，10 月中旬蓄到 170 m。如果遇到秋汛，需要承担更大的防洪风险，如 2017 年 9 月下旬，汉江降雨量比多年均值多 2 倍以上，丹江口水库发生 6 次涨水过程，出现 2 次 17 300 m^3/s 的入库洪峰，虽然有条件蓄到设计水位，但此时汉江中游宜城以下河段已经全部超警戒水位，丹江口水库是第一次蓄到超过 165 m，大坝安全、库岸稳定和汉江中下游秋汛成为主要考虑因素，最终只蓄到 167 m。同样，汉江中下游生态环境和航运用水与水库蓄水之间也存在矛盾。原设计方案是，当水库水位低于 150 m，来水大于 350 m^3/s ，下游按需水的 80% 供水，但下泄流量不小于 490 m^3/s ；当水位低于 150 m，来水小于 350 m^3/s ，下泄流量按 400 m^3/s 控制，而丹江口到汉口为 III 级航道，满足航运要求一般需要 500 m^3/s 以上。在枯季如果遇下游硅藻水华发生，在现状汉江水营养水平下，需要 600 m^3/s 才能满足水环境容量的要求，这些条件都超过原设计调度要求。所以，需要研究在气候变化和人类活动条件下丹江口水库防洪设计标准、汛限水位和水库蓄水调水关系，平衡防汛与蓄水、调水和下游用水之间的关系。

2.3 三峡水库补水调度 三峡水库是季调节水库，有 165 亿 m^3 的调节库容和 221.5 亿 m^3 的防洪库容，而且处在上中游交界处，不仅对于中下游防洪具有巨大的功能，也可以使中下游干流每年 12 月一次年 5 月增加径流量，在不同程度上抬高各河段水位，改善枯水期长江中下游生活、生产取水条件和通航条件，可以缓解枯季长江中下游旱情和长江口咸潮入侵。

三峡水库 2003 年开始蓄水发电，到 2008 年全部建成，2010 年以后每年都蓄到了 175 m 正常蓄水位，为水库兴利和向中下游补水发挥了巨大作用。以试验性蓄水运行阶段(2008—2013 年)为例，三峡水库向中下游补水主要作用是：(1)水库累计向中下游实施航运、生态和抗旱等补水 836.9 亿 m^3 ，累计补水 702 天。2011 年后补水量趋于稳定，年均达到 210 亿 m^3 以上。(2)在枯水期结合发电对下游补水，出库流量较入库流量增加 1 000~2 000 m^3/s ，有效缓解了枯水期下游河道低水位的局面。(3)平均增加航道水深 0.72 m。葛洲坝下游(庙嘴)最小通航流量由原来的 3 200 m^3/s 提高到 6 000 m^3/s 。自 2011 年以来，长江中游宜昌至武汉段航道枯水期航道维护水深从 2.8 m 提升到 3.2~3.5 m，5 000 t 级船舶可畅行长江中游，同时大大提高了长江中上游(尤其是重庆至武汉段)的通航能力。(4)三峡水库的运行增加了长江口枯水期来水量，对抑制长江口咸潮入侵起到重要作用。三峡水库调蓄后，大通站 12 月一次年 3 月流量大于 1 万 m^3/s 的保证率由天然状态的 66.9% 提高到 93.8%，明显改善了干流枯水期的水情条件。

综上所述，除汛末蓄水期外，在枯水季比较均匀地向中下游补水，增加了下泄流量，但也应该认识到，三峡水库调节库容仍然有限，枯季增加的流量对水位的提升部分被清水下泄冲刷河床抵消，而且三峡坝址距长江口距离较远(1 749 km)，受到长江中下游江湖关系和沿线取用水影响，尤其是南水北调东线、引江济太等中下游大型引调水工程的影响，直接通过三峡水库增加下泄流量补水压咸，不仅能力有限，而且效果滞后^[7]。长江遭遇特枯来水条件时，长江口咸水倒灌是必然的，也是

不可避免的，要减轻其不利影响，不仅需要严格控制长江中下游干流水利工程取用水规模，还可以采取河口地区多水源应急避咸方案^[8]，如适当控制中下游引提水规模，开展长江口沿江的陈行、宝钢水库与崇明岛的青草沙和东方西沙水库的联合避咸取水调度，三峡水库可以起到配合作用。

