

南水北调工程概述

水利部南水北调规划设计管理局原局长、党委书记 赵存厚

南水北调工程是大国重器,是国之大事,是国家级水资源调配的世纪工程、民心工程。南水北调工程是一项规模宏大,涉及多流域、多水源、多地区、多部门、多用户、多目标、多领域、多学科的非常复杂的系统性水利工程。截至2021年3月23日,南水北调调水超408亿 m^3 ,逾1.3亿人直接受益。

1 设想与规划

1.1 设想

1952年,毛泽东主席视察黄河时提出“南水北调”的伟大设想:“南方水多,北方水少,如有可能,借一点也是可以的。”

“南水北调”伟大设想从毛主席提出,到2002年工程开工,经历了50年充分民主论证,50多个方案科学比选,由国家24个科研设计单位、沿线44个地方、跨学科、跨部门、跨地区联合研究,经近百次国家层面会议、院士110多人次献计献策,经专家6000多人次参加论证。实施南水北调工程,是经过充分论证、权衡利弊、慎重决策的结果。

1.2 总规划

“南水北调”的设想提出后,经过几十年研究,确定总体布局为:分别从长江上、中、下游调水,沟通长江、淮河、黄河、海河,构成“四横三纵、南北调配、东西互济”的大水网格局,以适应西北、华北各地的发展需要,即南水北调西线工程、南水北调中线工程和南水北调东线工程。总投资约5000亿元人民币,约4.38亿人受益,设计年总调水量448亿 m^3 ,其中东线148亿 m^3 ,中线130亿 m^3 ,西线170亿 m^3 ;输水总长度4350km,其中东线一期1156km,中线一期1432km,西线待定;东线起点扬州三江口,终点天津;中线起点丹江口水

库,终点北京团城湖;西线尚未开工建设,但设计思路是将长江等流域上游的水调到黄河上游。

东线工程规划总调水规模148亿 m^3 ,向山东、河北、天津供水,全长1467km,分三期实施,第一期工程调水规模89亿 m^3 ,第二、三期工程向北延至河北、天津,调水总规模达148亿 m^3 ,13座梯级泵站提升,实现水往高处流。

中线工程规划调水规模130亿 m^3 ,从丹江口水库引水穿黄河至北京、天津,全长1432km,分二期实施,第一期工程调水规模95亿 m^3 ,第二期工程实施后,调水规模扩大至130亿 m^3 ,实现全自流。

西线工程规划从大渡河、雅砻江和通天河向黄河上游调水,调水规模170亿 m^3 ,分三期实施。

先期实施东线一期工程调水89亿 m^3 ,中线一期工程调水95亿 m^3 ,主要解决城市用水,兼顾农业和生态用水。

2 建设与运行

南水北调东线一期工程于2002年12月27日开工,2013年11月15日通水。南水北调中线一期工程2003年12月31日开工,2014年12月12日通水。

南水北调工程包含水库、电站、湖泊、运河、河道、大坝、泵站、隧洞、渡槽、暗涵、倒虹吸、PCCP管道、渠道、节制闸、退水闸等水利工程,是一个十分复杂的巨型水利工程,其规模及难度,在国内外均无先例。

2.1 南水北调东线工程

南水北调东线工程在长江下游扬州附近抽引长江水,经京杭大运河、洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖,穿过黄河后自流,途经江苏、山东、河北,最后到达天津。东线工程分两期进行建设:第一期工程年抽江水量

89 亿 m^3 , 向江苏、山东供水。新增抽江水量 39 亿 m^3 ; 目前淮委同海委正在进行新的东线二期工程规划。主要工程如下。

2.1.1 江苏江都水利枢纽工程

江都水利枢纽工程由 4 座大型电力抽水站、12 座大中型水闸、3 座船闸、2 座涵洞、2 条鱼道以及输变电工程、引排河道组成, 是一个集泄洪、灌溉、排涝、引水、通航、发电、改善生态环境等多项功能于一体的大型水利枢纽工程。江都泵站共拥有 33 台机组, 总功率为 56850kW, 每秒钟可提引江水 400 m^3 。

