

# 南水北调从科学研究到工程实践的几个关键问题

吴险峰<sup>1</sup>, 陈庆伟<sup>1</sup>, 王冠<sup>2</sup>, 田巍<sup>1</sup>

(1. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 2. 中国南水北调集团东线有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 中国水资源呈现北缺南丰的空间分布格局, 跨流域调水是缓解水资源分布不均的有效方案。南水北调工程是重大跨流域调水工程, 对缓解黄淮海平原水资源短缺、改善河湖生态环境、优化水资源分配具有重要作用。从方案构想初步提出到一期工程建设完工, 南水北调工程规划建设历时70余年, 水资源优化配置、生态环境影响、工程建设管理机制等关键问题被深入研究, 一系列关键成果应用于南水北调工程前期论证, 助力南水北调工程高质量规划建设。2014年南水北调一期工程正式通水, 标志着工程由宏伟构想变成伟大工程, 从科学研究进入工程实践阶段, 通水9年来, 工程综合效益不断彰显。本文系统梳理了南水北调工程几个重点领域的系列科研成果, 全面总结了优化水资源分配格局、提升饮水安全保障水平、推进生态环境保护与修复方面南水北调工程的实践成效, 并对后续工程建设运行提出思考与展望。

**关键词:** 南水北调; 科学研究; 工程实践; 水资源配置; 生态环境

DOI: 10.11821/dlxb202307013

## 1 引言

水资源是关系社会经济发展的重要基础性、控制性资源, 其分布格局影响和决定着经济社会发展布局。中国基本水情一直是北缺南丰, 长江流域及其以南地区水资源量占全国水资源总量的80%以上, 而黄淮海流域仅占7.2%, 空间分布极不均衡。由于资源性缺水, 黄淮海流域即使充分发挥节水、治污、挖潜的可能性, 其水资源量仍难以支撑当地社会经济高质量发展。为有效缓解黄淮海流域日益严重的水资源短缺, 改善生态环境, 保障当地社会、经济、生态可持续发展, 党中央决定在加大节水、治污和污水资源化力度的同时, 建设实施南水北调工程, 从水量相对充沛的长江流域向黄淮海地区调配水资源<sup>[1-2]</sup>。

根据2002年国务院批复的《南水北调工程总体规划》, 南水北调工程分东、中、西三条线路, 从长江不同区段引水至北方。规划多年平均调水总规模为448亿m<sup>3</sup>, 东、中、西线工程调水规模分别为148亿m<sup>3</sup>、130亿m<sup>3</sup>和170亿m<sup>3</sup><sup>[3-4]</sup>。工程规划分期建设, 目前已完成东中线一期工程建设, 东线一期工程利用江苏省已建的江水北调工程和京杭大运河等, 扩大调水规模向北延伸, 从长江下游江苏省扬州市江都区抽引长江水, 通过13级泵站逐级提水北送至山东半岛和鲁北地区, 补充山东、江苏、安徽等输水沿线地区生产生活用水。为充分利用东线一期工程供水能力, 发挥工程的综合供水效益, 实施南水北调东线一期北延应急供水工程, 向河北、天津地下水压采地区供水, 置换农业用地地下水, 缓解华北地下水超采, 向南运河生态补水, 相机向北大港、衡水湖、南大港等河

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-07-05

作者简介: 吴险峰(1970-), 男, 湖北武穴人, 教授级高级工程师, 主要从事南水北调工程生态环境保护研究和管理工作。E-mail: 1320136769@qq.com

湖生态目标补水,改善河湖湿地生态环境;需要时向天津、河北应急供水。中线一期工程从南阳陶岔渠首引水,从南向北跨长江、淮河、黄河和海河四大流域,沿线新建人工渠道,全程自流至北京、天津,向沿线河南、河北、天津、北京四省(直辖市)供水。

南水北调工程作为国家重大战略性基础设施,是国家水网的主骨架和大动脉,发挥了优化水资源配置、保障群众饮水安全、复苏河湖生态环境、畅通南北经济循环的重要作用。20世纪80年代,中国科学院组织“南水北调及其对自然环境的影响”国家重大攻关项目,开展对南水北调工程的前期研究,随后由中外专家组成调研团开展南水北调实地考察,中外学者针对调水工程开展深入交流,并联合出版了世界第一部关于中国水利工程的中外联合评估巨著——《远距离调水:中国南水北调和国际调水经验》<sup>[5]</sup>。几十年来,南水北调工程受到国内外专家学者的持续关注,相关重大问题被深入研究,取得了一系列重要原创成果,这对南水北调工程规划、建设、运营起到了重要支撑。本文将从南水北调工程水资源配置、生态环境影响、工程建设管理机制等关键问题出发,充分梳理南水北调相关科研成果,系统总结当前南水北调工程实践情况,并结合科学研究进展和工程实践现状提出思考与展望,助力南水北调后续工程高质量发展。

## 2 南水北调工程科学研究相关进展

### 2.1 水资源配置方面研究

调水工程的核心目的是利用工程手段调配水资源,缓解受水区资源型缺水问题。需要综合考虑受水区水资源亏缺情况和水源区可调水能力<sup>[6]</sup>,通过水资源优化配置实现水源区和受水区的可持续发展。为充分发挥工程效益,受水区水资源供需关系、水源区可调水量、整体水资源优化配置等重要问题被深入研究。

**2.1.1 受水区水资源供需关系研究** 调水工程水源区可调水量主要与引水河流及引水坝址的径流量、坝址上下游的用水要求和引水水库的工程规模3个要素相关<sup>[7]</sup>,而沿线受水区调入水量主要与当地水资源供需密切相关,但为保证生态环境稳定平衡,受水区的调入规模应相对均衡,提出通过跨流域调水使区域水分适宜度(潜在蒸散发和降水、地表径流之差的比值)趋近于1,即区域降水和地表径流的差值与潜在蒸散发基本相等,进而提出区域降水是计算调入区适宜调水量的基本判定标准<sup>[8]</sup>。

“三先三后”原则首先要求“先节水后调水”,应在充分挖掘受水区节水潜力的前提下实施南水北调工程<sup>[9-11]</sup>。通过受水区节水与外调水配合,发挥最大经济社会效益,有效缓解华北地区水危机,以保证农业的持续发展<sup>[11-16]</sup>。通过节水潜力计算模型估算,中线工程沿线20个地级以上城市总体上节水潜力巨大,2010年、2030年分别为19.39亿 $\text{m}^3$ 和30.78亿 $\text{m}^3$ ,占中线远期供水量的13.8%和21.8%<sup>[17]</sup>,东线江苏境内受水区2030年节水潜力为15.91亿 $\text{m}^3$ <sup>[18]</sup>。根据节水情景模拟,通过进一步提高居民节水意识、替换高等级节水器具、增强家庭内部废水循环利用等措施,南水北调受水区居民人均日用水量可下降12%~29%<sup>[19-20]</sup>。