2.4 三峡水库生态调度 生态调度分为广义和狭义两类，广义生态调度包括生态和环境两方面，如三峡库尾减淤、控制库弯水华、向下游及河口补水、补沙、水生生物栖息地重塑和旗舰物种产卵等方面的调度，而狭义生态调度主要针对特定保护物种产卵(如四大家鱼)。为促进长江四大家鱼自然繁殖，在试验性蓄水阶段的2011—2014年，三峡水库结合上游来水条件，利用水库汛前加速消落时机，通过改变水库下泄流量过程，人工创造了适合“四大家鱼”产卵繁殖所需水文、水力学条件的洪峰过程，先后开展了5次试验性生态调度工作，具体结果见表2^[9]。从表2可见，通过三峡水库的调蓄，在四大家鱼产卵期，制造了持续3~10天流量涨落过程，流量涨幅在1 000~6 000 m³/s之间，且同时保证三峡水库下游流量具有明显的涨幅、干流水位具有一定的变化幅度。

表2 2011—2014年三峡水库实施试验性生态调度工作情况

时间	调度情况	宜昌断面			
		洪峰初始水位/m	水位日上涨率/(m/d)	流量日增长率/((m ³ /s)/d)	洪峰水位上涨持续时间/d
2011年6月16—19日	日均出库流量分别为14 000、16 000、17 500和19 000 m ³ /s，19日后流量维持在8 600~19 000 m ³ /s之间持续到22日。	41.62	0.51	9 950	7
2012年5月25—31日	控制出库流量分别为18 500、14 800、11 900、13 800、18 900、21 800和22 400 m ³ /s，呈先减少后持续加大的过程。	42.92	1.02	13 600	4
2012年6月20—27日	20—21日日均出库流量由12 600 m ³ /s减少至12 100 m ³ /s，22—23日出库流量维持在12 100 m ³ /s左右，24—27日逐日出库流量分别为12 800、15 300、17 400和18 600 m ³ /s，逐渐增加。	42.54	0.64	12 600	4
2013年5月7—16日	控制日均出库流量分别为6 765、7 532.5、8 330、9 277.5、10 395、11 325、12 675、15 400、16 075和16 350 m ³ /s。	39.64	0.46	6 450	10
2014年6月4—6日	三峡水库6月4日、5日、6日的日均下泄流量分别按15 500、17 000及18 500 m ³ /s控制。	暂无资料	暂无资料	暂无资料	暂无资料

为监测三峡工程生态调度效果，相关部门在长江干流设置了宜都、沙市、监利3个监测断面，对鱼卵(苗)资源进行监测。监测结果表明，2011—2014年三峡工程连续4年的生态调度期间，均发现了四大家鱼的自然繁殖现象，监测结果见表3。如表3所示，2011年6月16—19日生态调度期间，宜昌下游河段四大家鱼有一定规模的产卵，推算总卵苗数1.31亿粒；2012年5—6月两次生态调度期间，宜都断面监测到6次产卵，推算总卵苗数5.15亿粒；2013年5月7—16日，监测期间宜都江段、沙市江段、监利江段“四大家鱼”卵苗总量分别达到1.31亿粒(尾)、1.18亿粒(尾)、5.2亿粒(尾)；2014年生态调度期间，在调度第三天宜昌至宜都江段监测到较大规模的四大家鱼繁殖高峰，四大家鱼鱼卵平均密度较生态调度前提高3倍，调度第三天单日鱼卵密度是调度前的7倍。

综上所述，三峡水库在试验运行期开展的生态调度试验，通过下泄适宜的洪水过程，对于促进四大家鱼自然繁殖是有成效的。值得注意的是，与水库建成前比较，三峡水库下游河道春夏季的水温比天然情况仍然偏低，下泄流量过程趋于均一化，涨落次数偏少，中小洪水过程不明显，仍然对四大家鱼繁殖产卵时间和产卵规模产生了一定的影响，另外，产卵规模的减小与禁鱼期偏短、人为过度捕捞等其他人类活动关系也很大，只有采取生态调度与渔业管理相结合的综合措施才能保证四大家鱼自然繁殖的规模。目前三峡水库的生态调度尚局限在四大家鱼产卵调度，对于中华鲟产卵调度尚未进行，而对于中下游鱼类产卵场等栖息地修复调度等多目标生态调度尚未起步。