2.1.2 江苏洪泽湖

洪泽湖在淮安西侧, 宋金战争期间黄河向南决堤侵占淮河水道, 堵塞的黄淮河水使淮阴以西数十里低洼区小湖连片, 形成洪泽湖。元、明期间加固湖东岸堤坝形成著名的高家堰(洪泽湖大堤)后汛期湖水西漫, 安徽受灾, 北洋政府时期张謇主持导淮局, 提出淮河应当七分入长江, 三分入东海, 保留洪泽湖作为缓冲水库的功能, 南水北调工程利用洪泽湖作为东线工程调蓄湖泊。

2.1.3 江苏骆马湖

骆马湖直线长 27 余 km, 西连中运河, 平均宽 13km, 总面积 375 km^2 。骆马湖水多来自沂蒙山洪和天然雨水, 沿湖又无工业污染, 常年水体清澈透明, 湖滩浅水中生长密密匝匝的芦苇和众多浮游生物, 为鱼类繁衍提供了良好的生态环境和水资源, 是南水北调东线一期工程的优良调蓄湖泊。

2.1.4 山东台儿庄泵站

台儿庄泵站是山东境内第一级泵站。中运河台儿庄段是指从微山湖湖口到江苏邳州的韩庄运河。该段是长江以北大运河唯一东西走向的航道, 也是世界文化遗产“中国大运河”27 段遗产河道之一。台儿庄泵站设计调水流量 125 m^3/s , 安装立式轴流泵 5 台, 总装机容量 12000kW。

2.1.5 山东南四湖

南四湖位于山东济宁以南, 作为山东最大的淡水湖, 承接了苏鲁豫皖 4 省 32 个县 53 条河流的汇水, 被

称为南水北调东线的“大水缸”, 其水质好坏, 直接关系到南水北调调水的成败, 是东线治污重头戏。这个昔日污染严重的“酱油湖”, 从 2003 年起, 水质 12 年持续改善, 从劣五类跃升到三类水, 跻身全国水质优良湖泊行列。

2.1.6 山东东平湖

东平湖位于山东省泰安市东平县境内, 是水泊梁山的遗存水域, 山东省第二大淡水湖泊, 湖区总面积 627 km^2 , 其中一级湖常年蓄水。南水北调东线一期工程完成后, 东平湖控制水位高程 39.3m。湖水位低于 39.3m 时抽江补湖。

2.1.7 山东大屯水库

大屯水库位于山东省德州市郝王庄镇, 是南水北调东线一期工程的终点站, 主要向德州市德城区供水, 采用全库盘铺膜防渗技术的大屯水库工程是设计科学、技术先进、生态和谐、环境优美的精品工程。水库设计蓄水位 29.8m, 相应最大库容 5209 万 m^3 , 向德州市德城区年供水量 10919 万 m^3 , 向武城县城区年供水量 1583 万 m^3 。

2.2 南水北调中线工程

南水北调中线一期工程从丹江口水库引水, 利用伏牛山和桐柏山间的方城垭口“流出”南阳盆地, 全程自流到京津冀豫。

南水北调中线工程从加高扩容后的丹江口水库引水, 经湖北、河南、河北, 输水到北京、天津。中线工程一期线路总长 1432km, 多年平均调水量 95 亿 m^3 (枯水年 62 亿 m^3)。目前南水北调中线引江补汉工程正在规划。主要工程如下。

2.2.1 丹江口水库大坝

丹江口水库大坝加高工程技术复杂, 施工难度大。大坝加高施工期间, 枢纽仍处于正常运行状态, 需要协调好工程加高施工和枢纽正常运行调度之间的矛盾。大坝加高工程贴坡混凝土温度控制要求高难度大, 为满足安全度汛以及混凝土要求温控, 贴坡混凝土及溢流坝的加高不能全年施工, 只能在低温季节和枯水期进行。

2.2.2 陶岔渠首引水枢纽

丹江口水库在死水位 150m 时,陶岔引水闸能满足一期工程设计流量 $350\text{m}^3/\text{s}$ 的过流要求。丹江口水库水位 156m 时,陶岔引水闸能满足一期工程加大流量 $420\text{m}^3/\text{s}$ 的过流要求。

