

南水北调东线工程黄河以北线路优化构想

赵勇^{1,2}, 何凡^{1,2*}, 王庆明^{1,2}, 何国华^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要:《南水北调工程总体规划》批复近 20 年来, 我国北方地区水资源供需情势、水生态环境问题均发生深刻变化; 优化南水北调后续工程线路, 对适应北方地区新发展形势、落实国家重大战略具有重要意义。京津冀地区是南水北调东线后续工程的主要受水区, 分析本地区的中长期供求趋势、空间分布及结构特征, 可以发现: 从长远供求趋势看, 京津冀地区水资源缺口为 $3.9 \times 10^9 \sim 6 \times 10^9 \text{ m}^3$, 用水需求的增长点主要是中西部城市区, 也是雄安新区等国家战略布局实施的重点保障区域; 充分利用现有河渠, 新增经白洋淀进京路线, 将供水中心西移, 使工程线路更侧重覆盖地下水浅层超采区, 也更利于补给河湖生态用水; 东线后续工程经白洋淀进京方案具有串联水系多、自流覆盖广、调蓄能力强、综合效益高等比较优势, 更适应京津冀地区高质量发展的需求。结合南水北调东线后续工程规划建设面临的新形势, 梳理工程的功能定位、整体布局、线路走向等关键问题, 提出东线后续工程线路优化构想, 可为南水北调后续工程高质量发展提供参考。

关键词: 南水北调工程; 京津冀; 白洋淀; 水资源供需; 双线格局

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

Optimizing the Route to the North of the Yellow River for the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project

Zhao Yong^{1,2}, He Fan^{1,2*}, Wang Qingming^{1,2}, He Guohua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Since the *Overall Planning of the South-to-North Water Diversion Project* was approved 20 years ago, the supply and demand situation of water resources and water ecological environment problems in North China has undergone profound changes. Therefore, optimizing the subsequent route becomes significant for adapting to the new development situation in North China and for implementing major national strategies. The Beijing–Tianjin–Hebei region is the major water-receiving area of the follow-up project of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project. Analyses of the long-term supply and demand trend, spatial distribution, and structural characteristics of the Beijing–Tianjin–Hebei region exhibit that from the long-term supply and demand trend, the gap of water resources in this region is $3.9 \times 10^9 \sim 6 \times 10^9 \text{ m}^3$, and the growth of water demand is mainly contributed by the central and western urban areas, which are also key areas for implementing national strategies such as the construction of the Xiongan New Area. Moving water supply centers westward by establishing a new route into Beijing via Baiyang Lake while using existing river channels allows the route of the project to cover the shallow groundwater overexploitation areas to the largest extent, which is also

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-08-15

通讯作者: *何凡, 中国水利水电科学研究院水资源研究所教授级高级工程师, 研究方向为水资源管理、规划与战略; E-mail: hefan@iwhr.com

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家杰出青年科学基金项目(51625904); 国家自然科学基金项目(52061125101)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

conducive to the supply of ecological water for rivers and lakes. By this means, the eastern route can satisfy the requirement of the region for high-quality development owing to its comparative advantages of multiple series water systems, wide coverage of artesian water, strong capacity of regulation and storage, and high comprehensive benefits. Considering the new situation of the follow-up project planning and construction, we reviewed the major issues including the function positioning, overall layout, and route orientation of the project, and proposed a conception for optimizing the follow-up project of the eastern route, thereby providing a reference for promoting the high-quality development of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords: South-to-North Water Diversion Project; Beijing–Tianjin–Hebei region; Baiyang Lake; water supply and demand; double route

一、前言

调水工程是解决水资源空间分配不均、满足居民用水需求的重要手段，目前世界上大规模、长距离的调水工程已有160多项。美国1959年建设的加州调水工程，旨在解决加利福尼亚中部、南部地区干旱缺水及城市发展需要，输水干线长度为1086 km，年调水量为 $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。法国1983年建成的迪朗斯–凡尔顿调水工程，设计灌溉面积为 $6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，年发电量为 $5.75 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，满足了灌溉、发电、供水的综合需要。澳大利亚1949年建设的雪山工程，将斯诺伊河的多余水量引向西坡并在调水沿途利用落差发电，保证了城市和重要工业区的水源供应，促进了沿线盆地农牧业发展。

