

变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战

夏 军^{1,2}, 陈 进^{1,3}, 余敦先^{1,2}, 骆文广^{1,2}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072; 2. 海绵城市建设水系统科学
湖北省重点实验室, 武汉 430072; 3. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430015)

摘要: 国家水网工程是应对气候变化、提高国家水安全保障一项重大战略部署。本文在分析中国气候、水土资源分布不均等地理特点基础上, 探究了变化环境下中国水资源供需关系, 分析了国家水网规划布局及典型水网成效, 探讨了国家水网规划建设中的亟待研究的若干问题和对策建议。研究表明: 全球变化影响愈来愈凸显; 国家进入高质量发展阶段, 人们对供水质量及保障程度、洪旱灾害防御能力等要求越来越高; 构建国家及区域水网是应对环境变化影响、显著提高供水灌溉保障程度和防洪排涝能力, 改善天然河湖水环境质量, 提高国家水安全保障的重大举措。但需要从区域“水—土—气—生”及“人—地”关系协调, 尊重自然, 做到人与自然和谐共生。加强国家水网规划建设和运行的科技和管理创新, 受水区不仅应该加强节水和水资源保护, 守住本地水资源的主体地位, 与外调水联合调度, 提高水网工程生态环境与经济发展综合效益, 支撑国家生态文明建设和高质量发展。

关键词: 气候变化; 水资源格局; 高质量发展; 国家水网; 水安全保障

DOI: 10.11821/dlxb202307003

1 引言

为了应对气候变化和人类活动双重影响, 提高国家水安全保障程度, 目前中国正在规划和建设现代国家水网工程体系。所谓水网工程是指基于流域内和跨流域的自然河湖水资源加上人工工程(调水工程、水库等)形成的满足经济社会发展和生态环境改善的水循环调控系统, 一般由流域内的“自然+人工”湖库河流水网系统, 以及跨流域/区域的“自然+人工”湖库河流水网系统组成。

20世纪以来, 由于受到日益凸显的全球气候变化和土地利用覆被(LUCC)变化的影响, 无论是全球、区域还是流域, 水循环都发生了不同程度的变化和变异^[1]。水网作为变化环境下具有自然与人工综合的重要工程系统, 逐渐参与到全球和区域包括跨流域水循环的调控和水资源的分配中, 在一定程度上对国家或地区社会经济发展和生态环境保护等方面产生了深刻影响, 也带来一些生态环境不利影响和运行管理等多方面的挑战。在全球变化加剧的大背景下, 加强全球变化水循环与水资源适应性的多学科交叉研究与实践, 对促进国家现代水网工程建设, 促进水资源合理分配、保障水资源安全和生态文明建设有重要价值和意义。

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-07-17

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XD23040304); 国家自然科学基金重大项目(41890823); 中国工程院院地合作项目(HB2023B14) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XD23040304; Major Project of National Natural Science Foundation of China, No.41890823; Chinese Academy of Engineering Cooperation Project, No.HB2023B14]

作者简介: 夏军(1954-), 教授, 中国科学院院士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

从世界范围来看,水网工程在促进不同国家或地区经济社会发展用水需求的合理分配以及水资源的均衡布局方面发挥着重要作用。以国外水网工程建设为例,美国加州北水南调工程的修建,使加州初步形成了一个较为完善的水资源调配系统,显著推动了干旱缺水的南加州地区经济的繁荣和社会的发展^[2];以色列通过构建国家智能水网工程,有效地解决了水资源格局与生产力布局不匹配的问题^[3];巴基斯坦的西水东调工程进一步完善了印度河平原的灌溉体系,极大地提高了国家的粮食产量^[4];此外,还有澳大利亚雪山调水工程、埃及横跨亚、非两大洲调水工程、加拿大的切尔齐赫尔和“詹姆斯湾”调水发电工程、印度的阿比斯调水、南非的莱索托高原调水工程以及秘鲁马赫斯东水西调工程等多个国家水网系统的成功实践^[5-6]。纵观国内水利发展历史,都江堰水利工程自先秦以来充分发挥其防洪、水资源的开发利用等功能,将四川打造成“水旱从人、不知饥馑”的“天府之国”^[7]。同样是先秦时修建的、素有“世界古代水利建筑明珠”之称的灵渠水利工程,它联结了湘江与漓江、贯通了长江和珠江两大水系,成为岭南与中原地区之间经济文化交流的战略要道^[8]。而贯穿南北长度大于1000 km的京杭大运河,作为中国水网工程的雏形,它连通了黄河、长江等五大水系,加强了黄河、长江两大流域文明发展,极大地促进了沿线贸易的发展和南北文化的交融^[9-10]。中国水利工程体系发展到今天,已初步形成了以“四横三纵”南水北调工程为主骨架和大动脉的国家水网框架以及水资源“南北调配、东西互济”的配置格局^[11]。

随着全球变化影响的深入,面对未来可能出现的水资源、水生态、水环境、水灾害等全局性水安全,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》面向服务国家重大战略,提出实施国家水网等重大工程^[12]。本文首先讨论在气候变暖及不确定性增加和国家不仅要保障粮食安全,而且人民要求不断提高生活质量和生态环境质量新要求条件下,中国水安全面临的形势^[13];然后根据水资源时空分布不均和水土资源空间不匹配等自然禀赋特点,介绍国家水网体系建设的总体格局和功能及取得的初步成绩;最后分析国家水网工程建设和运行对地理格局变化、生态环境影响、工程效益发挥等方面面临的科学和管理问题,从应用基础的科学研究和地理格局综合多角度,科学协调人与水、人与地、人与自然的关系,提出解决问题的对策建议。