2.2.3 总干渠工程

基于丹江口水库多年平均入库径流量和受水区设计水平年需水量计算得出中线一期工程多年平均调水 95 亿 m^3 。南水北调中线总干渠渠道规模与调水量、调度方式、受水区供水过程相关。设计单位将北调水和当地水联合调度,通过 70 个供水片区和 1956—1997 年 42 年长系列逐旬调度计算,得出与 95 亿 m^3 相对应的总干渠各渠段及分水口门长系列流量过程,总干渠渠首设计引水流量 $350\text{m}^3/\text{s}$,加大引水流量 $420\text{m}^3/\text{s}$ 。

2.2.4 沙河渡槽工程

沙河渡槽工程总长 9050m,长度世界排名第一;最大过流量 $380\text{m}^3/\text{s}$,排名世界第四;并行输水槽数 4 槽,排名世界第一;下输水断面总面积 219.4m^2 ,世界第一。总体上,综合规模世界第一。其中,大郎河梁式渡槽采用多跨 U 型 3 孔连接方式,最大高度达 9.6m,大跨度薄壁双向预应力结构,预制整体吊装“槽上运槽”施工。

2.2.5 穿越黄河工程

穿黄工程位于郑州市以西约 30km,北岸竖井建于黄河河滩地中细砂强透水地层中,内径 16.4m,井深 50.5m,外层为地下连续墙形式,厚 1.5m,深 76.6m;内层为 0.8m 厚钢筋混凝土现浇衬砌,采用逆作法施工,均居国内之最。所穿黄河段是典型的游荡性河段,地质条件极为复杂。在高地下水水位下,在密实砂层、砂砾石层、黏土层等复杂地层中,采用泥水平衡盾构机一次性掘进,单洞长 4250m。

2.2.6 焦作市区段工程

焦作段是中线工程唯一从市区穿过的渠段。为保证中线总干渠安全运行,对填方渠段根据以下原则进行安全加固设计和施工:“设计标准适当提高;节制灵活,退水有槽;防渗排水,各司其道;基础处理,坚实可

靠;填料合格,压实质好;堤防穿越,严禁渗绕;安全监测,及时警报。”

2.2.7 滹沱河倒虹吸工程

滹沱河又被称为“石家庄的母亲河”。滹沱河倒虹吸管身长 2225m,采用三孔一联钢筋混凝土结构。通水以来前后 8 次向滹沱河补水约 3000 万 m^3 ,相当于 12 条石家庄市内河民心河的水量。20 多年来,滹沱河几乎常年无水,河道里全是沙坑丘陵,杂草丛生。自从南水北调中线工程通水以来,水清、岸绿、景美,生态效果非常明显。

2.2.8 天津外环河工程

南水北调中线工程已累计向天津市引调长江水超过 40 亿 m^3 ,已实现 1700 多天连续不间断安全供水,供水范围覆盖天津市中心城区、环城四区及滨海新区等 14 个行政区,近千万市民受益,有效缓解了天津市水资源短缺的局面。

2.2.9 北京惠南庄泵站工程

惠南庄泵站是南水北调中线干线工程唯一的一座大型加压泵站,也是北京段实现小流量自流、大流量加压输水的关键控制性建筑物。泵站上游与北拒马河暗渠相接,下游与 PCCP 管线相连, I 等工程大(1)型建筑物。泵站设计流量 $60\text{m}^3/\text{s}$,选用 8 台卧式离心泵机组,6 工 2 备,单机容量 7300kW,总装机容量 58.4MW,采用机组并联与变频调速相结合的运行方式。

2.2.10 北京团城湖蓄水工程

在北京玉泉山下,颐和园西南,一个面积约 67 公顷的看似“公园”的园区,就是南水北调北京配套工程中重要的调蓄枢纽工程、江水进京终点——团城湖调节池。团城湖原为密云水库和官厅水库的调水枢纽,将南水北调终点设在这里,三大水源汇集合一,便于联合调度,更有利于城市供水安全、稳定。团城湖调节池具有分水、调蓄、切换和生态功能等,是南水北调重要的配套设施之一。

自 2014 年 12 月 27 日南水北调长江水进京,至 2019 年 6 月底,北京市累计接收丹江口水库来水达到 47.64 亿 m^3 ,水质始终稳定在地表水环境质量标准 II

类以上。全市直接受益人口超过 1200 万,供水范围基本覆盖中心城区以及大兴、门头沟、昌平、通州等部分区域。在北京,74% 的水来自于南水北调中线工程,550 公顷重要水源地皆由南水北调中线工程进行生态补水,北京市地下水回升 2.73m,南水北调工程有效改善了北京地区的生态。