我国南水北调工程是世界上规模最大的调水工程，通过三条调水线路（东线、中线、西线）与长江、黄河、淮河、海河四大江河建立联系，构成了“四横三纵”的总体布局，以利于实现水资源南北调配、东西互济的合理配置格局。自2013年11月南水北调东线一期工程建成通水后，截至2021年5月，累计向山东省调水超过 $5.29 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，有效缓解了鲁南、山东半岛、鲁北地区的缺水问题，综合效益显著 [1]。加快构建国家水网主骨架和大动脉，为全面建设社会主义现代化国家提供有力的水安全保障，成为南水北调后续工程高质量发展的客观要求 [2]；其中，南水北调东线后续工程的规划建设，现实需求迫切。也要注意，到《南水北调工程总体规划》批复近20年来，我国经济总量、产业结构、城镇化水平等显著提升 [3,4]，社会主要矛盾发生了转化，一系列重大战略相继实施，北方主要江河情势、地下水超采等水生态环境问题动态演变 [5~7]，都对南水北调工程提出了新要求。有研究认为，应评估《南水北调工程总体规划》实施情况，分析其依据基础条件的变化，研判变化对加强和优化水资源供给提出的新要求 [8]；南水北调后续工程开展

总体规划评估、重大问题研究、工程体制机制创新，完善东线二期、中线引江补汉工程前期工作，推动国家水网重大工程建设 [9]；注重国家重大战略、生态文明建设等对加强并优化水资源供给提出的新要求，科学确定工程规模与总体布局，处理好发展和保护、利用和修复的关系 [10]；原有的南水北调东线工程规划线路并未考虑雄安新区设立、华北地下水超采综合治理等情况，在覆盖规模、调用水量方面难以适应新的发展形势 [11,12]。

本研究团队曾于2014年撰写了“关于争取南水北调东线等新水源进京的建议”，提出将北京市纳入东线后续工程受水区以及经白洋淀进京的线路构想；2020年撰写了“关于优化南水北调东线二期工程进京线路的建议”，提出东线经白洋淀进京的必要性和优势。基于以上研究成果，结合南水北调东线后续工程规划建设面临的新形势，针对工程功能定位、整体布局、线路走向等重大问题进行系统梳理，提出优化东线后续工程黄河以北线路的相关构想。

二、京津冀地区水资源供需格局分析

《南水北调工程总体规划》提出的黄河以北受水区包括山东省鲁北地区，河北省沧州市、衡水市部分地区，天津市市区，线路主要布设在大清河淀东清南天津平原、河北省黑龙港东部平原、山东省徒骇马颊河平原。在将北京市纳入受水区后，京津冀地区将成为黄河以北部分的主要受水区。京津冀地区水资源供需格局呈现出三方面特征，需在东线后续工程规划中重点考虑。

（一）京津冀地区水资源长远供求趋势

京津冀地区水资源缺口约为 $3.9 \times 10^9 \sim 6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，需要增加外调水量以保障水资源安全 [13]。在京津冀所处的海河流域，水资源长期处于严重超载状

态 [14], 开发利用程度一度达到 106%, 需从缺水的黄河流域调水才维持了经济社会的正常发展。随着南水北调东中线通水, 海河流域的整体开发利用程度有所降低; 2020 年依靠从黄河流域调水 $5.614 \times 10^9 \text{ m}^3$, 从长江流域调水 $5.349 \times 10^9 \text{ m}^3$, 流域水资源开发利用率下降到了 90% 左右, 仍远超 40% 的合理阈值。从人均水资源量看, 中线一期工程年调水量为 $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$, 扣除沿途损失, 净输入京津冀地区的水量为 $4.95 \times 10^9 \text{ m}^3$; 即使在该部分水量充分利用的情况下, 三地人均水资源量也仅约为 273 m^3 (为全国平均水平的 1/7), 水资源紧缺情势没有根本扭转。

根据“十三五”国家重点研发计划项目“京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用”预测成果, 在现状评价的水资源量、中线一期工程和引黄水量按多年平均考虑、强化节水等条件下, 为保障经济社会合理用水需求, 京津冀地区 2035 水平年正常年份缺水情景分别为: ① 实现最小生态用水和地下水采补平衡, 缺水量为 $2.9 \times 10^9 \text{ m}^3$; ② 实现适宜生态用水和地下水采补平衡, 缺水量为 $3.6 \times 10^9 \text{ m}^3$; ③ 实现地下水位上升, 按 50 年恢复期计算, 每年需回补地下水 $1.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 缺口为 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。如果考虑未来山丘区地表水资源量大概率继续将衰减 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上, 则上述水资源缺口至少增加 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$, 分别为 $3.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $4.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ [9], 需要进一步增加外调水量以保障区域水资源安全。

当然, 在理论上东线后续工程、中线后续工程均可增加一定规模的外调水量, 应在综合考虑东、中线工程互济互补的基础上进行统筹安排。其中, 中线工程如果充分利用现有工程设施, 采取局部地区扩建完善, 挖掘汛期和工程潜力等措施, 预估中线总干渠输水能力可由一期的 $9.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 提升至 $1.15 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 即具有超过 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上的增加供水能力。在中线工程挖潜方案下, 仍需东线后续工程向黄河以北地区供水。

(二) 京津冀地区水资源空间分布特征

京津冀国土资源开发重心在中西部山前平原和中部平原, 水资源需求增长点也集中在该区域。根据城市分布的分析结果, 京津冀平原区 3 个地貌分异交界附近集中了区域内的全部高等级城市 [13]。其中, 在山前平原边缘的 100 m 等高线上分布有北

