

## Engineering Achievements

# 南水北调中线一期工程

钮新强

Changjiang Institute of Survey, Planning, Design, and Research (CISPDR) Co., Ltd., Wuhan 430010, China

## 1. 工程简介

南水北调中线工程是缓解中国黄淮海平原水资源严重短缺、优化水资源配置的重大战略性基础设施及改善京津冀等地区水生态和水环境的生态修复工程。工程规划分为二期建设：一期工程从长江支流汉江丹江口水库引水；二期工程将延伸至长江干流引水。南水北调中线一期工程总干渠全长约 1432 km，多年平均调水量为  $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，横穿长江、淮河、黄河、海河四大流域，穿越大小河流 700 多条，是迄今为止世界上输水线路最长的大规模跨流域调水工程。一期工程包括丹江口大坝加高、陶岔渠首、输水总干渠及沿线各类建筑物（隧洞、渡槽、暗涵、倒虹吸等）2387 座。工程线路总布局见图 1。

南水北调中线一期工程于 2003 年 12 月 30 日开工，2014 年 12 月 12 日全线正式通水，工程投运以来总体运行安全、平稳。截至 2021 年年底，累计调水量达  $4.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （其中，2021 年度调水量达到  $9.05 \times 10^9 \text{ m}^3$ ），惠及沿线 21 个大中城市的 191 个县（市、区），直接受益人口约 7900 万，同时向北方 50 多条河流累计生态补水超  $7.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，有力保障了京津冀一体化、雄安新区、中原城市群等国家建设战略实施的水安全，并为受水区地下水压采、修复和保护生态环境创造了有利条件，社会、经济、生态效益显著。

南水北调中线一期工程规模巨大，技术复杂，面临诸

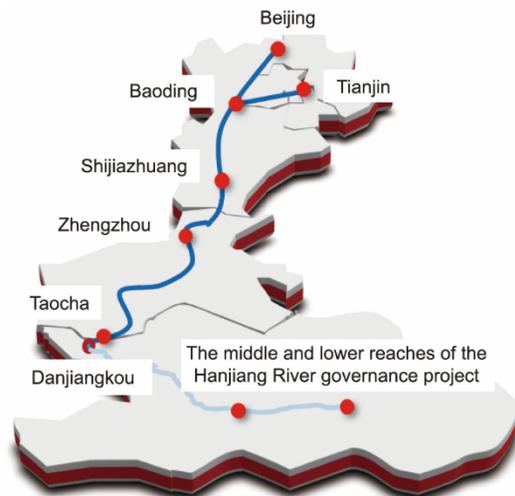


图 1. 南水北调中线一期工程总体布局。

多重大技术难点[1]:

(1) 工程线路长，跨越四大流域向四省市供水，工程总体布局受水源区与受水区水资源时空分布、经济与生态环境、防洪与供水、水质与投资等各种因素影响，确定科学合理的工程总体布局难度极大；

(2) 水源工程丹江口水库因其在汉江中下游不可替代的防洪地位，需在大坝正常运行条件下加高加固；

(3) 总干渠沿线分布有 387 km 的膨胀土地段，涉水膨胀土渠坡稳定控制难；

(4) 穿越多相复杂软土地层游荡性黄河高压输水盾构

隧洞设计与施工技术难度高；

(5) 设计流量达  $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的大流量大跨度预应力渡槽结构设计与建造难度巨大。

围绕上述技术难点，南水北调中线一期工程通过国家科技支撑计划项目及重大工程专项科研，取得了多项理论与技术创新，攻克了这些技术难题。

## 2. 工程技术成就

### 2.1. 工程总体布置

#### 2.1.1. 南水北调中线工程总体方案

南水北调中线工程横跨长江、黄河、淮河、海河流域，各流域水资源情势、时空分布差异明显。工程总体布置需综合考虑水源区、受水区的水资源时空分布以及对汉江中下游带来的影响，涉及范围大，涵盖水资源利用、防洪减灾、水环境、水生态保护等多领域。为科学实现水资源的多目标优化配置，提出了基于水资源、水环境承载能力的跨流域水资源调配理论，构建了多水源、多目标、多流域、超大范围的水资源优化配置模型，提出了水源区、受水区、输水沿线用水与生态环境保护一体的南水北调中线工程总体方案：近期加高丹江口大坝，加大汉江水资源调蓄利用能力，多年平均北调水量达到  $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，同时壅高丹江口水库水位实现自流输水至北京，并提高汉江中下游的防洪减灾能力；远期从长江干流补充水源后再加大调水量，实现南北水资源丰枯互补、多水源联合调配，保障受水区用水安全。