**2.1.2 水源区可调水量研究** 东线工程规划从长江下游取水,长江水资源丰富,下游多年平均入海水量近9600亿 $\text{m}^3$ ,在极端枯水年份水量也近6000亿 $\text{m}^3$ 。因而调水规模主要取决于规划建设的引水工程规模<sup>[8]</sup>。对于东线工程,国家制定了“分期实施,先通后畅”的建设方案,分步分段完成东线工程建设<sup>[21-22]</sup>。按照现行规划,东线工程黄河以北受水区在2035年预计缺水量为70亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,后续工程修建完成后,每年可跨黄河调水44亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,保障北京、天津、河北、山东等受水区用水需求。

中线工程可调水量主要受汉江上游来水情况和丹江口水库影响,近年来受气候变化和人类活动影响,汉江上游径流呈现显著的下降趋势。根据观测数据,受降水量显著下降等因素的影响,1990—2006年汉江流域年均径流量相较于1951—1989年下降了22.8% (9.33 km<sup>3</sup>)<sup>[24]</sup>,1999—2017年丹江口水库入库年均径流量较1956—1998年减少了50.5亿m<sup>3</sup><sup>[25]</sup>,受径流量显著下降影响,中线工程完成13 km<sup>3</sup>规模的调水任务面临巨大挑战,中线工程调水规模应当谨慎评估<sup>[23-24]</sup>。丹江口水库结合下游补偿工程建设可适当提高中线工程调水量,通过分析60亿m<sup>3</sup>、150亿m<sup>3</sup>和230亿m<sup>3</sup>调水规模的可行性,认为60亿m<sup>3</sup>调水规模基本不需要下游配套补偿,150亿m<sup>3</sup>调水规模对航运和灌溉用水的影响不大,通过适当补偿可以解决,230亿m<sup>3</sup>调水规模对汉江中下游水位流量及用水的影响十分严重<sup>[26-27]</sup>。根据汉江流域和受水区水资源情势变化情况,中线工程长远需从引汉转变为引江,在不扩建主体工程、确保工程3个安全的前提下,可开展优化工程调度、加大输水流量等措施,实施中线后续工程增源挖潜扩能和引江补汉工程,将一期调水95亿m<sup>3</sup>扩能至115亿m<sup>3</sup><sup>[28]</sup>。

西线工程调水区水资源丰富,当地社会经济用水量很少。但该地区生态环境脆弱,生态环境用水是决定西线工程可调水量的关键。生态环境用水主要通过生态流量来估算,但目前并未有统一的估算方法<sup>[29]</sup>。针对西线工程调水区,围绕满足水生生物栖息地等的生态环境需水要求目标,可采用湿周法、曲率法、Tennant法、斜率法、河道枯水流量法等多种方法开展生态流量估算<sup>[29-34]</sup>,提出西线工程可调水量。

**2.1.3 水资源优化配置研究** 南水北调工程水源区和受水区的丰枯遭遇性是跨流域水资源调配必须考虑的重要问题<sup>[35]</sup>。通过对中线水源区和沿线各受水区分析,丰枯同步的频率表现出由南向北递减的规律<sup>[36-37]</sup>;西线水源区与受水区黄河上游的丰枯遭遇中有利于调水的丰枯遭遇频率可达77.8%,调水河流之间进行补偿调度概率较大<sup>[38]</sup>。根据华北地区与长江中下游、华北地区与汉江上游来水丰枯的遭遇性分析,降水丰枯异步频率都略大于丰枯同步频率,在丰枯同步现象中,南北同枯出现的频率较低<sup>[35]</sup>。值得注意的是,1960—2013年期间中线工程受水区和水源区降水同枯的概率为11 a一遇,但1997年以来,这一概率提升至5 a一遇,而且未来预测显示这一概率会持续上升<sup>[39]</sup>。因而要充分发挥南水北调工程效益,提高工程的可靠性,在后续工程规划实施中要增强工程的调节能力,以缓冲天然降水丰枯遭遇带来的风险<sup>[40-41]</sup>。

受水区水资源的优化配置是发挥工程效益的重要保障,地表水、地下水、外调水及其他水源的联合利用至关重要<sup>[42-44]</sup>,为增强南水北调水源利用效益,众多学者对受水区水资源优化配置开展深入研究<sup>[45-50]</sup>。刘昌明等构建了“水资源联合利用最优化系统分析模型”,基于“当地下水埋深在土壤返盐的临界水深以下时,实行地表水、地下水和外调水的联合利用最优化。当地下水埋深在土壤返盐临界水深以上时,充分利用当地机电井能力抽取地下水进行井灌,降低地下水位,同时实现满足一定环境要求的地表水、地下水和外调水的联合利用最优化”的用水原则开展了东线工程的水资源优化配置分析并提出利用方案<sup>[42-43]</sup>,这一研究思路为南水北调工程实践提供了有益参考。

## 2.2 生态环境影响研究

调水工程通过水量的调入或调出,改变了区域原有的水文情势,当地生态环境可能受到一定影响。按输水线路的地理位置,可将工程沿线分为三部分,即水量输出区、输水通过区、水量输入区<sup>[8]</sup>,各分区中程的生态环境影响存在一定差异,不同研究人员也开展了大量研究。

**2.2.1 水量调出区的生态环境影响** 调出区生态环境影响主要发生的地区在输水点附近及其下游,由于水量调出区可供水量减少,河道内用水条件变化,导致一系列生态环境问



题。调出区生态环境不利影响主要的发生时间为枯水期,尤其是枯水年份的旱季,对丰水期尤其是汛期影响相对较小<sup>[51]</sup>。

东线工程通过泵站抽水,对长江径流年内分配没有调节作用,枯季调水将增加径流年内分配的不均匀性,可能导致水质、泥沙、海水入侵等问题。水量调出直接减少了河道流量,可能进一步加重水质污染,导致泥沙倒灌和淤积。同时,自长江中上游水库调水在一定程度上导致下游输沙量的减少,有机物质吸附的载体减少可能导致下游水质和河口沉积过程变化<sup>[52]</sup>,将导致长江口盐舌的上溯长度和频率在枯水期增加10%左右,但对拦门沙和航运的影响较小<sup>[51, 53]</sup>。

中线工程丹江口水库建设对汉江枯水期径流有一定调节作用,建库调水后下泄流量减少量约占汉口站枯季平均流量的2%,调水后出库流量相较同期降低,导致对下游河床的冲刷能力降低,同时回水顶托等明显增强,引起了两条河流相汇处淤积泥沙的增加,给下游港口和航道带来不利影响<sup>[54]</sup>。此外,水库蓄水以来地震发生频次有所增加,水库加高可能进一步诱发地震的次数和强度增加<sup>[8, 51, 53]</sup>。