京、石家庄、邢台、邯郸、安阳等城市; 在中部平原边缘的 20 m 等高线上分布有唐山、廊坊、保定、衡水、德州等城市; 在滨海平原区分布有天津、沧州两市。

2012 年以来, 京津冀国土空间开发利用和保护格局发生了进一步变化 [15,16]。在宏观层面, 京津冀协同发展、建设河北雄安新区成为国家重大战略, 北京、天津、保定等市的平原地区 (包括雄安新区) 和廊坊市定位为京津冀协同发展的中部核心功能区。在区域层面, 北京市正在建设大兴国际机场临空经济区, 全面实施永定河综合治理与生态修复; 河北省形成了以石家庄市为核心, 邯郸、邢台、保定等市为重要节点的经济联系紧密城市群。可以预见, 随着京津冀协同发展战略的深入推进, 尤其是雄安新区的建设发展 [17~19], 京津冀国土空间开发重心将更加向山前平原和中部平原集中。

然而, 与国土空间开发格局相对应, 京津冀地区因长期处于缺水状态, 水资源开发格局早已相对固化, 基本没有冗余的水资源可供调节, 难以支撑新的增长点 [20,21]。以雄安新区为例, 建设发展不仅会带来整个区域对优质水源需求的大幅增长, 而且对白洋淀乃至整个白洋淀流域的生态用水提出了更高要求 [22~24]。根据本研究团队参与编制的《雄安新区水资源保障规划》, 白洋淀生态需水的刚性需求为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (用于弥补淀区蒸发消耗水量和下渗水量), 弹性需求为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (用于改善淀区水动力和水生态条件), 2030 年新区经济社会发展的需水量约为 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 合计需水量为 $6 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

南水北调中线将成为雄安新区经济社会用水的主要水源: 近期由现有的南水北调配套供水工程向新区建设提供用水, 远期建设南水北调中线雄安干渠来保障新区的生活生产用水。白洋淀水源保障主要有两条途径: 引黄入冀补淀工程, 向白洋淀补水规模由规划的 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 提高到 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$; 通过流域水量置换、用水结构调整, 流域上游水库和入淀河流多年平均可补水量约为 $9.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。从十年、百年等长时间尺度的角度看, 即使按照既有规划发展, 未来雄安新区水资源安全程度依然十分脆弱: 生活水源仅有南水北调中线单一优质水源, 白洋淀需要从黄河进行应急补水才能维持生态用水的基本需求, 入淀河流断流问题难以解决。

现阶段, 南水北调中线是雄安新区经济社会用

水的主要水源，主要是利用河北省南水北调中线工程尚未达效的空档期，暂时通过各地区南水北调中线用水指标调整来满足新区用水需求，未来新区依然面临强烈的用水竞争。这样的水安全图景，显然不足以匹配雄安新区的建设发展定位。因此，将东线工程接入白洋淀，不仅可以形成东中互补的供水结构，极大增强雄安新区供水的稳定性，还可以根本性地解决河淀生态用水不足、区域生态退化等问题，为建设绿色、生态、宜居新城区创造保障条件。

（三）京津冀地区水资源结构特征

不同行业的水资源需求趋势分异显著，尤其是京津冀地区中西部的生态需水更为强烈。从经济社会规模、产业结构、社会结构现状看，京津冀地区需水增长的关键驱动力依然长期存在；但因各城市间的经济、生态本底差距较大，区域间、行业间差异化特征明显，用水增长将存在明显的地域和行业差异。京津两地的水资源需求增量集中在生态，而河北省的生活、工业、生态都面临用水增长需求。这意味着东线工程的供水对象和功能定位需要根据需水结构的区域和行业差异进行相应优化。

与《南水北调工程总体规划》预测情景相比，需求结构的最大变化体现在生态方面，原因在于：因有大量的生态历史欠账待弥补，河湖生态用水保障需求呈快速增长态势。相关需求仍然集中在京津冀地区中西部的山前平原和中部平原。在生态环境历史欠账方面，华北平原地区的地下水累计亏空达 $1.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，带来了严重的生态退化问题。在南水北调中线工程通水的情况下，现阶段能维持整体采补平衡、局部地区有所回升已显艰难，要恢复到合理的地下水位仍需极大努力。关于地下水超采区，能通过河湖补水等措施进行恢复的浅层地下水超采区主要分布在石家庄、邢台、保定、北京等市的山前平原区，而东部沿海地区的浅层地下水超采很少，天津、沧州等沿海城市基本未发生浅层超采。

在河湖生态水量保障方面，海河流域实现河湖生态复苏的需求极为迫切。根据近10年的实测资料，海河流域与我国其他流域相比，现状生态基流达标率、优良率均为最低水平，入海水量占比仅略高于黄河 [16]。在海河流域的主要河流中，滦河、北运河的生态水量满足状况相对较好，永定河、大清河、南运河的满足状况较差。其中，永定河干支流4个河