#### 2.1.2. 中线一期工程总干渠总体布置

输水总干渠全线长约 1432 km，穿越 700 多条大小河流，交叉建筑物多，如何在可利用水头不足 100 m 条件下对各渠段进行水头分配从而实现全线自流，是工程面临的关键难题。工程设计中，提出了求解渠、隧、涵纵坡与水头最优分配的离散微分动态规划方法[2]，建立了总干渠纵坡动态规划模型，提出了有利于输水沿线水质保护、生态环境保护的“全线自流、全线立交”的总干渠总体布置方案，成功解决了全线自流输水、立交式穿跨沿线河流的难题，避免了沿线河流对北调水水质的影响和平交输水带来的泥沙淤积问题，以确保工程长期安全稳定运行，同时也较好地兼顾了大规模、长距离、多目标输配水系统调度的灵活性。

### 2.2. 丹江口大坝加高工程

丹江口大坝位于湖北省丹江口市汉江干流上，具有防

洪、供水、发电、航运等综合利用效益，是南水北调中线工程的水源工程。工程始建于 20 世纪 50 年代，1974 年初期工程完成。因汉江每年来水量差异较大，为保证丹江口水库向北方多年平均供水  $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，并加大汉江水资源调蓄防洪能力，需增加丹江口水库多年调节库容，为此，需将大坝顶高程由初期 162.00 m 加高至 176.60 m，总库容增加  $1.106 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。大坝加高前后对比见图 2。



图 2. 丹江口水利枢纽加高前后。

丹江口大坝采用后帮贴坡加高方式，如图 3 (a) 为右联坝段加高方案，此类大坝加高一般需放空或大幅降低坝前水位。丹江口大坝加高期间，由于工程仍需承担防洪、发电、灌溉等任务，在汛期仍需拦洪削峰[图 3 (b)]，大坝加高必须在正常运行条件下实施，因此面临着新老混凝土结合和新老坝体联合承载等难题，结构设计和施工问题极为复杂，且无规范可依，在我国工程建设史中亦无先例。

为研究新老混凝土结合问题，先后进行了三次现场原型试验[图 4 (a)]，结果表明，在各种工况下新老混凝土结合面均存在不同程度的张开，且开合状态随气温作周期性变化[3]。而规范中重力坝设计假定大坝为整体结构，且应力满足平截面假定条件，但实际上结合面处于开裂状态，结合面有限结合部分传力时，基于材料力学法和整体刚体极限平衡法的传统大坝设计理论已难以适用。为此，基于现场原位试验及大量研究分析，提出了“后帮有限结合”加高结构设计理论，建立了新老坝体结合面动态开裂区榫槽传剪与有限结合区传压传剪相结合的力学模型[图 4 (b)]，以及考虑结合面之间非线性接触及环境温度荷载影响的大坝设计方法和控制标准[图 4 (c)]，能够真实反映大坝加高的实际工作状态，解决了新老坝体联合承载的难题。

丹江口大坝采用“后帮有限结合”加高方式，辅以混凝土浇筑温度控制和锁口锚筋等工程措施[图 4 (d)] [4-7]，保障了结合面部分区域动态有限开裂以释放温度荷载，部分区域始终处于结合状态以传递荷载，达到了新老坝体联合承载的目的。大坝加高完成后的观测结果表明，结合面实际状态与设计基本吻合，最小结合比例为 50%