西线工程调水对下游地区工农业用水等影响不大,但可能对发电、航运等产生一定影响。调水后长江干流及调水河流以下的梯级电站发电量将减少,调水160亿 $\text{m}^3$ 时三峡电站平均每年损失电量31.9亿 $\text{kWh}$ ,减少约3.6%<sup>[55]</sup>。调水对雅砻江、大渡河局部河段的航运有一定影响,例如从金沙江调水后,下游最小通航要求(三级航道)受到影响,屏山站不满足时间增加0.62月/a<sup>[56]</sup>。

**2.2.2 输水通过区的生态环境影响** 由于输水、渗水、阻水、蓄水环境效应,调水会对通过区输水干线两侧区域、调蓄湖泊及其周围区域产生生态环境影响<sup>[51]</sup>。

渠道输水可能导致水质恶化和传播疾病两方面环境问题。南方地区水质较好、北方地区水质较差,工程自南向北调水可改善北方地区天然水质,但沿线废污水排放容易引起输水干渠和周边河流湖泊水质恶化<sup>[57-58]</sup>。中线输水沿线地势比两侧高,废污水私排问题相对较少;但东线地势较低,输水干渠易接纳沿程废污水,应采取有效技术措施解决好污染防治问题。此外,调水可能通过传播病源,将南方特有的疾病带到北方地区,其中最受关注的是螺钉北移问题。研究发现,受水文气象因素的影响,螺钉随调水北迁的可能性很小,调水不会明显导致血吸虫病区北移<sup>[59]</sup>。

渠道渗水可能通过影响土壤水与地下水的平衡,导致次生盐渍化问题。中线地势较高,坡度较大,地下径流通畅,地下水埋深较深,渠道侧渗转化为地下水可较快排走,引起土壤盐碱化的可能性较小。但东线地势较低,地下径流缓慢,地下水埋深较浅,渠道侧渗将大幅度抬高两侧地下水位,造成土壤次生盐渍化,南四湖北至天津段两侧受到该影响的农田将超过200万亩(1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$ )<sup>[51]</sup>。

南北向的输水干渠与东西向的天然河流交叉可能产生阻水效应,影响河流泄洪排涝,并导致土壤盐碱化。东线输水主要沿用原有大运河,以天然河道为输水干渠,阻水效应的影响不会较工程建设前明显增加。但中线工程是新建人工渠道,沿线同100余条河流平交,对有关河流的泄洪排涝产生一定影响<sup>[60]</sup>。此外,中线渠道输水后可能渗漏形成一条南北向的地下水坝,从而影响平交向地下水的自然流动,在干渠西侧引起地下水位的升高。

天然湖泊或利用坑塘、洼淀和排水河道等蓄水均会引发生态环境问题。天然湖泊蓄水将对水域环境和水生生物带来一定影响,这种影响主要发生在东线黄河以南的洪泽湖、骆马湖和南四湖调蓄湖泊<sup>[61]</sup>。没有天然调蓄湖泊的黄河以北地区,利用天然河道、

池塘等存蓄水量,超过原有蓄水能力后会导致水位均高于周边地区或原水位,将引起渗水和阻水环境效应,抬高周围地下水位,加重土壤盐碱化<sup>[51]</sup>。

**2.2.3 水量调入区的生态环境影响** 水量调入区因增加了外调水使得可用水量增加,一方面直接增加了生态用水,另一方面置换了农业、生活、工业挤占生态的用水量,对改善调入区的生态环境起到了重要作用。东线工程可为沿线苏、皖、鲁、冀、津五省市提供生活、工业及航运用水,基本解决水资源在天津、河北、山东受水区的紧缺,并具有向北京调水的可能,促进京津冀地区和黄淮海平原东部的社会经济发展,改善受水区水生态环境,为京杭大运河济宁至徐州段的全线贯通提供保障,根据生态系统服务功能理论,可为受水区带来62.33亿元生态环境效益<sup>[62]</sup>。中线工程可缓解华北地区特别是北京、天津两地水资源短缺,为沿线四省(市)受水区县提供充足的水源,将极大改善受水区河湖生态,推动社会经济高质量发展。西线工程调水预计可新增灌溉面积177.47万 $\text{hm}^2$ ,建设防护林带15万 $\text{hm}^2$ ,每年减少0.56亿~1.06亿t的土壤流失量,增加黄河的河川径流量,改善黄河流域水生态水环境<sup>[8, 53]</sup>。此外,南水北调工程建设将为华北地区地下水修复创造积极条件,提供可用于地下水回灌的大量水源;与此同时,在长期输水过程中,干渠沿岸和沿渠的输水区地下水由于渗水效应得到回补,可使原来被超采的地下含水层逐渐恢复<sup>[12, 63]</sup>。

南水北调工程对水量调入区生态环境主要为积极作用,但其负面影响也值得关注。在农业用水方面,灌区土壤次生盐渍化是南水北调环境后效研究相关学术讨论中最引人关注的问题<sup>[64-66]</sup>,需结合调水地区自然环境特点和各方面经验进行深入研究,积极探索解决途径,慎重开展工程规划。在城市生活及工业用水方面,在城市工矿地区调入水用于发展工业生产和增加生活供水,新增的废弃水也会随之增加,可能扩大水污染的问题,同样值得关注<sup>[51, 53]</sup>。

## 2.3 工程建设管理机制研究

在工程建设管理机制方面,不同研究团队围绕投资体制、水价政策、水权与水交易市场等提出观点和设想。

**2.3.1 投资体制** 南水北调工程投资多、规模大、涉及面广、施工期长,与社会稳定、经济高质量发展等密切相关,是关系国计民生的重大工程,国家承担主体投资和实施无可厚非。但对于工程的建设尤其是后续工程,只依靠国家投资难以满足需求,应积极探索水利投资新体制<sup>[67]</sup>。推行“谁受益、谁投资”的政策,实行国家、地方、集体、个人共同参与,拓宽融资渠道,建立水利投资新体制<sup>[68]</sup>。

**2.3.2 水价政策** 东中线一期工程供水价格实行两部制水价,受水区现有水源水价实行单一制水价,本地水与外调水有效衔接的水价政策尚不完善,如水价调整不到位有可能面临南水北调水难以充分利用的状况。调查研究发现,由于环境成本没有纳入水价进行统一核算<sup>[69]</sup>,导致受水区现有水源水价偏低,建议充分考虑受水区社会经济发展程度以及用水户对于水价的承受能力,适当优化提高水价,促进沿线受水区水资源节约利用<sup>[70-71]</sup>。