段（具体为桑干河的册田水库—官厅水库段、洋河的怀安—官厅水库段、永定河干流的卢沟桥—屈家店段、永定新河的屈家店—河口段），生态水量均得不到满足。对于永定河、大清河水系，需要从更接近河流上游的山前平原补水才能取得良好效果。

三、南水北调东线后续工程黄河以北线路优化构想

（一）线路优化构想的主要内容

现规划线路是以《南水北调工程总体规划》东线规划线路为基础，利用小运河、位山引黄三千渠、漳卫河、南运河、子牙河、马厂减河、青年渠工程等已有工程及河流北上，至天津市北大港水库。

从前文分析可见，无论是城市需水还是生态需水，都集中在京津冀地区中西部的平原区。因此，线路优化构想的总体思路为：充分利用现有河道和渠道，单线变双线，将供水重心西移；工程线路更侧重于覆盖地下水浅层超载区，更利于补给河湖生态用水。具体分为两方面：现规划线路保留，仍以天津市北大港水库为终点，重点保障天津市、大清河等地的用水需求；修建西干线，将东线水利用卫千渠从卫运河引水，经千顷洼（衡水湖）进入引黄入冀补淀工程，再经引黄入冀补淀工程调入白洋淀。

需要说明的是，因利用引黄入冀补淀工程输送东线二期工程所调水至白洋淀，东线二期与引黄入冀补淀工程受水区在此区间有所重叠；为便于工程运行管理，可将原配置给衡水湖以北地区的入冀补淀水量统一在衡水湖以南进行消纳，而衡水湖以北地区由东线二期工程进行供水。

（二）东线水进白洋淀方案可行性分析

1. 充分利用已建引水工程与河道，在经济技术上可行性良好

经河北白洋淀向北京市调水，从西南方向进京，距北京市直线距离为60 km，高程差为35 m。可通过建成的引黄入冀补淀工程线路，将东线水调入白洋淀，再从白洋淀利用白沟河河道或建设管道输水至北京永定河上游，直接覆盖北京市大部分平原区的河湖水系。现规划方案是经天津九宣闸向北京市调水，从东南方向以管道形式进入北京市通州

区,距北京市直线距离约为 100 km,高程差为 38 m。两类方案的经济技术指标差别不大,可以判定经白洋淀向北京市调水在经济技术上是可行的。

2. 把握雄安新区建设的历史机遇,供水水质可以得到保障

水质保障是东线发挥工程效益的重要基础。2002 年东线一期工程启动时,调水沿线水质污染较为严重;作为重要调蓄水库和调水通道的南四湖、东平湖均为劣 V 类水,经过 10 年治污才达到了东线 III 类水质目标。2017 年设立河北雄安新区后,白洋淀流域的生态环境保护和治理被提到前所未有的高度,白洋淀乃至整个大清河流域水质提升明显并有望得到根本性改善。2017 年前,白洋淀水质长期处于 IV 类~劣 V 类,富营养化问题突出,上游主要污染物化学需氧量(COD)、氨氮年入河量分别是现状限排总量的 4.3 倍、14.1 倍。近年来,大力推进城镇污水治理、生态治理修复、河流综合整治等工程,白洋淀水质实现了逐年改善,2021 年白洋淀流域的断面水质均达到 III 类及以上。未来在东线治污专项、雄安新区建设的双重推动下,东线供水的水质可以得到保障。

四、对南水北调东线后续工程进京方案的初步思考

(一) 东线后续工程经白洋淀进京方案

将北京市纳入受水区后,现规划线路是从天津九宣闸建设输水管线进入北京市通州区;在没有东线后续工程进白洋淀方案的情况下,该方案是合理和可行的。如果东线后续工程进白洋淀方案被确定,则建议进一步考虑经白洋淀进京线路,即东线水进入白洋淀后,再利用白沟河已有河道或管道输送至北京市永定河流域;沿途串起雄安新区、北京大兴国际机场,供水覆盖北京市平原区。东线后续工程黄河以北线路将形成完整的“双线”格局(见图 1)。

(二) 东线后续工程经白洋淀进京方案的优势分析

1. 串联白洋淀、永定河等重要河湖湿地,覆盖大清河、永定河大部河网水系,生态效益发挥更充分

作为华北平原最大的淡水湖泊,白洋淀具有独

特的自然景观,其生态修复水平事关雄安新区的发展质量;然而入淀河流断流、生态需水难以保障一直是制约生态修复的瓶颈性因素。东线工程将白洋淀作为重要的调蓄水库与调水通道,可直接推动淀泊的生态水量、水动力条件得到根本性改善。从白洋淀往南,可通过东线串联千顷洼(衡水湖)等湖泊湿地;往北则进入永定河上游,直接支撑整个永定河流域的综合治理与生态修复,有助于显著改善北京市的生态环境质量;往东可覆盖大清河水系中下游,串联东淀、文安洼、团泊洼、北大港等湖泊湿地。