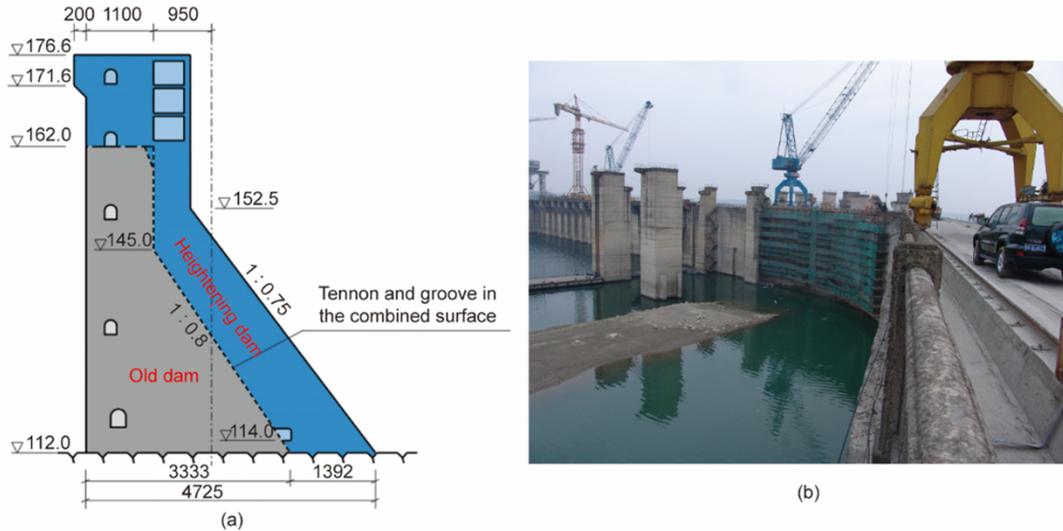


图3. (a) 右联坝段加高方案图；(b) 正常运行条件下的丹江口大坝加高。

左右。2021年，丹江口水库成功蓄水至加高后的170 m 正常蓄水位，经受住了考验，运行状态正常。

### 2.3. 膨胀土渠坡处理

膨胀土是一种遇水膨胀、失水收缩，胀缩效应十分显著的超固结、多裂隙特殊土。膨胀土边坡因结构裂隙与干

湿循环作用极易产生滑坡，在膨胀土地基上修建输水渠道是“世界性难题”。南水北调中线一期渠道工程涉及膨胀（岩）土渠段387 km，最大开挖深度达50 m，工程建设期间，膨胀土渠段沿线共有150多处渠坡发生不同程度的滑坡，是工程面临的重大关键技术难题[8]。图5（a）、（b）为中线膨胀土渠道建设前后对比情况。

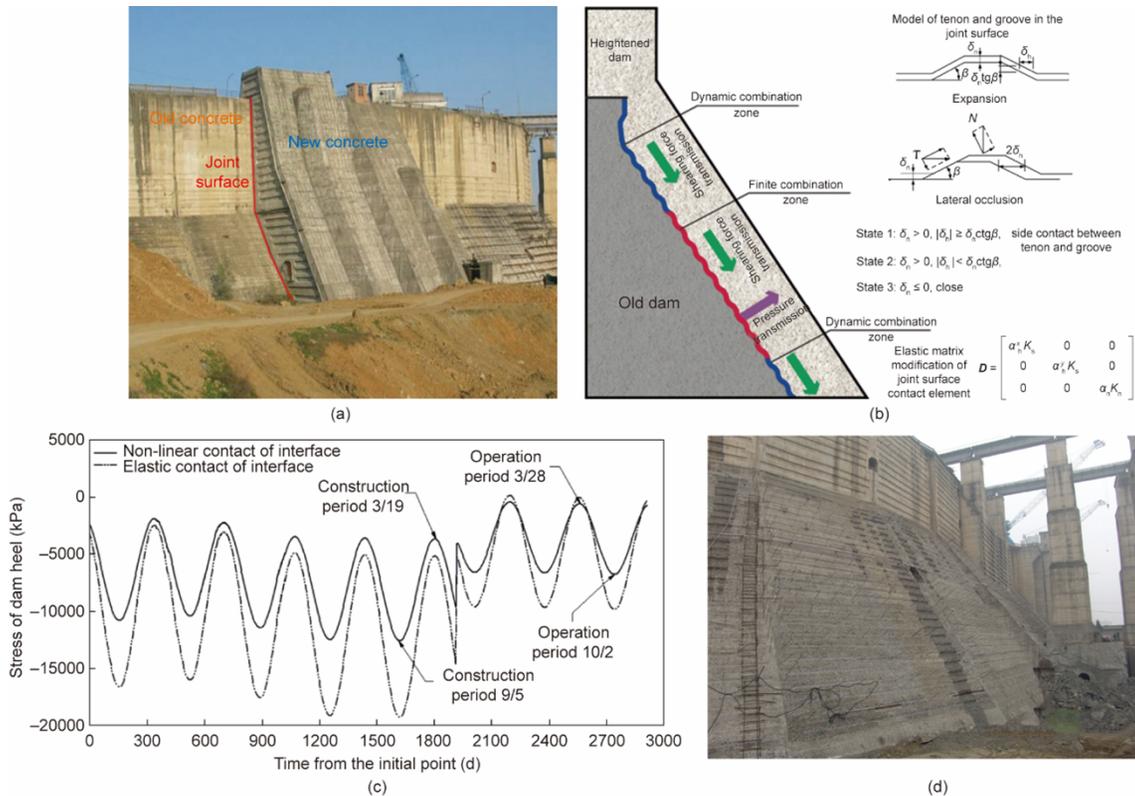


图4. (a) 大坝加高现场试验；(b) 后帮有限结合传力结构模型；(c) 考虑温度荷载的坝踵应力时程曲线；(d) 大坝加高结合面处理。 $\delta_h$ 为切向位移； $\delta_n$ 为法向位移； $\beta$ 为结合面夹角； $D$ 为弹性刚度矩阵； $\alpha_n^x, \alpha_n^y$ 分别为局部坐标系下x、y向的切向修正系数； $\alpha_n$ 为局部坐标系下法向修正系数； $K_s$ 为切向刚度； $K_n$ 法向刚度； $N$ 为法向力； $T$ 为切向力。