**2.3.3 水权与水交易市场** 沿线各受水区分配水资源量可根据各省区投资份额分配,以避免各受水区在工程规划阶段随意上报需水量,在通水运营阶段又因各种原因拒绝消纳水量,造成工程效益难以充分发挥<sup>[72]</sup>。此外,应允许取水权的有偿交易,以调动用水户节约用水的积极性。本地水源和规划外调水源的供水量不足以满足当地需水量的部分,应由属地政府通过采用节水或者水权交易手段解决,从而倒逼各地根据社会经济发展实际利用水资源,推进水资源高效利用<sup>[68]</sup>。

### 3 工程实践现状

目前,南水北调东中线一期工程建设目标的全面实现,优化了中国水资源配置格局,沿线城市供水格局逐步优化;提升了沿线群众饮水安全保障水平,人民群众获得感、幸福感和安全感显著增强;推动了沿线生态环境保护与修复,为生态文明建设提供有力保障。

#### 3.1 优化水资源配置格局

南水北调东、中线一期工程已分别于2013年11月和2014年12月正式通水,初步构建起“四横三纵、南北调配、东西互济”的水资源配置格局,对进一步完善国家水网的主骨架和大动脉具有重要意义。一期工程的建设运行,沟通了长江、淮河、黄河、海河四大流域,惠及沿线北京、天津、河南、河北、江苏、安徽、山东7省市42座大中城市280多个县(市、区),打破了中国空间分布不均的水资源分配格局,连接不同江河流域、跨越不同地理单元、协调不同行政区域。

依托东中线一期工程沿线政府积极推动省级水网建设,优化了地方水资源配置格局。中线总干渠与河南省内配套工程共同形成“南北一纵线、东西多横线”的河南省供水网络;与邢清、石津、保沧、廊涞干渠等配套工程形成河北省水网格局;与引滦输水工程共同构成天津市“一横一纵”的“十”字型水网格局。东线一期工程完善了江苏省江水北调工程体系,形成省内双线输水格局;与山东省其他配套工程共同构建起山东省“T”字型骨干水网格局。

南水北调工程积极助力国家战略,一期工程为京津冀协同发展、雄安新区建设、黄河流域生态保护与高质量发展提供有力的水资源保障。东中线一期工程截止2022年底向京津冀地区供水335亿 $\text{m}^3$ ,中线工程截止2023年4月底向雄安新区供水超1亿 $\text{m}^3$ ,为京津冀协同发展和雄安新区建设提供了坚实的水安全保障;东线工程实施“补下援上”战略,向黄河下游豫鲁等省受水区增加调水或开展生态补水,以减少黄河下游区域的水资源消耗,从而有效增加黄河上游地区的水资源可利用量,截至2023年4月,南水北调东线工程已累计向山东调水超60亿 $\text{m}^3$ 。此外,在“先节水后调水”原则下,受水区节水、挖掘本地水资源潜力、非常规水源开发等能力进一步提升,倒逼受水区用水和经济发展方式转变,受水区水资源配置更加优化。

#### 3.2 提升群众饮水安全保障水平

随着受水区水量消纳能力的逐步增强,南水北调工程已成为重要城市主力水源。截至2023年,南水北调东中线工程直接受益人口超过1.5亿人。南水北调供水地位已由“辅”变“主”,成为沿线多个大中城市的主力水源。“南水”供应了北京城区七成以上用水,供应了天津主城区的几乎全部用水,郑州中心城区90%以上居民使用“南水”,中国北方重要城市的水资源短缺情况得到了有效缓解,供水保证能力显著提高。

南水北调工程始终将水环境保护放在首要地位,工程沿线群众饮用水质量得到显著提升。通水9年以来,中线总干渠和丹江口水源区水质类别稳定达到或优于地表水Ⅱ类以上;东线一期工程(含北延工程)调水期内基本满足地表水Ⅲ类标准。输水水质优良保障了沿线受水区饮用水水质改善,500多万河北黑龙港地区群众可以不再饮用高氟水和苦咸水,北京自来水硬度由380 $\text{mg/L}$ 降至120~130 $\text{mg/L}$ ;天津调入南水北调水的水质持续保持在地表水Ⅱ类及以上,自来水出厂水的观感指标显著提高,居民饮用水口感明显改善。



南水北调工程为推进城乡一体化建设提供有力条件,有效改善了受水区农村地区的供水条件。截至2022年底,河北省受水区农村居民全部用上长江水,累计新增农村生活水源置换人口2381万;天津市加大水源转换力度,依托农村饮水提质增效、城市供水管网延伸、农业水源置换等工程项目,全力推进地下水源置换,全市2817个村、286.8万农村居民饮水质量得到明显提高;河南省利用引江水等水源,积极推进农村供水“四化”,2022年底惠及1200万农村居民。

南水北调工程在完成规划调水任务外,多次承担应急保供任务,沿线受水区应急抗旱能力明显增强。一期工程在应对沿线受水区干旱期间用水短缺起到了重要作用,2017—2018年山东遭遇严重干旱,东线工程连续不间断应急调水893 d,保障青岛、潍坊、烟台等城市的用水安全;2022年长江中下游大旱,东中线工程相继调水抗旱,满足湖北、江苏等沿线省市用水需求。

### 3.3 推动生态环境保护与修复

南水北调工程始终坚持“三先三后”原则,高度重视水污染防治专项治理,不断改善水质和水生态环境。南水北调工程在规划、建设、运营都将节水、治污和生态环境保护放在首位,东线通过十年强力治污,沿线由原来90%以上断面水质不达标治理成全部达标;中线水源区通过8年努力,水质达标率从50%以下提高至超80%,水质持续向好;丹江口库区及上游通过水污染防治和水土保持,库区及上游地区生态环境得到了显著改善,主要生态环境保护指标高于全国同期平均水平。

南水北调工程坚持绿色为先,持续开展大规模生态补水,积极保障河湖生态环境复苏。中线一期工程累计向沿线50余条河流实施生态补水89.54亿 $\text{m}^3$ ,通过生态补水,滹沱河、大清河、永定河、白洋淀等一大批河湖重现生机;2021年8—9月,通过向永定河生态补水,助力永定河自1996年来首次实现全线贯通;2022年北延应急供水工程集中向京杭大运河补水1.89亿 $\text{m}^3$ ,全面助力大运河实现近百年来首次全线贯通。

为有效缓解华北地区地下水超采局面,南水北调工程开展地下水回补和置换,助力地下水超采综合治理。利用东中线一期工程调水置换和回补地下水,有效遏制了华北地区地下水水位下降、地面沉降等生态环境恶化趋势,部分区域地下水位止跌回升。截至2022年,受水区压减地下水超采量超50亿 $\text{m}^3$ 。2022年底京津冀地区治理区地下水位较2018年同期相比总体回升,其中浅层地下水水位平均回升2.25 m,深层承压水水位平均回升6.72 m。