2. 自流覆盖范围更广,与南水北调中线等工程的联动作用更强,有利于构建多元互补的京津冀水资源保障网

从近年来南水北调东、中线一期工程通水后的情况看,自流覆盖范围对发挥工程效益具有重要作用,甚至直接决定了工程的作用半径;在华北地区地下水超采治理工作中,这一现象尤为明显。自流覆盖范围的扩大意味着更强的经济性,尤其是长期经济效益更为显著,将直接影响工程是否“可以持续”。与经天津九宣闸进京方案相比,“双线”方案在京津冀地区的自流覆盖范围可扩大约 78%,将新增覆盖武强、河间、献县、河间、任丘等地下水超采区县,对当地的供水保障、地下水压采支撑作用更为显著。此外,经白洋淀进京线路比原规划线路更靠近中线,干线与引黄入冀补淀工程相结合,终点与永定河和万家寨引水工程相衔接;未来可形成以南水北调东线、中线,万家寨引水工程,引黄入冀补淀工程等调水工程为轴,串联大清河水系和永定河水系,构建多源互济的京津冀地区水资源保障网。

3. 对北京市而言,经白洋淀进京线路方案的工程综合效益以及供水可靠性、用水经济性具有明显优势

现规划进京路线为自天津市九宣闸北上,进入北京市境内最低洼的通州区。随着北京市水污染治理力度的不断加大,通州区的缺水问题并不严重,而且没有调蓄水库。与现规划方案相比,经白洋淀进京线路方案具有三方面优势。① 调蓄能力极大增强。白洋淀 7 m 水位对应的库容为 $3.6 \times 10^8 \text{ m}^3$;未来采取清淤措施后,目标水位下的库容可增加到 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这部分库容为东线提供了华北地区极为难得的调蓄能力,且东线水调入永定河上游后即可进入三家店水库和规划建设的陈家庄水库调蓄。② 有