图5. (a) 膨胀土滑坡堵塞渠道；(b) 中线工程膨胀土渠道。

### 2.3.1. 膨胀土边坡浅层与深层变形破坏机理

自20世纪70年代，围绕中线工程沿线膨胀土分布、岩土工程特性、边坡破坏机理、工程处理措施等开展了大量研究[9-12]，揭示了膨胀土渠坡不仅存在受大气环境和胀缩作用影响的浅层变形破坏模式，还存在受陡、缓倾角裂隙结构面切割控制的深层滑动破坏模式。浅层变形破坏主要受大气干湿循环的环境影响，膨胀土边坡表面会形成密集的网状胀缩裂隙，土体结构碎裂化，平行渠道方向易产生多条拉裂缝，从而导致边坡发生浅层滑动变形破坏，如图6(a)所示。

深层滑动破坏主要受深埋地层中存在的地质界面、岩性界面、原生长大裂隙等结构面控制，渠道开挖卸荷会导致裂隙进一步贯通，从而形成多裂隙组合滑动体[图6(b)、(c)]。不适应长大结构面控制的膨胀土深层边坡破坏分析，不适合采用常规的土质边坡稳定分析方法。为寻找膨胀土地层中控制边坡稳定的长大裂隙和地层结构面的

最不利组合，提出了膨胀土深层结构面控制型折线滑动破坏模式和基于极限平衡法(LEM)的裂隙不利组合的网格搜索稳定分析方法[图6(d)]，解决了长期以来膨胀土边坡稳定难以精确分析的难题。

### 2.3.2. 膨胀土渠坡综合处理技术

对于膨胀土浅层破坏，主要治理思路是隔绝大气影响和减小雨水冲刷；而对于深层结构面滑动破坏，主要思路是减小坡内地下水对土体的破坏并对土体进行加固。基于此，研究提出了“护-截-排-固”的膨胀土渠坡立体综合治理新技术(图7)：坡面采用水泥改性土等措施进行表面“保护”，减少大气环境影响；坡顶设置截流沟“阻截”降雨或外来水系，减小汇流冲刷渠道坡面；坡内设置盲沟和逆止阀进行“排水”，控制土体含水率变化；设置组合抗滑桩对坡体进行“加固”。综合治理技术攻克了膨胀土边坡浅表层蠕动变形和深层结构面控制型滑坡稳定难题[13-