表3 三峡工程 2011—2014 年试验性生态调度监测结果统计

时间	监测结果		
	宜都断面	沙市断面	监利断面
2011年6月16—19日	鱼卵苗总量1.31亿粒	鱼卵苗总量128万粒	
2012年5—6月期间	鱼卵苗总量5.15亿粒	鱼卵苗总量4.06亿粒	
2013年5月7—16日	鱼卵苗总量1.31亿粒	鱼卵苗总量1.18亿 其中5月15—18日期间发生大规模繁殖现象,繁殖规模5840万	鱼卵苗总量5.2亿粒
2014年6月4—6日	在调度第三天宜昌至宜都江段监测到较大规模的繁殖高峰,四大家鱼鱼卵平均密度较调度前提高3倍,调度第三天单日鱼卵密度是调度前的7倍。		

3 水库群联合调度

尽管1998年大洪水期间,汉江的丹江口、清江的隔河岩、资水的柘溪、沅江的五强溪和修水的柘林等水库发挥了重要的调蓄洪水作用,但主要调节的是支流洪水过程,对长江中下游干流防洪作用是间接的,长江流域控制性水库群联合调度是从三峡水库建成以后开始。由于上游控制性水库逐渐建成以及三峡水库蓄水期对于中下游影响受到社会关注,需要同时统筹考虑水库群蓄水和蓄水期向下游补水调度。2016年长江防总已经将上游21座控制性水库纳入联合调度范围,2017年,又将中游7座大型水库纳入统一调度,参与联合调度的控制性水库达到28座。

3.1 从单水库多目标调度到水库群联合调度 大型水库一般都是多功能的,如防洪、发电、航运、供水、灌溉、旅游、生态等,绝大多数控制性水库都有两种以上功能,即使对于单一水库,其多目标调度已经不易,而对梯级水库群联合调度就更为复杂,不仅有大量科学和技术问题有待解决^[10-11],如多目标优化、上下游水位、流量、生态基流衔接和蓄泄关系等,还有大量利益协调等管理工作,如水库分属不同管理主体、发电效益分成问题等,例如金沙江8个纳入联合调度的控制性水库,分属三峡集团、金沙江中游公司、汉能集团、华能集团和大唐集团等5家公司,管理关系复杂。再以防洪调度为例,金沙江梯级水库调度既要考虑攀枝花、宜宾、泸州等本江段和川江主要城市防洪安全,还要配合三峡水库解决长江中下游防洪问题,在发电、汛前水位消落、汛后蓄水等方面都需要统一考虑。目前长江防办已经制定出台长江控制性水库联合调度方案,在防汛、汛后蓄水和应急调度等方面取得初步成果。

3.2 从单一河流水库群联合调度到流域控制性水库联合调度 流域水库群联合调度与单一河流梯级水库群联合调度相比较,问题更为复杂,不仅涉及上下游水库、干支流水库群联合调度,还涉及到江湖关系和跨流域调水工程联合调度问题。以2017年长江中游防洪调度为例,受6月22日以来连续强降雨影响,长江中下游干流水位维持快速上涨势态,形成1号洪峰,中游莲花塘至大通河段全线超警(干流堤段超警戒最长时达到1691 km),而湖南湘江、资水、沅江,江西修水等主要河流发生超保证、超历史洪水位,按照《长江上中游水库群联合调度方案》规定,此时正是长江上中游水库群联合调度为中下游防洪减负的时机。根据调度方案,三峡水库在枯季最小下泄流量是6000 m³/s,这次在主汛期的7月将三峡下泄流量降到8000 m³/s,拦蓄率达到60%,是史无前例的,由于动用了长江上中游28座水库,拦蓄洪量102.4亿 m³,其中三峡水库拦蓄49.7亿 m³,上游水库群拦蓄25.4亿 m³,洞庭湖流域水库拦蓄27.3亿 m³,换来长江干流莲花塘站江段洪峰水位下降约1.0~1.5 m,汉口站江段洪峰水位下降约0.6~1.0 m、九江站至大通站江段洪峰水位下降约0.3~0.5 m成果,显著减轻了中下游的防洪压力,同时增加了三峡等水库汛期水力发电量,实现了多赢的局面。