## 4 展望与思考

南水北调一期工程建成通水以来,受水区水资源配置不断优化,人民群众饮水安全保障水平显著提高,沿线生态环境明显改善,发挥了重要的经济、社会、生态功效,充分证明了建设实施南水北调工程的正确性、重要性、必要性。未来水资源短缺问题仍是制约黄淮海流域经济社会发展的重要因素,积极推进南水北调后续工程高质量发展是下一步需要重点关注的问题。为进一步推进工程高质量发展,仍需从以下方面发力。

(1) 继续加强水资源优化配置。一是加强极端天气下供水安全研究,未来极端天气增加将为工程建设和供水安全带来巨大挑战,要继续研究气候变化背景下水源区和受水区丰枯遭遇情况,关注极端缺水情况下北京、天津等北方重要城市的用水安全问题。二是加强水资源供需分析研究,水资源供需分析是调水工程规模设计的基础,应进一步深

化气候变化和人类活动背景下受水区可供水量和需水量的预测成果,为合理设计南水北调后续工程调水规模提供科学依据。三是加强水资源配置研究,科学探索在国家水网整体布局下南水北调后续工程的线路布局等关键问题。

(2) 持续关注生态环境影响。一是加强沿线生态环境问题研究,南水北调工程作为世界上规模最大跨流域调水工程,沿线河湖众多、影响范围广,尤其是西线工程沿线分布有众多环境敏感区,需进一步加强生态环境问题的系统研究,以通过最小的自然扰动,实现最大的生态价值。二是加强生态效益评价研究,东中线一期工程建成通水后发挥了巨大生态环境效益,但目前仍缺乏科学合理、综合全面的生态效益评价方法,无法实现生态效益的指标化、标准化、定量化,需进一步加强生态效益评价方法研究,建立适用于南水北调工程的生态效益评估体系,科学量化工程生态效益。

(3) 加快推动工程建设管理机制完善。一是加强供水水价研究,南水北调工程财务收入为供水水费,科学有效的水价政策是确保工程可持续运营的重要保障,要严格遵循“还贷、保本、微利”的原则,采用“准许成本+合理收益”的方法,针对性深入研究工程水价政策。二是加强工程投融资研究,南水北调工程投资规模大、投资回收期长,为推进后续工程高质量发展,应在一期工程经验基础上,系统探究建立投资主体多元化、资金来源多渠道、投资方式多样化的投融资模式的可行性,研究形成合理筹资结构。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Changming. Thoughts on rational development and utilization of water resources in my country. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1996, 11(4): 286-288. [刘昌明. 我国水资源合理开发利用的思考. 中国科学院院刊, 1996, 11(4): 286-288.]
- [2] Liu C M, Zheng H X. South-to-North Water Transfer schemes for China. *International Journal of Water Resources Development*, 2002, 18(3): 453-471.
- [3] Wang Yisen, Yang Yuanyue. China's South-to-North Water Diversion Project. *Yangtze River*, 2005, 36(7): 2-5, 71. [汪易森, 杨元月. 中国南水北调工程. 人民长江, 2005, 36(7): 2-5, 71.]
- [4] Zhu Erming. Overview of the South- to- North Water Diversion Project. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 1996, 27(11): 1-5. [朱尔明. 南水北调工程概况. 水利水电技术, 1996, 27(11): 1-5.]
- [5] Zuo Dakang, Liu Changming. Long-Distance Water Transfer: A Chinese Case Study and International Experiences. Beijing: Science Press, 1983. [左大康, 刘昌明. 远距离调水: 中国南水北调和国际调水经验. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [6] Liu Changming. Discussion on some issues of water resource allocation in China. *Science and Society*, 1996(2): 1-11. [刘昌明. 中国水资源调配若干问题的探讨. 科学对社会的影响, 1996(2): 1-11.]
- [7] Zhang Mei, Zhang Wei. Discussion on several main issues in the analysis of adjustable water volume in the west route of South-to-North Water Diversion Project. *Hydrology*, 2002, 22(4): 32-36, 18. [张玫, 张玮. 南水北调西线工程可调水量分析中几个主要问题的探讨. 水文, 2002, 22(4): 32-36, 18.]
- [8] Liu Changming. Ecological environment impact of the South-to-North Water Diversion Project. *Haihe Water Resources*, 2002(1): 1-5, 70. [刘昌明. 南水北调工程对生态环境的影响. 海河水利, 2002(1): 1-5, 70.]
- [9] Zhu Xiaochun, Yun Xinbao, Liu Jiangxia, et al. Preliminary study on agricultural resource water-saving model in the receiving area of the South-to-North Water Diversion Project in the Haihe River Basin. *Haihe Water Resources*, 2010 (1): 1-4. [朱晓春, 运新宝, 刘江侠, 等. 海河流域南水北调受水区农业资源性节水模式初探. 海河水利, 2010(1): 1-4.]
- [10] Qin Fuxing, Geng Leihua, Chen Xiaoyan. Analysis of water saving in urban life in the middle and eastern water receiving areas of the South- to- North Water Diversion Project. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004, 24(2): 12-15, 69. [秦福兴, 耿雷华, 陈晓燕. 南水北调中线与东线受水区城市生活节水分析. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 12-15, 69.]
- [11] Zhang Xizhen, Geng Liucheng. Implementing the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion as soon as possible on the basis of comprehensive water saving. *Water Sciences and Engineering Technology*, 1999(4): 14-15. [张