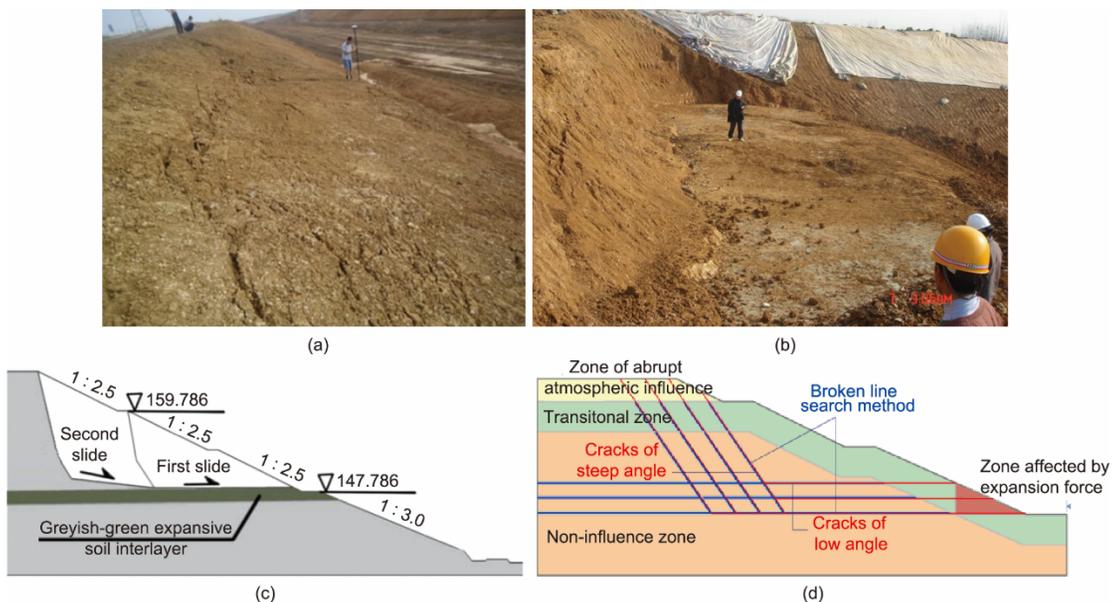


图6. (a) 浅层破坏照片；(b) 深层结构面破坏照片；(c) 深层结构面控制的折线型滑动破坏；(d) 多裂隙不利组合的网格搜索方法。

16], 并建立了相应的控制技术标准体系。

目前南水北调中线膨胀土渠道运行良好, 已成功经受住2016年、2021年两次特大暴雨的考验。

#### 2.4. 穿黄隧洞工程

穿黄隧洞工程位于河南省郑州市上游约30 km处, 是南水北调中线总干渠与黄河的交叉建筑物(图8), 是总干渠上规模最大、技术最复杂的关键工程。穿黄工程设置两条隧洞, 单洞长4250 m, 隧洞内径为7 m。工程采用盾构方式穿越黄河, 需要穿越游荡性河流段, 该河段河床为饱和砂土地层, 地质条件复杂, 隧洞内水压高达0.51 MPa, 面临防止高压内水外渗和需适应游荡性河势引起的隧洞纵向动态大变形两大关键技术难题。

为适应黄河游荡性河势条件, 防止洞内高压水从管片接缝外渗, 诱发洞外围土渗透破坏而导致隧洞失稳, 需要在管片拼装结构内设置内层衬砌, 以承受内水压力, 同时可以减少过水表面糙率、减小洞径。由于普通钢筋混凝土内衬需配置很大密度钢筋, 施工困难且不经济。基于此, 研究发明了“盾构隧洞预应力复合衬砌”新型输水隧洞结构(图9), 提出了输水隧洞复合结构设计理论与结构分析方法, 建立了相应的设计控制技术标准体系。外衬抵御隧洞外水土荷载, 预应力内衬承受高压内水荷载, 内外层之间设置排水垫层以降低层间水压, 此复合结构可以很好地适应游荡性河势河床冲淤使洞外覆土深度变化引起的纵向动态大变形, 解决了穿越多相复杂软土地层高压输水隧洞结构受力和内水外渗导致围土失稳破坏的难题[17-18]。目前, 穿黄隧洞运行良好, 隧洞的变形、结构应力、渗压均满足设计要求。

#### 2.5. 超大型输水渡槽

南水北调中线一期工程总干渠沿线共布置渡槽27座, 其中, 湍河渡槽最大流量为 $420 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 单跨荷载为4800 t, 相当于承受30列火车荷载强度, 而最小壁厚只有35 cm, 是目前世界上最大的U形渡槽。目前超大型渡槽设计无规范可循, 存在结构承载、防裂等关键技术难题, 且工期紧、

技术要求高, 直接关系到中线一期工程通水总目标的实现。

湍河渡槽设计中, 研究提出了“纵向预应力碗状分区布置、环向预应力与内壁面非同心”设计新理念[图10(a)]及渡槽断面温度荷载“分区折线形”加载模式, 形成了超大U形预应力渡槽设计理论和方法, 解决了超大U形渡槽薄壁结构承载、防裂等技术难题[19]。同时, 研发了40 m跨1600 t超大U形渡槽造槽机安装运行、浇筑施工等机械化施工成套技术和工法[图10(b)], 填补了大型现浇预应力渡槽槽身机械化施工技术空白[20-21]。

#### 2.6. 水量调度与运行控制技术

南水北调中线水量调度需要协调丹江口水库防洪与发电、汉江中下游生态与供水, 以及受水区当地水资源开发与保护等相互关系; 还需要在无在线调蓄水库的情况下, 快速、精确响应沿线191个县市的用水需求变化。水量调度与运行控制涉及面广、关系错综复杂, 如何科学确定沿线水量调度方案, 以及定时、定量调控沿线众多闸泵群, 将水量及时、高效地输送至各用水户, 是保障工程运行效益发挥的关键技术难题。为此, 研发了多目标精细化动态联合水量调度模型和多用户实时自适应控制运行系统, 保障了中线工程调水目标的实现。

##### 2.6.1. 多目标精细化动态联合水量调度模型

南水北调中线一期工程水量调度目标和维度需要统筹考虑汉江流域上下游和黄淮海流域华北平原水资源综合利用, 联合调度丹江口水库和受水区四省市97座分水口门供水。为实现工程多目标精细化水量调度, 构建了包含汉江流域-丹江口水库-中线总干渠-分水口-用户的多对象“循环-反馈”动态联合水量调度模型, 该模型系统耦合了丹江口水库可调水量、沿线受水区191个县市用水需求、各分段总干渠输水能力等因子(图11), 针对沿线不同水情形势分析, 提出了总干渠97座分水口门的运行供水方案, 实现了多目标、多对象、多时间尺度的水资源时空配置, 为中线工程安全、稳定、高效运行奠定了坚实的基础。