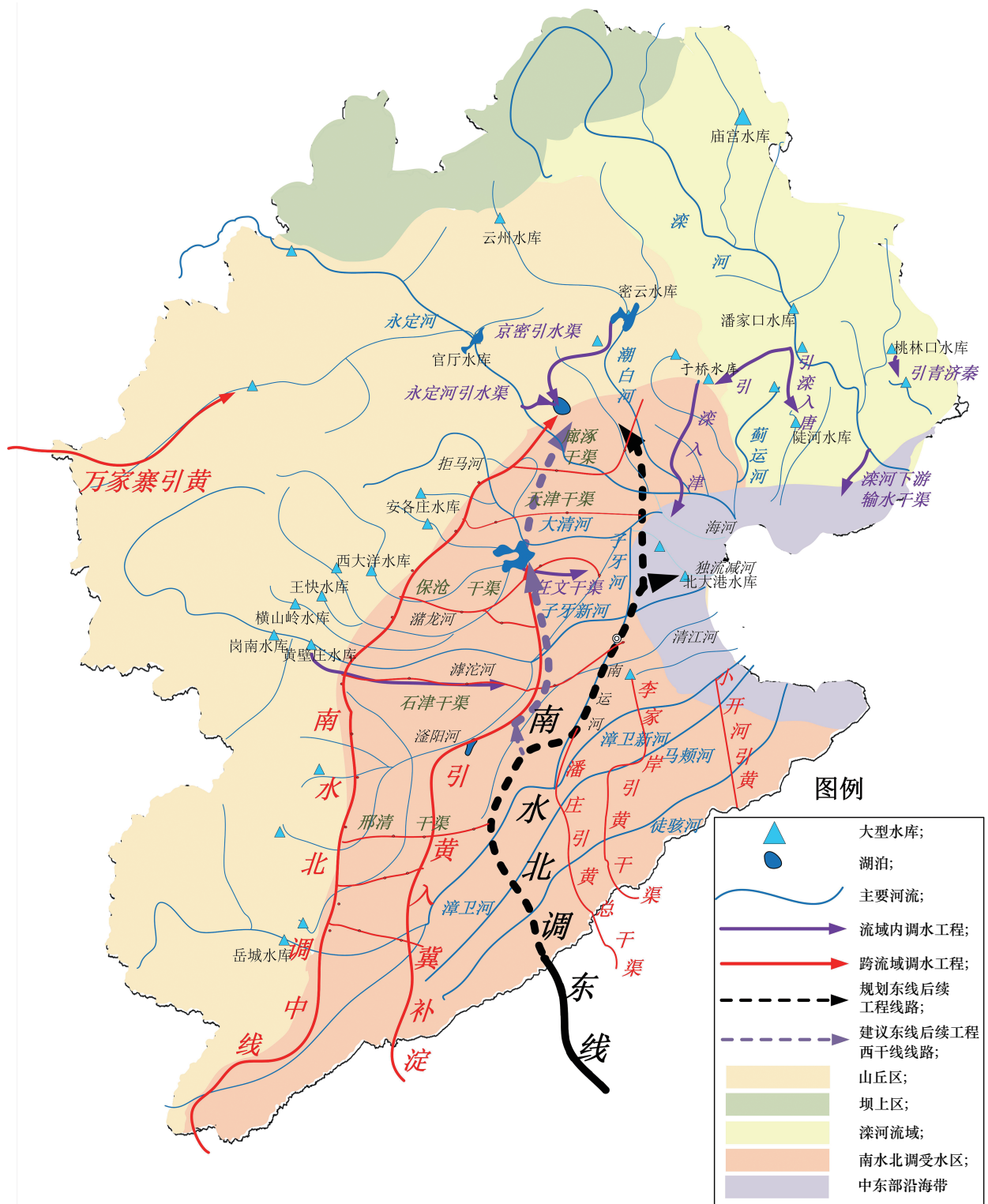


图1 现规划线路以及经白洋淀进京线路
注：图中“建议东线后续工程西干线线路”含经白洋淀进京线路。

利于构建北京市的双环供水格局。东线水调入永定河上游后，可接入北京市供水二环；与配置南水北调中线水，利用密云、怀柔水库进行调蓄的供水一

环，共同形成平时双环分质供水、应急时互通互补的城市供水格局。③ 生态环境效益极高。万家寨引黄工程每年 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右的水量不足以保障当前永

定河生态用水，也就制约了流域生态修复水平。东线水进入后，将直接支撑整个永定河流域的综合治理与生态修复，还能自流到城区大部分主要景观河道以提高城市宜居水平。

4. 经白洋淀进京线路更深入华北平原腹地，有利于带动整个区域的环境治理

雄安新区建设是“以点带面”，为华北平原生态治理添加牵引力。南水北调东线一期工程的建设经验表明，后续工程可以实现“以线带面”，带动整个华北平原的生态治理，尤其是水环境保护（见图2）。东线治污，难的不仅仅是南四湖；因处于经济较发达的东部地区，而又主要利用现有的京杭运河输水和湖泊调蓄，沿途的治污任务都很艰巨且各具特点。例如，山东省制定了全国第一个流域性排污标准，其中的COD、氨氮排放标准都显著严于同期的国家行业标准；严格的地方标准不仅逼停了许多污染严重的“小土”企业，也倒逼大企业积极升级生产工艺；经过改造，山东省造纸业产能重新恢复，变成低耗能、重环保的绿色产业，达到国内领先水平。因此，以南水北调水质达标来带动水环境保护和水生态治理，倒逼产业结构调整 and 区域经济布局优化，进而推动循环经济、绿色经济、低碳经济发展，是完全可能的。

5. 在一定程度上避开地下咸水区，有利于充分利用渗漏水量，提高工程综合效益

黄河以北地下咸水区的渗漏水量也是工程选线的重要因素。根据规划估算，黄河以北输水年损失

高达 $1.01 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，约占过黄河水量的20%。现规划输水线路几乎全部位于地下咸水区，咸水区的渗漏水量对地下水补给效应极为有限，在有些地区甚至起到负面作用（地下水位过浅引起土壤盐渍化）。相比之下，西干线（含经白洋淀进京线路）淡水区面积将增加6847 km²，渗漏水量可成为最经济有利的调蓄，从而为当地经济社会或生态环境有效利用。

五、南水北调东线后续工程的几点讨论

（一）优化后续工程功能定位

南水北调工程的属性定位是决定工程能否顺利实施并保持良性运行的根本性问题。南水北调东、中线一期工程通水以来，水价承受能力较高的城镇生活和工业供水矛盾得到很大缓解；未来供水矛盾将主要表现为农业和生态缺水，南水北调后续工程应承担更多的公益性任务，尤其是河湖生态和地下水超采置换等。显然，后续工程的公益性特征将较一期工程更加突出。还需进一步完善南水供给城市、农业、生态等不同目标的水价形成机制，并与功能定位优化相匹配，这是关乎后续工程能否可持续运行的重要方面。

（二）加强技术和体制机制创新

在工程运行过程中，应充分采用智慧管理手段来提高自动化、智能化水平，探索采用风电、光伏发电等清洁能源，合理降低运行管理成本。南水北调东线工程各泵站多邻近湖泊，周边风能资源丰富，具备较好的风能开发价值；泵站运行时段集中在风能资源最为丰富的秋冬季，为能源保障提供了便利条件。沿线广泛分布的大型调蓄湖泊，可作为天然的“能量调节器”来平抑风电、光伏发电等新能源出力的不稳定性，使新能源抽水蓄能成为可能。可推进跨地市、跨省份的水权转让，让有需求、有能力多接受南水的城市和地区以城市供水及生态补水等形式最大限度地消纳南水，进一步提高工程运行的综合效益；也可使暂时难以消纳的地区取得一定的经济收入，用于配套工程建设投入。