- 锡珍,耿六成.在全面节水的基础上尽快实施南水北调中线工程.河北水利水电技术,1999(4):14-15.]
- [12] Liu Changming. South-to-North Water Diversion: On the basis of water saving to alleviate the water crisis in the north. Science and Society, 2003(3): 26-31. [刘昌明.南水北调:在节水的基础上实施缓解北方水危机.科学对社会的影响,2003(3):26-31.]
- [13] Liu Changming, You Maozheng. South-to-North Water Diversion and sustainable development of agriculture in North China Plain. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1993, 1(1): 45-50. [刘昌明,由懋正.南水北调与华北平原农业持续发展.生态农业研究,1993,1(1):45-50.]
- [14] You Maozheng, Yuan Xiaoliang, Wang Huixiao. Middle Route Project of South-to-North Water Transfer and sustainable development of agriculture in North China Plain. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1995(1): 25-29. [由懋正,袁小良,王会肖.南水北调中线工程与华北平原农业持续发展.生态农业研究,1995(1):25-29.]
- [15] Qin Huanhuan, Sun Zhanxue, Gao Bai. The impact of agricultural water conservation and South-to-North Water Diversion on sustainable water management in the North China Plain. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1716-1724. [秦欢欢,孙占学,高柏.农业节水和南水北调对华北平原可持续水管理的影响.长江流域资源与环境,2019,28(7):1716-1724.]
- [16] Liu Changming. An analytical model of decision making on agricultural water supply for the Haihe Plain. Journal of Natural Resources, 1988, 3(3): 250-261. [刘昌明.海河平原农业供水的决策分析模型.自然资源学报,1988,3(3):250-261.]
- [17] Liu Changming, Zuo Jianbing. Water saving potential analysis and countermeasures for major cities for the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(1): 1-7. [刘昌明,左建兵.南水北调中线主要城市节水潜力分析与对策.南水北调与水利科技(中英文),2009,7(1):1-7.]
- [18] Fang Guohua, Zhao Wencui, Li Xin, et al. Analysis on water-saving potential of water receiving areas in Jiangsu of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 1-5, 27, 91. [方国华,赵文萃,李鑫,等.南水北调东线江苏境内受水区节水潜力分析.水利经济,2022,40(4):1-5,27,91.]
- [19] Zhan Liwei, Zhu Yongnan, Zhao Yong, et al. Influencing factors of domestic water and water conservation potential in the water import areas of the South-to-North Water Transfer Project. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 56-64. [詹力伟,朱永楠,赵勇,等.南水北调受水区生活用水影响因素与节水潜力.南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):56-64.]
- [20] Zhu Yongnan, Wang Qingming, Ren Jing, et al. Construction and application of water-saving index system in the receiving area of the South-to-North Water Diversion Project. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 187-195. [朱永楠,王庆明,任静,等.南水北调受水区节水指标体系构建及应用.南水北调与水利科技(中英文),2017,15(6):187-195.]
- [21] Liu Changming, Xu Yuexian. A brief analysis of the "staged implementation of the east route of the South-to-North Water Diversion, first open and then smooth". Geographical Research, 1983, 2(3): 96-99. [刘昌明,许越先.南水北调东线“分期实施,先通后畅”简析.地理研究,1983,2(3):96-99.]
- [22] Liu Changming, Du Wei. Geographical system analysis of water balance in the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project: Taking the First Phase Project of the Eastern Route as an example. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(2): 1-12. [刘昌明,杜伟.南水北调东线水量平衡的地理系统分析:以东线一期工程为例.水利学报,1986(2):1-12.]
- [23] Zhang Chuhan. Some thoughts on the follow-up project of the South-to-North Water Diversion Project. China Water Resources, 2022(18): 18-20. [张楚汉.关于南水北调后续工程的几点思考.中国水利,2022(18):18-20.]
- [24] Liu X M, Liu C M, Luo Y Z, et al. Dramatic decrease in streamflow from the headwater source in the central route of China's water diversion project: Climatic variation or human influence? Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D6). DOI: 10.1029/2011JD016879.
- [25] Zhang Aijing, Yao Wenfeng, Wu Zhijian. Analysis of the characteristics of runoff change in Danjiangkou Reservoir. Yangtze River, 2020, 51(3): 81-86, 93. [张爱静,姚文锋,吴智健.丹江口水库入库径流变化特征分析.人民长江,2020,51(3):81-86,93.]
- [26] Shen Dajun, Liu Changming. Analysis of the influence of different water diversion scales on the middle and lower reaches of the Han River in the middle route of South-to-North Water Diversion Project. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 341-348. [沈大军,刘昌明.南水北调中线工程不同调水规模对汉江中下游影响分析.地理学报,1998,

- 53(4): 341-348.]
- [27] Shen Dajun, Liu Changming, Chen Chuanyou. Analysis of the impact of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project on the middle and lower reaches of the Han River. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5): 426-433. [沈大军, 刘昌明, 陈传友. 南水北调中线工程对汉江中下游的影响分析. *地理学报*, 1996, 51(5): 426-433.]
- [28] Ning Yuan. The role of the diversion of the river to the Han River in the overall layout of the South-to-North Water Diversion Project. *China Water Resources*, 2022(18): 21-23. [宁远. 引江补汉工程在南水北调总体布局中的作用. *中国水利*, 2022(18): 21-23.]
- [29] Wu Xianfeng, Liu Changming, Yang Zhifeng, et al. Adjustable water volume and risk analysis of the west line project of South-to-North Water Diversion Project in the upper reaches of the Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 9-15. [吴险峰, 刘昌明, 杨志峰, 等. 黄河上游南水北调西线工程可调水量及风险分析. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 9-15.]
- [30] Men Baohui, Liu Changming, Xia Jun, et al. Application of R/S on forecast of runoff trend in the water-exporting regions of the first stage project of the Western Route of the South-to-North Water Transfer Scheme. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 568-573. [门宝辉, 刘昌明, 夏军, 等. R/S分析法在南水北调西线一期工程调水河流径流趋势预测中的应用. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 568-573.]
- [31] Liu Suxia, Xia Jun, Mo Xingguo, et al. Ecological water requirement estimation based on biological habits and flow changes in the western route of the South-to-North Water Diversion Project. *South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science & Technology*, 2007, 5(5): 12-17, 21. [刘苏峡, 夏军, 莫兴国, 等. 基于生物习性和流量变化的南水北调西线调水河道的生态需水估算. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(5): 12-17, 21.]
- [32] Yin Wei, Zhai Hongjuan, Deng Zhimin, et al. Study on ecological water demand in water source area of the West Route of South-to-North Water Diversion Project. *Yangtze River*, 2023, 54(6): 1-9. [尹炜, 翟红娟, 邓志民, 等. 南水北调西线工程水源区生态需水研究. *人民长江*, 2023, 54(6): 1-9.]
- [33] Han Ruiguang, Ding Zhihong. Research on the minimum ecological environment water demand in the channel of the First Phase Project of the South-to-North Water Diversion Project. *Water Resources Development Research*, 2009, 9(1): 31-33, 51. [韩瑞光, 丁志宏. 南水北调西线一期工程河道内最小生态环境需水量的研究. *水利发展研究*, 2009, 9(1): 31-33, 51.]
- [34] Jia Xinping, Cao Haitao, Zhao Yinliang. Analysis of factors affecting adjustable water volume of South-to-North Water Diversion West Route Project. *Yellow River*, 2005, 27(11): 45-47. [贾新平, 曹海涛, 赵银亮. 影响南水北调西线工程可调水量的因素分析. *人民黄河*, 2005, 27(11): 45-47.]
- [35] Zheng Hongxing, Liu Changming. Analysis of precipitation encounters in different hydrological regions on the eastern and middle lines of the South-to-North Water Diversion Project. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 523-532. [郑红星, 刘昌明. 南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 523-532.]
- [36] Kang Ling, He Xiaocong. Risk analysis of rainfall in the middle line of the South-to-North Water Diversion Project. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 44-50. [康玲, 何小聪. 南水北调中线降水丰枯遭遇风险分析. *水科学进展*, 2011, 22(1): 44-50.]
- [37] Yan Baowei, Guo Shenglian, Xiao Yi. A study on the encounter between rainfall abundance and drought in the water source area and water receiving area of the middle line of the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1178-1185. [闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究. *水利学报*, 2007, 38(10): 1178-1185.]
- [38] Feng Ping, Niu Junyi, Zhang Yong, et al. Analysis of the encounter between the rivers in the water source area and the Yellow River in the west route of the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(8): 900-907. [冯平, 牛军宜, 张永, 等. 南水北调西线工程水源区河流与黄河的丰枯遭遇分析. *水利学报*, 2010, 41(8): 900-907.]
- [39] Liu X M, Luo Y Z, Yang T T, et al. Investigation of the probability of concurrent drought events between the water source and destination regions of China's water diversion project. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(20): 8424-8431.
- [40] Han Yuping, Jiang Renfei, Ruan Benqing. Analysis of the encounter between water source area and water receiving area on the middle line of the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2007, 28(1): 8-11. [韩宇平, 蒋任飞, 阮本清. 南水北调中线水源区与受水区丰枯遭遇分析. *华北水利水电学院学报*, 2007, 28(1): 8-11.]
- [41] Chen Feng, Xie Zhenghui. The impact of climate change on the water source area and the water receiving area of the