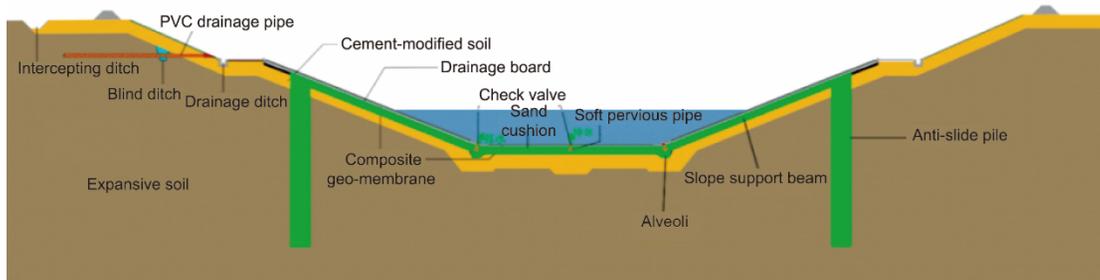


图7. “护-截-排-固”综合处理技术示意图。

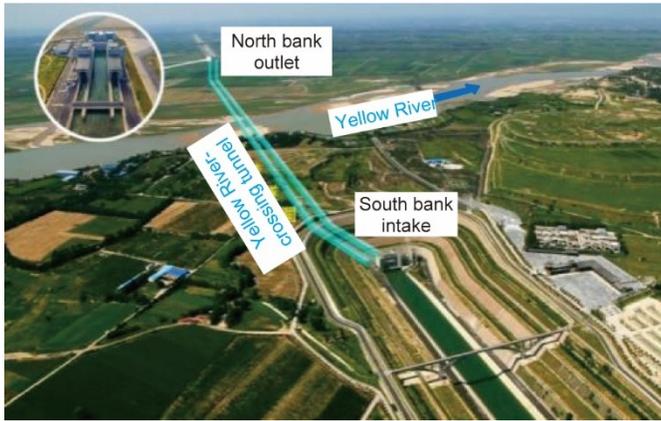


图8. 穿黄隧洞工程布置图。

### 2.6.2. 多用户实时自适应控制运行系统

南水北调中线一期工程沿线分水口门和渠道节制闸多达161座，闸门调控水力响应慢，无在线调蓄水库，渠道调蓄能力小，运行水位变幅调控要求高。

为保障将水量按调度方案及时、高效地输送至用户，研发了南水北调中线总干渠多用户实时自适应控制运行系

统，作为工程运行调度的中枢神经，定时、定量科学有效地调控沿线众多分水口门与渠道节制闸。该系统以各节制闸前水位为控制目标，根据拟定的闸群协同控制规则进行闸前水位自适应调度控制，根据不同用水需求生成各闸门流量调控过程规划，满足用户“适时分水、适量充泄”的要求，实现了工程全线正常输水调度的实时自动控制，保障了中线总干渠安全运行和年度调度计划的顺利实施。

## 3. 展望

南水北调中线一期工程的成功实施积淀了一系列自主研发的勘察设计技术和成熟配套施工技术，提出了膨胀土渠道等42部设计施工技术规定，获得了千余项专利和国家级工法，有效指导了工程勘察设计与施工。工程通水7年多来，经受了寒潮和极端强降雨等自然灾害检验，工程运行总体平稳，顺利完成各年度调水任务。工程已成为北京、天津等沿线城市的供水生命线，有力推动了滹沱河、瀑河、白洋淀等沿线河湖生态环境复苏。