3.3 从兴利调度到兼顾生态环境调度 过去水库调度主要是防洪和兴利调度,现在不得不考虑生态环境调度,如金沙江水库群调度需要考虑长江上游珍稀特有鱼类保护区保护鱼类需要的水文、水动力和水温过程,三峡水库需要考虑中华鲟和四大家鱼产卵期水文和水体物理化学性质(如水温)的调

度,也需要考虑三峡水库库尾减淤、泥沙过坝等环境调度,对于中下游水系连通工程,需要根据营养物质含量情况进行引江济湖的环境调度。

3.4 从水库群调度到重要水利工程群联合调度 控制性水库调度虽然在防汛中十分重要,但抗旱、供水和应急调度需要沿江大型引调水工程配合,同时需求配合统一的管理措施。例如特枯年份(95%年份)长江中下游供水调度,不仅要发挥三峡等控制性水库的作用,还需要同时考虑包括南水北调东线、引江济太等重要引江工程(包括大型水闸)实施统一调控,并配合严格的水资源管理措施才能保证供水安全。因为目前长江中下游沿江取水量已经达到600多亿方,相当于流量 $1\ 903\ \text{m}^3/\text{s}$,超过了枯季三峡水库向中下游补水的平均流量。随着近年来城市内涝问题突出,重要城市和地区抽排能力大幅提高,例如:仅武汉市总抽排能力就达 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,长江中下游和两湖地区总抽排能力超过 $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上。所以,未来在主汛期,水库防洪调度还要统一考虑大型水闸和泵站,平衡外江防洪与内涝关系。

4 水资源综合调控未来展望

水资源调控主要通过水库等水利工程,而水库调度过去主要考虑防洪和兴利调度,现在还需要考虑抗旱、供水、水库减淤、生态环境和应对突发水污染事故的应急调度等,不仅调度目标多了,而且由于水库群的空间布局差异和各方利益协调难度也越来越大,还有许多科学、技术和管理问题需要研究^[12]。

4.1 科学问题 气候变化的不确定性、人类活动快速变化和水生态系统的复杂性使得水资源调控科学研究永无止境。目前虽然已经研发出许多水利工程调度模型,但真正能够实时指导调度实践的模型很少,主要是模型的定量化和智能化程度不够。量化就是将以前以会商形式为主的经验性调度方案上升到数学模型和理论层面。随着预见期的临近,雨情和水情预报精度逐步提高,可将不同调度方案运用后的量化情景及时准确地计算出来。智能化是将历史资料、现实信息和专家调度经验加以积累、学习和反馈的过程,并及时制定优化的调度方案,涉及到:(1)基于串并联分布的水库群多目标协调巨系统优化调度理论;(2)水库群联合调度的风险识别和控制理论;(3)梯级水库联合生态调度理论与调度效果评价方法;(4)梯级水库群泥沙冲淤规律及江湖关系演变机理;(5)梯级水库联合调度作用下河流生态系统演变规律;(6)梯级水库动态汛限水位控制理论及洪水资源化利用的风险控制方法等。

4.2 技术问题 由于不同地区水资源问题不同、水利工程功能不同,水资源调控需要解决的技术难题也不同,如:(1)气候变化和人类活动常常引起的流域产汇流机制的变化,使已经建立的调度模型需要不断地修正,需要研究在变化条件下水文精细预报技术及水库群联合调度模型。(2)实时、动态、反馈的非线性快速求解方法是解决调度模型实用化的关键,需要改进联合调度优化数学模型和快速算法,使决策者可以及时用到计算成果,解决数学模型计算跟不上实时会商调度实践的问题。(3)由于各水电站在电网中功能不同,需要研究基于用电需求变化及输变电能力下水电站发电、蓄水、蓄能的优化调度方案,解决弃水弃电问题。(4)由于水生态系统的复杂性,目前的生态调度主要针对保护鱼类产卵水文过程的模拟,离恢复鱼类生活史中的三场一道(繁殖场、产卵场、越冬场和洄游通道)和修复水生态系统结构还有很大的距离,需要建立兼顾生态保护和恢复河流生态控制性因子联合调控技术,将生态调度目标真正编入水库调度方案中,并付诸实施。(5)根据变化条件和动态变化的大数据,开发智能化水库群联合调度决策支持系统及仿真技术。(6)考虑河道安全泄量和堤防安全等级下的梯级水库群防洪调度方案,将防洪工程体系的功能发挥统一考虑。(7)枯水年控制性水库与南水北调中东线联合调度方案。(8)需要研究流域和地区级控制性水库群与规模以上取排水工程联合调度方案,确定控制性水库与沿江地方取用水责任和利益分担问题。