另外,南水北调已向白洋淀补水 2.22 亿 m^3 。南水北调中线工程通过河北保定的瀑河、北易水河多个退水闸和郑家佐分水口向白洋淀生态补水 2.22 亿 m^3 ,为雄安新区发展助力。白洋淀湿地保护区工作人员和鸟类专家 2020 年 5 月份首次观测到世界极危物种——青头潜鸭,还拍摄到疑似金雕的国家级重点保护动物。

3 一期工程主要技术创新

3.1 东线一期工程主要技术创新

低扬程、大流量、长运行时间水泵机组选型应用,高效泵装置指标体系研究,贯流泵装置关键设备及制造研究,平原水库水平防渗机理及应用技术研究,二级坝煤矿采空区泵站设计施工技术研究,大型渠道设计与施工新技术研究,南水北调东线工程泵站(群)优化调度关键技术集成与示范研究等。

3.2 中线一期工程主要技术创新

丹江口大坝加高工程关键技术研究,复杂地质条件下穿黄隧洞关键技术研究,大流量预应力渡槽设计和施工技术研究,大型渠道设计与施工新技术,膨胀土地段渠道破坏机理及处理技术研究,超大口径 PCCP 结构安全与质量控制研究,煤矿采空区上建设大型输水工程治理技术,超长自流输水工程高精度测量控制网技术,大型输水工程水力学与冰期输水控制技术,南水北调工程智慧化运行调度控制技术等。

4 效益

4.1 受水区效益

4.1.1 社会效益

截至 2021 年 4 月 2 日,南水北调东、中线一期工

程累计调水 418.55 亿 m^3 ,东线调水 49.94 亿 m^3 ,中线调水 368.61 亿 m^3 。南水北调工程建成通水以来,为受水区带来了大量优质的长江水,解决了北方地区水资源短缺问题,解决了 700 万人长期饮用高氟水和苦咸水的问题,促进了受水区经济发展和城市化进程,提高了当地的水资源承载能力。

4.1.2 生态效益

a. 生态补水:截至 2020 年 12 月底,东、中线受水区累计河道补水量为 90.46 亿 m^3 ,中线补水 89.78 亿 m^3 ,东线补水 0.68 亿 m^3 。

b. 地下水压采:南水北调东、中线受水区地下水压采为 79.4 亿 m^3 。受水区地下水位不同程度回升,截至 2020 年 12 月,与 2019 年相比,河北省浅层水位回升 0.34m,深层水位回升 1.32m,河南省浅层水位回升 0.5m 以上。山东省地下水水位整体呈现回升趋势,北京地下水水位自 2016 年以来累计回升超 3m。

4.2 建设区效益

4.2.1 湖北省境内 4 项治理工程

针对中线调水工程对汉江中下游可能造成的不利影响,《南水北调工程总体规划》安排兴建了兴隆水利枢纽、引江济汉、改建闸站、整治局部航道等 4 项汉江中下游治理工程,为湖北省带来如下效益:

a. 补水效益:至 2019 年 7 月 15 日累计补水 170.05 亿 m^3 ;

b. 灌溉效益:直接灌溉耕地面积 945 万亩,供水保证率达到 100%;

c. 航运效益:通过引江济汉干渠,往返荆州和武汉的航程缩短 200 多公里、荆州与襄阳的航程缩短了 600 多公里;

d. 发电效益:兴隆枢纽工程年均发电量为 2.25 亿 kWh,年发电收入约为 6000 万元;

e. 生态效益:通过引长江水入汉江及沿线河流、湖泊,保证了汉江中下游生态和供水安全,吸引了中华秋沙鸭、黑鹳等珍稀鸟类来兴隆水域安家落户。

4.2.2 中线水源地(丹江口上游)

陕西省是丹江口水库的重要水源地,为南水北调

中线水源水量及水质提供了基础保障。

南水北调中线一期工程建成后,丹江和汉江年均入丹江口水库水量 287.72 亿 m^3 ,占丹江口水库多年平均入库的 70%,为丹江口上游水源地带来了通水效益。同时,水质大大提高,据统计,汉江出境水质达到国家 II 类标准的占 98.41%,达到国家 I 类标准的占 1.59%;开江水质达到国家 I 类标准的占 81.10%,达到国家 I 类标准的占 12.42%。截至目前累计完成小流域综合治理 562 条,治理水土流失面积 16851 km^2 。