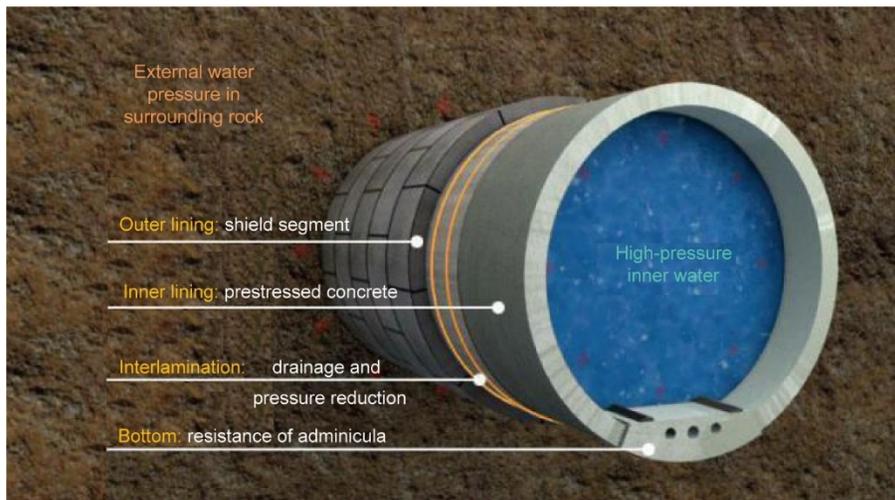


图9. 盾构隧洞预应力复合衬砌结构图。

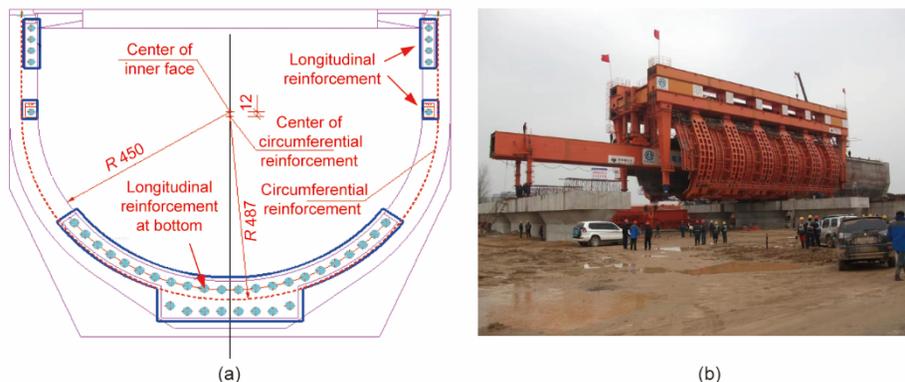


图10. (a) 滹沱河波槽预应力筋布置图；(b) 超大U形波槽造槽机械化施工。R: 半径 (cm)。

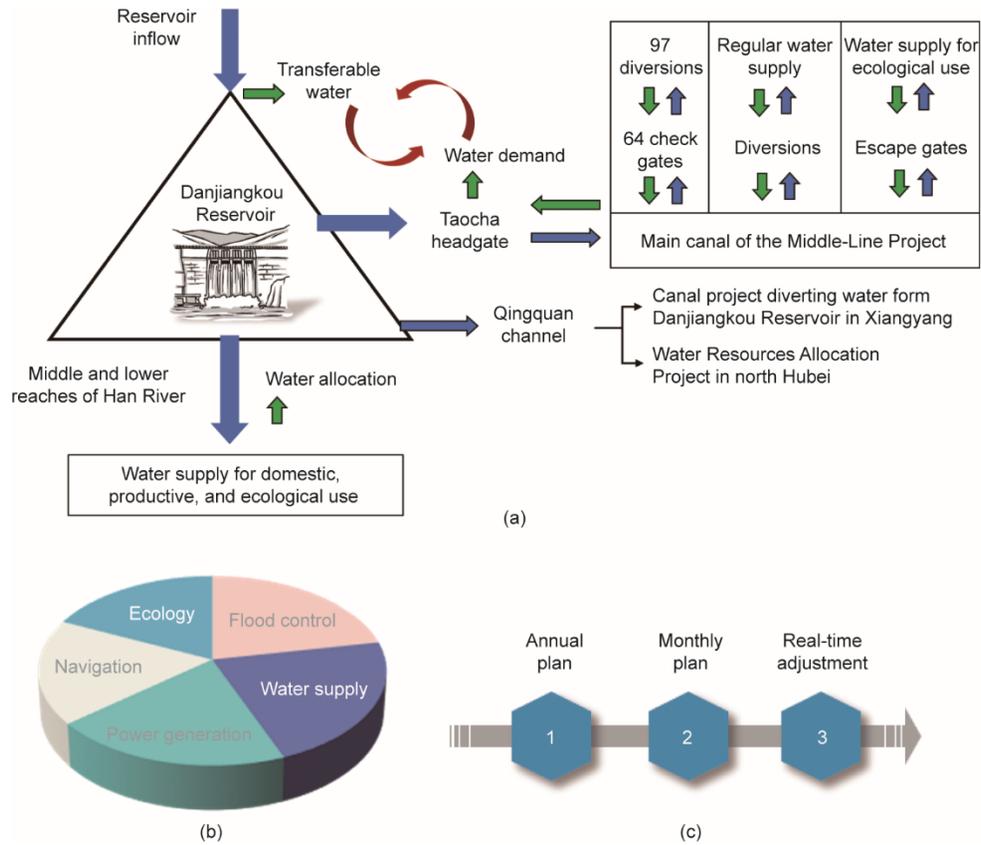


图 11. 南水北调中线一期工程全过程精细化动态联合水量调度模型。(a) 丹江口水库供水调度示意图；(b) 中线工程多目标调度；(c) 中线工程“年-月-实时”滚动调度。

南水北调中线一期工程建设运行中积累的技术成果已成功应用于正在建设的引江济淮工程、引汉济渭工程、滇中引水工程、珠三角水资源配置工程等国内重大引调水工程，产生了显著的社会、经济、生态效益。