4.3 管理问题 水利工程联合调度综合效益肯定比单个工程调度好,但由于各工程隶属于不同地区和不同的业主,整体综合效益好不一定单个工程效益好,社会效益好,不一定经济效益好,协调各方利益难度大,管理难题甚至超过技术难题,有许多管理问题需要进一步地研究,如:(1)需要制定不同河段(地区)、不同层次和不同对象的水利工程群公益调度启动条件(域值),不仅保障单个水利

工程的效益, 而且使公益调度得到利益相关方和社会的理解和支持。(2)建立水利工程联合调度效果监测和评价体系, 为利益协调和补偿提供依据。(3)研究大型水利工程联合调度基金筹措机制, 组成由政府、受益地区或者受益主体共同出资的调度补偿基金。(4)建立控制性水库与大型水闸、大型泵站联合调度管理机制, 协调流域与地方关系。(5)建立防洪与抗旱兼顾的风险控制与责任分担机制, 科学利用洪水资源。(6)建立大型水利工程联合调度下的水权制度和水市场运作机制, 充分发挥水资源综合利用价值。(7)建立面向电力市场的梯级水电站竞价规则和交易机制, 实现水电站厂和电网的利益均衡。

参 考 文 献:

- [1] 水利部长江水利委员会. 长江流域水资源综合规划[R]. 武汉: 长江水利委员会, 2012.
- [2] 陈进, 黄薇. 长江流域水资源配置的思考[J]. 水利发展研究, 2005, 5(12): 14-17.
- [3] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1990.
- [4] 方子云. 保护环境促进长江经济带的可持续发展[J]. 人民长江, 1998, 29(1): 38-40.
- [5] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源综合规划[R]. 武汉: 长江水利委员会, 2010.
- [6] 梅青, 冯大蔚. 引江济太对保障太湖流域供水安全的作用分析[J]. 中国水利, 2015 (21): 24-27.
- [7] 陈进. 三峡水库抗旱调度问题的探讨[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 19-23.
- [8] 许继军, 陈进, 常福宣. 控制性水利工程对长江中下游水资源影响与对策[J]. 人民长江, 2014, 45(7): 11-17.
- [9] 陈进, 李清清. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 1-6.
- [10] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I: 模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1009-1018.
- [11] 黄草, 王忠静, 鲁军, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 II: 水库群调度规则及蓄放次序[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1175-1183.
- [12] 许继军, 陈进, 尹正杰, 等. 长江流域梯级水库群联合调度关键问题研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(12): 48-52.

Regulation of water resources and operation of reservoir group in the Yangtze River basin

CHEN Jin

(Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment,
Changjiang River Scientific Research Institute of CWRC, Wuhan 430010, China)

Abstract: The Yangtze River basin is facing severe issues such as shortage of water resources, degradation of water quality and water ecology. It is urgent to strengthen the strict water resources management and the optimal regulation of water conservancy system. The Large-scale water conservancy project, such as the Three Gorges, the mid-route and east-route of South-to-North Water Transfer Projects, have provided essential engineering measures for water resources allocation. Furthermore, the Three Red Lines of Water Resources Management, and other measures have improved managerial level of water resources and regulatory level of hydraulic engineering in the Yangtze River Basin. Firstly, this study reviewed the change of water resources supply and demand relationship in the context of socio-economic development, the progress of reservoir construction, water resources regulation. Secondly, the research progress and problems in the synthetic regulation technique of water resources of the Yangtze River basin have been introduced based on the water diversion project from Yangtze River to Tai Lake basin and the operation of controlled reservoirs such as Danjiangkou Reservoir on the Han River and Three Gorges on the Yangtze. Finally, the scientific, technical and administrative research which should be taken in the further comprehensive water resources regulation has been discussed.

Keywords: Yangtze River basin; water resources regulation; reservoir group; multiple target regulation

(责任编辑: 杨虹)