4.2.3 南四湖及周边生态环境现状治理成效

南四湖是南水北调东线工程的输水干线和重要调蓄水库。20 世纪 80 年代末期开始被污染,到 2000 年前后,水污染达到顶点,水质一度达到劣 V 类。

为保证南水北调效益的发挥,对南四湖及周边生态环境进行治理。通过治理,南四湖及周边的生态环境得到有效修复,区域生物种群数量和多样性得到明显恢复,湖区鱼类、底栖动物、浮游植物物种比 2010 年分别增加 20.9%、48.6%、43.5%。截至目前,已建成人工湿地 23.9 万亩,修复自然湿地 22.6 万亩,构建了环湖沿河生态屏障;湖滨自然岸线长度较 2010 年增加了 53.42%;水质达标率从 3% 提高到了 100%。水清了,岸绿了,黑臭的南四湖“起死回生”,跻身全国水质优良湖泊行列。

5 展望

5.1 东线后续工程

东线二期工程规划:黄河以南段基本采用一期工

程输水线路,扩大规模,扩挖河道;黄河以北新建位德—德吴渠、胶东输水干线,利用南运河,新建廊坊干线。

规划抽江规模 870 m^3/s ,过黄河 370 m^3/s ,胶东输水干线 100 m^3/s 。东线二期多年平均净增供水量 53.55 亿 m^3 ,总投资 2898.8 亿元。

5.2 中线后续工程

丹江口水库是南水北调中线工程的水源,其来水量对保障调水工程顺利实施非常重要。丹江口水库 1956—2016 年多年平均来水量为 374 亿 m^3 ,其中 1956—1998 年来水量为 388 亿 m^3 ,1966 年、1978 年、1997 年为枯水年份;1999—2018 年多年平均来水量为 339 亿 m^3 ,2013—2016 年和 1999—2002 年为连续枯水年,2013—2016 年平均年来水量为 251 亿 m^3 ,1999—2002 年平均年来水量为 262 亿 m^3 。

目前汉江流域主要引调水工程为:南水北调中线一期工程,年调水量 95 亿 m^3 ;引汉济渭工程,年引水量近期为 10 亿 m^3 ,远期为 15 亿 m^3 ;鄂北水资源配置工程,年引水量为 13.98 亿 m^3 。

引江补汉工程规划:从三峡库区长江干流北岸龙潭溪取水,自流至丹江口大坝下游潘家岩村安东河口入汉江,线路长 194.3 km ,均为隧洞,进口水位 143.33 ~ 173.30 m ,出口水位约 90 m ,进口流量 250 ~ 295 m^3/s ,采用单条洞径 11 m 的有压隧洞输水。工期 108 月,投资 799.09 亿元。

目前,南水北调西线工程正在进行方案比选论证。

(上接第 48 页)

泵站的安全可靠运行关系到灌溉、排涝、泄洪、通航、发电、生态环境等领域的安全,设备全生命周期健康监测有着非常重要的意义,鉴于无线互联技术和工业锂电池技术的进步,智慧巡检无线监测系统在已建成泵站不停机改造中有着更加广阔的应用前景。

参考文献

[1] 张运楚,梁自泽,谭民. 架空电力线路巡检机器人的研究综述[J]. 机器人,2004,26(5):467-473.

[2] 周立辉,张永生,孙勇,等. 智能变电站巡检机器人研制及应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):85-88.

[3] 李学民. 矿用巡检机器人关键技术分析[J]. 煤矿机械,2018,39(5):71-73.

[4] 江苏省江都水利工程管理处. 一种水利泵站自动巡检系统:中国,ZL 2018 1 0957071.9[P]. 2020-08-07.

[5] 刘元林,梅晨,唐庆菊,等. 红外热成像检测技术研究现状及发展趋势[J]. 机械设计与制造,2015(6):260-262.

[6] 王有元,蔡亚楠,王灿,等. 基于云平台的变电站设备智能诊断系统[J]. 高电压技术,2015,41(12):3895-3901.