水资源时空分配不均是制约人类社会发展的重大问题，跨流域长距离调水工程建设与运行管理是当今社会乃至今后相当长时期关注的热点，南水北调中线一期工程积淀的系列创新技术可为国内外重大引调水工程建设提供参考与借鉴，具有广阔的推广应用前景。

## References

- [1] Niu X, Wen D, Wu D. Technical research on the Middle Route Project of the South-to-North Water Transfer. *Yangtze River* 2005;36(7):6–8. Chinese.
- [2] Xiao W, Mao W. Optimizing water head allocation of the main canal of the Middle Route Project in South-to-North Water Transfer. *South-to-North Water Transfer Water Sci Technol* 2006;4(3):20–1. Chinese.
- [3] Jian X, Fan W. Key technology for concrete dam heightening construction of Danjiangkou Project. *Yangtze River* 2009;40(24):41–3. Chinese.
- [4] Shan L, Xiao H, Xu Y. Analysis on overflow dam structure of Danjiangkou Dam in heightening. *South-to-North Water Transfer Water Sci Technol* 2007; 5(6): 48–50. Chinese.
- [5] Ma J, Cheng X, Ma J. Construction technology of jointing old and new concrete in Danjiangkou Dam heightening project. *South-to-North Water Transfer Water Sci Technol* 2007;5(6):97–101. Chinese.
- [6] Yang X, Ding F, Jian X. Temperature control measures on heightening project of Danjiangkou Dam. *South-to-North Water Transfer Water Sci Technol* 2008; 6(1):105–9. Chinese.
- [7] Cheng X, Chen Z, Ma J, Wang C. Construction of setting key-way on jointing surface between new and existing concrete. *Dam Saf* 2007;3:39–41. Chinese.
- [8] Cai Y, Yang Y, Zhang L, Li L, Qiang L, Song B. Engineering geology of expansive soil in the middle route of South-to-North Water Transfer Project. Wuhan: Yangtze River Press; 2016. Chinese.
- [9] Zhang G, Song B, Zhou S, Weng J, Yang Y. Landslide genesis of expansive soil slope and slope stability analysis method. *Yangtze River* 2014; 45(6): 20–3. Chinese.
- [10] Cai Y. Study on failure mechanism of expansive soil canal slope and treatment measures. *Yangtze River* 2011;42(22):5–9. Chinese.
- [11] Cai Y, Cao L, Wang X, Yang Y, Yao X. *In-situ* test study on failure mechanism of expansive soil slope. In: Proceedings of the Ninth National Conference on Engineering Geology; 2012 Oct 23–25; Qingdao, China. NCEG; 2012. p. 5. Chinese.
- [12] Dai Z, Chen S, Luo H, Lu D. Microstructure and characteristics of expansive soil and rock of middle route of South-to-North Water Diversion Project. *Chin J Geotech Eng* 2013;35(5):948–54. Chinese.
- [13] Niu X, Cai Y, Xie X, Ni J, Zhang S, Li L, et al. Treatment technology of expansive soil canal. Wuhan: Yangtze River Press; 2016. Chinese.
- [14] Zhao F, Ni J, Zhang Z. Research on construction quality control of cement modified soil in Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *Yangtze River* 2014;45(6):99–101. Chinese.
- [15] Yan T, Cai Y, Xiong R, Lu G. Design of pre-supported micro anti-sliding piles with multi-rows for excavated expansive soil canal. *Yangtze River* 2014;45(7): 41–3. Chinese.
- [16] Huang W, Liu Q, Leng X. Anti-seepage and drainage design for Taocha to Lushan section of South-to-North Water Diversion Project. *Yangtze River* 2014; 45(6):4–6. Chinese.
- [17] Niu X, Xie X, Fu Z. Overview on key technologies in tunnel crossing Yellow River construction under complex geological conditions. *Yangtze River* 2011; 42(8):1–7. Chinese.
- [18] Niu X, Fu Z, Zhang C. Study on structural properties of new type of composite lining in shield tunnel crossing Yellow River. *Yangtze River* 2011;42(8):8–13.

- Chinese.
- [19] Zheng G, Lu G, Zhang C, Xia G. Design and construction research for Tuanhe aqueduct of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *Yangtze River* 2014;45(6):27–30. Chinese.
- [20] Xiong J, Gao Q. Prestressed construction technology of super-large cast-in-situ U-shaped aqueduct in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project. *Prestress Technol* 2016;6:14–8. Chinese.
- [21] Jian X, Liang R, Yang X. Construction scheme of Tuanhe aqueduct of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *Yangtze River* 2014;45(6): 92–4. Chinese.