- South-to-North Water Diversion Middle Route Project. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(2): 139-148. [陈锋, 谢正辉. 气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响. 气候与环境研究, 2012, 17(2): 139-148.]
- [42] Liu Changming, Du Wei. Optimum analysis of joint utilization of water resources considering environmental factors. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 17(5): 38-44. [刘昌明, 杜伟. 考虑环境因素的水资源联合利用最优化分析. 水利学报, 1986, 17(5): 38-44.]
- [43] Liu Changming, Du Wei. Application of system analysis in the water balance of the diversion river on the east route. Geographical Research, 1985, 4(3): 81-88. [刘昌明, 杜伟. 系统分析在东线引江水量平衡中的应用. 地理研究, 1985, 4(3): 81-88.]
- [44] Geng Liucheng, Feng Zhanhong, Zhao Ling. Research on rational allocation of water resources in receiving areas of South-to-North Water Diversion Project. Hebei Water Conservancy and Hydropower Technology, 2003(Suppl.1): 40-41. [耿六成, 冯战洪, 赵玲. 南水北调受水区水资源合理配置研究. 河北水利水电技术, 2003(增刊1): 40-41.]
- [45] Song Dandan, Yang Shutan, Chang Benchun, et al. Water resource allocation in the receiving area of the South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu Province. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 417-421. [宋丹丹, 杨树滩, 常本春, 等. 江苏省南水北调受水区水资源配置. 南水北调与水利科技(中英文), 2015, 13(3): 417-421.]
- [46] Shi Hansheng, Cheng Jilin, Fang Hongyuan, et al. Optimal allocation of water resources in Jiangsu section of the east route of South-to-North Water Diversion Project. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 76-81. [侍翰生, 程吉林, 方红远, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源优化配置. 农业工程学报, 2012, 28(22): 76-81.]
- [47] Du Furong, Dong Zengchuan, Fan Qunfang. Research on optimal allocation of water resources in the Shandong section of the South-to-North Water Diversion Project. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Suppl.1): 485-489. [杜芙蓉, 董增川, 范群芳. 南水北调山东段水资源优化配置研究. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 485-489.]
- [48] Zhang Ping, Zhao Min, Zheng Chuiyong. Optimal allocation model of water resources in the water receiving area of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. Resources Science, 2006, 28(5): 88-94. [张平, 赵敏, 郑垂勇. 南水北调东线受水区水资源优化配置模型. 资源科学, 2006, 28(5): 88-94.]
- [49] Wu Zening, Zuo Qiting. Discussion on optimal allocation of water resources in South-to-North Water Diversion (Middle Line) project system. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2002(3): 8-11. [吴泽宁, 左其亭. 南水北调(中线)工程系统水资源优化配置研究探讨. 南水北调与水利科技, 2002(3): 8-11.]
- [50] Pan Jiahua. Research on resource economics of water resources allocation across river basins: Taking the South-to-North Water Diversion Middle Route Project as an example. Natural Resources, 1994, 16(4): 7-14. [潘家华. 水资源跨流域配置的资源经济问题研究: 以南水北调中线工程为例. 自然资源, 1994, 16(4): 7-14.]
- [51] Zuo Dakang, Liu Changming, Xu Yuexian. A preliminary study on the impact of South-to-North Water Transfer on the natural environment. Geographical Research, 1982, 1(1): 31-39. [左大康, 刘昌明, 许越先. 南水北调对自然环境影响的初步研究. 地理研究, 1982, 1(1): 31-39.]
- [52] Gao Li, Wang Jitao. Impacts of the South-to-North Water Transfer Project on ecological environment. Water Conservancy Science and Technology and Economics, 2008, 80(2): 131-133. [高丽, 王继涛. 南水北调工程对生态环境的影响综述. 水利科技与经济, 2008, 80(2): 131-133.]
- [53] Liu Changming, Shen Dajun. The impact on the ecological environment of the South-to-North Water Diversion Project. Discovery of Nature, 1997(2): 2-7. [刘昌明, 沈大军. 南水北调工程的生态环境影响. 大自然探索, 1997(2): 2-7.]
- [54] Dou Ming, Zuo Qiting, Hu Caihong. Study on ecological environmental impact assessment of South-to-North Water Diversion Project. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(2): 63-66. [窦明, 左其亭, 胡彩虹. 南水北调工程的生态环境影响评价研究. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2): 63-66.]
- [55] Jin Yong, Tang Xinhua. Impact of the west route South to North Water Transfer Project on energy generation of reservoirs in the upper Yangtze reaches. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 118-126, 139. [金勇, 唐新华. 南水北调西线工程对长江上游水库发电的影响. 水力发电学报, 2010, 29(4): 118-126, 139.]
- [56] Zhang Xinhai, Zhang Mei, Han Xia, et al. Preliminary analysis of the impact of the South-to-North Water Transfer Project on the Yangtze River. Yellow River, 2000, 22(2): 20-22. [张新海, 张玫, 韩侠, 等. 南水北调西线工程对长江的影响初步分析. 人民黄河, 2000, 22(2): 20-22.]
- [57] Yu Weidong. Research on the impact of Weihe sewage on the water quality of the east route of South-to-North Water Diversion. Water Resources Protection, 1995, 11(2): 24-28. [于伟东. 卫河污水对南水北调东线水质的影响研究. 水资源