（三）合理确定工程推进时序

与经济社会的其他需求一样，用水需求也是一

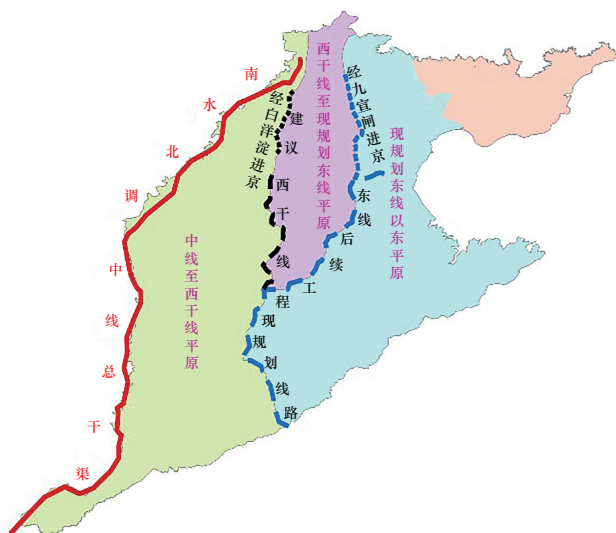


图2 华北平原各区域划分示意图

个逐步释放的过程；建议按照“先通后畅”思路推进南水北调东线二期工程建设。鉴于东线穿黄河工程已按照一、二期结合的 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 规模进行建设，东线二期工程先期可按过黄河流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 进行规划建设；合理利用南水北调东线一期工程穿黄没有达效的条件，率先实施东线二期黄河以北供水工程和“卡脖子”关键工程，然后再逐步推进黄河以南的工程建设。通过工程推进时序的优化，在充分发挥一期工程作用同时，控制近期投资强度。

(四) 开展单线与双线方案比选论证

南水北调东线二期工程需要站位于百年工程的角度，综合各方因素，力求充分支撑京津冀地区的经济社会发展和生态环境治理，使得综合效益发挥得更为广泛、更加持久。建议在相关工程规划中，将双线方案纳入比选方案考虑，在工程成本、运行成本、供水范围、调节能力、经济效益、生态环境效益等方面进行全面比较和优选。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 28, 2022; **Revised date:** August 15, 2022

Corresponding author: He Fan is a professor-level senior engineer from the Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. His major research field is water resources management, planning, and strategy. E-mail: hefan@iwhr.com

Funding project: National Key R&D Program of China (2021YFC3200204); National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51625904); National Natural Science Fund project (52061125101)

参考文献

- [1] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 60–66.
Yang Z T, Huang X F, Fang G H, et al. Benefit evaluation of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud mod [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(4): 60–66.
- [2] 水利部规划计划司. 认真学习贯彻习近平总书记重要讲话精神扎实推进南水北调后续工程高质量发展[J]. 党建, 2021 (8): 18–20.
Department of Planning and Programming, Ministry of Water Resources. Carefully study and implement the spirit of Xi Jinping's important speech, promote high quality development of follow-up project of South-to-North Water Diversion [J]. *Dangjian*, 2021 (8): 18–20.
- [3] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019 (4): 31–41.

- [4] Liu J, Bao Z X, Liu C S, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019 (4): 31–41.
- [4] 章恒全, 覃颖聪, 张陈俊. 中国产业用水量变化驱动效应分解与差异分析[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 1–7.
Zhang H Q, Qin Y C, Zhang C J. Decomposition and difference analysis of dynamic driving effect of industrial water use in China [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, 37(6): 1–7.
- [5] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 京津冀水资源承载力风险评估模型构建研究[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2623–2637.
Yu H Z, Li L J, Li J Y. Construction of risk assessment model of water resources carrying capacity in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9): 2623–2637.
- [6] 马睿, 李云玲, 贾冬冬, 等. 基于多指标的黄河流域空间均衡状态评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(2): 217–225.
Ma R, Li Y L, Jia D D, et al. Evaluation of spatial equilibrium status for the Yellow River Basin based on comprehensive multi-index method [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(2): 217–225.
- [7] 高建东, 冯棣. 1998—2017年海河流域水资源变化趋势分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 101–105.
Gao J D, Feng D. Analysis on the trend of water resources in Haihe River Basin during 1998—2017 [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(S2): 101–105.
- [8] 李国英. 推进南水北调后续工程高质量发展[N]. 人民日报, 2021-07-29(13).
Li G Y. Promoting high-quality development of follow-up project of South-to-North Water Diversion Project [N]. *People's Daily*, 2021-07-29(13).
- [9] 石春先. 落实六项要求 加强顶层设计 拿出经得起历史和实践检验的规划设计[J]. 中国水利, 2021 (11): 1.
Shi C X. Implementation of the six requirements to strengthen the top-level design and come up with planning and design that can stand the test of history and practice [J]. *China Water Resources*, 2021 (11): 1.
- [10] 沈凤生. 扎实推进后续工程规划设计和前期工作[J]. 中国水利, 2021 (11): 7.
Shen F S. Solid progress will be made in subsequent engineering planning and design and preliminary work [J]. *China Water Resources*, 2021 (11): 7.
- [11] 陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其, 等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[EB/OL]. (2021-12-07)[2022-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SZYB20211204000&v=MTYwODBaT3NQWxc5TXptUm42ajU3VDNmbHFXTTBDTEw3UjdxZFplWm5GU2prVzd2UElsaz1OamZTYkxHNEhORE5yWTIC>.
Tao J H, Bian J Y, Ao T Q, et al. Variation characteristics of precipitation and runoff in the water diversion and water-receiving area of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project [EB/OL]. (2021-12-07)[2022-05-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SZYB20211204000&v=MTYwODBaT3NQWxc5TXptUm42ajU3VDNmbHFXTTBDTEw3UjdxZFplWm5GU2prVzd2UElsaz1OamZTYkxHNEhORE5yWTIC>.

- [12] 汪易森, 陈斌. 南水北调东线一期工程山东段通水效益分析与认识 [J]. 中国水利, 2022 (9): 4-7.
Wang Y S, Chen B. Benefit analysis of water supply in Shandong section of Phase-I of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project and understanding [J]. China Water Resources, 2022 (9): 4-7.
- [13] 赵勇, 翟家齐, 王庆明, 等. 京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2021.
Zhao Y, Zhai J Q, Wang Q M, et al. Research and development integration and demonstration application of water resources security technology in Beijing-Tianjin-Hebei [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021.
- [14] 韩礼博, 门宝辉. 基于组合博弈论法的海河流域水资源承载力评价 [J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 61-64.
Han L B, Men B H. Valuation of water resources carrying capacity in Haihe River Basin based on combinatorial game theory [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 61-64.
- [15] 吴康, 王曼. 主体功能区视角下京津冀国土空间的增长与收缩格局分析 [J]. 城市与区域规划研究, 2020, 12(2): 183-199.
Wu K, Wang M. An analysis of spatial pattern of the growing and shrinking areas in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from the perspective of major function-oriented zones [J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2020, 12(2): 183-199.
- [16] 赵勇, 王庆明, 何凡, 等. 海河流域水治理战略研究 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2021.
Zhao Y, Wang Q M, He F, et al. Study on water control strategy in Haihe River Basin [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021.
- [17] 姜蓓蕾, 耿雷华, 吕良华, 等. 雄安新区用水变化分析及需水管理对策 [J]. 中国水利, 2021 (15): 29-31.
Jiang B L, Geng L H, Lyu L H, et al. Water usage analysis and water demand management measures in the Xiong'an New Area [J]. China Water Resources, 2021 (15): 29-31.
- [18] 王秦, 张艳, 杨永芳. 雄安新区资源环境承载力评价指标体系研究 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(5): 203-212.
Wang Q, Zhang Y, Yang Y F. Research of evaluation index system of resources and environment carrying capacity in Xiong'an New Area [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(5): 203-212.
- [19] 龚道孝, 莫耀, 刘曦, 等. “四水统筹、人水和谐”的雄安新区城市水系统建设标准研究 [J]. 给水排水, 2021, 47(11): 62-69.
Gong D X, Mo L, Liu X, et al. Urban water system from conception, methods to planning practice [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(11): 62-69.
- [20] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 67-74.
Wang F Q, Ma S Y, Zhao H, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on combined weights of AHP and entropy method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19 (1): 67-74.
- [21] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估 [J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 36-42.
Qin C H, Zhao Y, Li H H, et al. Assessment of regional water saving potential [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 36-42.
- [22] 李传哲, 崔英杰, 叶许春, 等. 白洋淀流域水资源演变特征与安全保障对策 [J]. 中国水利, 2021 (15): 36-39.
Li C Z, Cui Y J, Ye X C. Water resources change characteristics and water security safeguard strategy in the Baiyangdian Basin [J]. China Water Resources, 2021 (15): 36-39.
- [23] 杨薇, 孙立鑫, 王烜, 等. 生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1077-1084.
Yang W, Sun L X, Wang X, et al. Changes in ecosystem services in Baiyangdian Lake driven by environmental flow releases [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1077-1084.
- [24] 杨薇, 赵彦伟, 刘强, 等. 白洋淀生态需水: 进展及展望 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 294-308.
Yang W, Zhao Y W, Liu Q, et al. A systematic literature review and perspective on water-demand for ecology of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 294-308.