- 源保护, 1995, 11(2): 24-28.]
- [58] Yuan Boyu. Potential risks and countermeasures of water quality safety on the middle line of the South-to-North Water Diversion Project. *Beijing Water*, 2014(4): 8-12. [袁博宇. 南水北调中线水质安全潜在风险及对策. *北京水务*, 2014(4): 8-12.]
- [59] Huang Yixin, Tian Zhongzhi, Sun Leping, et al. Impact of project diverting Yangtze River water to northern Jiangsu on transmission towards north of *Oncomelania hupensis* snails. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2005, 17(3): 184-189. [黄铁昕, 田忠志, 孙乐平, 等. 江苏省江水北调对钉螺北移扩散影响的研究. *中国血吸虫病防治杂志*, 2005, 17(3): 184-189.]
- [60] Li Mingxin, Wang Hui, Zhang Mingbo. Design flood analysis of intersecting rivers in the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion Project. *Yangtze River*, 2005, 36(10): 4-6. [李明新, 王辉, 张明波. 南水北调中线工程交叉河流设计洪水分析. *人民长江*, 2005, 36(10): 4-6.]
- [61] Du Hong, Mei Ligeng. Analysis of the impact on the ecological environment of the Dongping Lake water storage project on the east line of the South-to-North Water Diversion Project. *Haihe Water Resources*, 2006(5): 15-17. [杜虹, 梅立庚. 南水北调东线东平湖蓄水影响处理工程对生态环境的影响分析. *海河水利*, 2006(5): 15-17.]
- [62] Yang Aimin, Zhang Lu, Gan Hong, et al. Evaluation on eco-environmental benefits in water reception areas of the East-Route Phase I Project of the South-to-North Water Diversion. *Journal of Water Resources*, 2011, 42(5): 563-571. [杨爱民, 张璐, 甘泓, 等. 南水北调东线一期工程受水区生态环境效益评估. *水利学报*, 2011, 42(5): 563-571.]
- [63] Liu Changming. Making full use of the ecological benefits of South-to-North Water Diversion to restore groundwater in the North China Plain. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(1): 17-19. [刘昌明. 发挥南水北调的生态效益修复华北平原地下水. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2003, 1(1): 17-19.]
- [64] Zhu Shouquan, Shan Guangzong, Hu Jichang, et al. Preliminary analysis of soil salinization along the east route of the South-to-North Water Diversion Project. *Geographical Research*, 1984, 3(4): 111-118. [祝寿泉, 单光宗, 胡纪常, 等. 南水北调东线沿线土壤盐渍化初步分析. *地理研究*, 1984, 3(4): 111-118.]
- [65] Chen Jie, Dongye Guangliang, Feng Yongjun, et al. Effects of South-to-North Water Diversion on soil secondary salinization along the Liangji Canal and countermeasures. *Shandong Agricultural Sciences*, 1988, 20(4): 1-4. [陈介福, 东野光亮, 冯永军, 等. 南水北调对梁济运河沿线土壤次生盐渍化的影响及防治对策. *山东农业科学*, 1988, 20(4): 1-4.]
- [66] Yao Naiguo. Discussion on the influence of South-to-North Water Transfer on secondary salinization of soil. *China Water Resources*, 1988(2): 24. [姚迺国. 浅议南水北调对土壤次生盐碱化的影响. *中国水利*, 1988(2): 24.]
- [67] Zhang Yuanjiao, Yang Xiaojing. Investment and financing for auxiliary projects of South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Economics of Water Resources*, 2012, 30(5): 11-14, 75. [张元教, 杨晓婧. 南水北调配套工程投融资问题研究. *水利经济*, 2012, 30(5): 11-14, 75.]
- [68] Fu Chun, Hu Zhenpeng, Yang Zhifeng, et al. Assumptions on water rights, water rights transfer and South-to-North Water Diversion Project fund. *China Water Resources*, 2001(2): 29-30, 5. [傅春, 胡振鹏, 杨志峰, 等. 水权、水权转让与南水北调工程基金的设想. *中国水利*, 2001(2): 29-30, 5.]
- [69] Liu Weiguo, Zheng Chuiyong, Xu Zengbiao. Analysis of the role of water price in the South-to-North Water Diversion Project on the optimal allocation of water resources in the receiving area. *Rural Economy*, 2008(4): 102-105. [刘卫国, 郑垂勇, 徐增标. 南水北调工程水价对受水区水资源优化配置的作用分析. *农村经济*, 2008(4): 102-105.]
- [70] Wang Guanjun, Liu Changming. Discussion on the Phase I Project of the East Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project and water price policy in the receiving area. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2009, 45(Suppl.1): 590-594. [王冠军, 刘昌明. 南水北调东中线一期工程及受水区水价政策探讨. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(增刊1): 590-594.]
- [71] Sun Liang, Zhang Yanhui, Qian Zili, et al. Game analysis of water price and water saving in South-to-North Water Diversion. *Yangtze River*, 2008, 39(8): 39-40. [孙亮, 张艳惠, 钱自立, 等. 南水北调水价与节水的博弈分析. *人民长江*, 2008, 39(8): 39-40.]
- [72] Liu Hongxian. Water right theories and water right distribution of the South-North Water Diversion. *Yellow River*, 2002, 24(3): 15-17, 46. [刘洪先. 水权理论与南水北调工程水权分配. *人民黄河*, 2002, 24(3): 15-17, 46.]

## Several key issues in the high-quality development of the South-to-North Water Diversion Project: From scientific research to engineering practice

WU Xianfeng<sup>1</sup>, CHEN Qingwei<sup>1</sup>, WANG Guan<sup>2</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>

(1. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China;

2. China South-to-North Water Diversion Eastern Route Corporation Limited, Beijing 100160, China)

**Abstract:** China's water resources shows an uneven distribution pattern of shortage in the north and abundance in the south, and the trans-basin water diversion is an effective solution to alleviate the uneven distribution. The South-to-North Water Diversion Project (SNWD) is an important strategic infrastructure to alleviate the shortage of water resources in the northern China, optimize the allocation of water resources, and improve the ecological environment. The planning and construction of the SNWD lasted more than 70 years from the initial proposal of the scheme concept to the completion of the first phase of the project. Key issues, such as optimal allocation of water resources, impact on the ecological environment, and project construction management mechanism have been studied deeply, and a series of key results have been applied to the preliminary demonstration of the SNWD, and to help high-quality planning and construction of the SNWD. In 2014, the first phase of the SNWD was officially opened, marking that the project had changed from a grand concept to a great project, and entered the stage of engineering practice from scientific research. For the 9 years since the project opened, the comprehensive benefits of the project have been continuously demonstrated. This paper comprehensively sorts out the series of scientific research results on several key issues of the high-quality development of the SNWD. Then the practical results of the SNWD in optimizing the water resource allocation pattern, improving the water safety guarantee capacity of the water receiving area, and promoting the protection and restoration of the ecological environment along the routes were systematically summarized. Finally, we put forward the thinking and prospect of the follow-up construction and operation of the project.

**Keywords:** South-to-North Water Diversion; scientific research; engineering practice; water resource allocation; ecological environment