2 变化环境影响下中国水安全面临的挑战

2.1 水土资源空间分布不均

中国是典型的季风气候区,1956—2010年平均降雨量648 mm,地表水(径流)量27375亿m³,地下水资源量8219亿m³,重复水量7182亿m³,水资源总量28412亿m³,但由于人口众多,中国人均水资源量仅2200 m³,仅为世界人均水资源量的28%,其中海河、淮河和黄河流域人均水资源量分别为293 m³、457 m³和647 m³,属于水资源严重短缺地区^[14]。

受季风和地理因素影响,中国水资源时空分布极不均衡,年际和年内变异性大^[15]。年际间,长江以南的中等河流最大与最小年径流量比值小于5,而北方河流该值多大于10;从汛期连续4个月径流量占年径流量比例看,长江以南及云贵高原以东河流值为60%左右,而长江以北河流则达80%以上,其中海河流域占比高达90%。再从水资源与耕地和经济社会发展来看,黄淮海以北的北方地区,人口占全国的47%,耕地占64%,GDP占45%,但水资源量仅占19%,长江及以南地区,人口占全国的53%,耕地占35%,GDP占55%,但水资源占81%,水资源与耕地及经济社会发展布局之间存在严重不相匹配现象。

2.2 气候变化带来的不确定性增加

IPCC 第六次评估报告 (AR6)《气候变化 2021: 自然科学基础》^[16]显示, 全球气候变暖趋势仍然持续, 其中 2020 年全球平均温度较工业化前水平 (1850—1900 年平均值) 升高 1.2 °C, 2011—2020 年是 1850 年以来最暖的 10 a, 其中亚洲地区陆表平均气温比常年平均值 (1981—2010 年气候基准期) 偏高 1.06 °C, 是 20 世纪初以来最暖的年份。2022 年 12 月世界气象组织 (WMO) 发布了首份《全球水资源状况报告》指出, 由于降水受到了气候变化和拉尼娜事件等因素的多重影响, 2021 年全球大部分地区比正常情况更加干燥, 从水资源角度看, 河道流量低于 30 a 平均水平的面积几乎是高于平均水平的面积的两倍, 说明气候变化显著增加了干旱等极端水文事件频率。根据《中国气候变化蓝皮书 2021》, 1951—2020 年中国地表年平均气温呈显著上升趋势 (0.26 °C/10a)。1901 年以来的 10 个最暖年份中有 9 个出现在 21 世纪, 从区域上看, 中国变暖最为显著的区域是西北、华北、东北和青藏高原。

已有众多证据表明, 气候变化必然会显著改变全球和区域水文循环的时空变化, 并发生低可能性、高影响结果的气候及水文事件的概率增大。2020—2040 年中国东部季风区水文极端事件 (水旱灾害) 发生的频率与强度有增强的态势, 但是不确定性也在增大^[17]。虽然中国年均降水量近百年来并未呈现显著的时间变化趋势, 但区域降水变化波动较大^[18], 1961—2018 年中国降水变化有明显的区域特征, 西部降水普遍呈增加趋势, 其中西北诸河、西南诸河和长江和黄河上游地区增加显著, 中国东部大部 (105°E 以东), 除长江下游外, 松花江、淮河南部、珠江东部和东南诸河年降水有增加趋势, 其他地区以减少趋势为主, 其中海河、黄河中下游、长江中游及珠江西部和西南诸河南部年降水量呈显著减少趋势。长江及其以南地区极端降水事件呈现频率增加、强度增强的趋势, 长江以北地区干旱事件的发生频率逐年增加^[19]。2020 年长江发生大洪水^[20], 仅两年后的 2022 年又发生严重的干旱^[21], 再次说明极端水文事件频繁有增加趋势, 未来气候变化必然会给水资源时空分布带来更大的不确定性。

2.3 人类活动影响和需求出现新要求

1949 年以后, 国家和地方为了解决粮食问题, 一方面扩大耕地面积, 另一方面修建了大量水库和灌溉工程, 显著提高了耕地的灌溉率和粮食产量。到 2020 年, 中国已建成各类水库 9.8 万多座、总库容 8983 亿 m³, 其中大型水库 744 座, 总库容 7150 亿 m³, 占总库容的 79.6%, 中型水库 3978 座, 总库容 1127 亿 m³, 占总库容的 12.5%。已建成 30 万亩 (1 亩≈666.7 m²) 以上大型灌区 7330 处, 农田有效灌溉面积达到 10.37 亿亩。目前中国的灌溉面积仅占耕地面积 54%, 却生产了中国 75% 的粮食和 90% 以上的经济作物^[22-23], 水利工程贡献巨大。在肯定成效的同时, 也存在以下问题: ① 土地资源有限性决定了不可能进一步扩大耕地面积, 过去耕地扩大也使中国森林和湖泊面积减少, 对生态环境造成了不利影响, 今后提高粮食保障程度必然是进一步提高农田灌溉保障率, 建设旱涝保收的高标准农田上。② 虽然修建的水库数量很多, 但大中型水库仅占 4.8%, 小型水库占到 95% 以上, 未来再兴建大中型水库难度极大, 尤其是移民安置和生态环境成本极高。目前大型水库建设移民安置平均成本已经超过工程建设成本, 而且能够修建大型水库的地方, 基本在人口较少的生态保护红线范围内, 修建高坝大库产生的生态环境影响较大, 未来只能通过已建水利工程与天然河湖的互联互通, 提高水系和水网的供水保障能力。③ 工业化、城镇化和农业化肥大量使用, 使许多湖泊和中小水库污染严重, 特别是城市附近湖库, 使城镇用水更加依赖水质较好的外来水 (也称客水), 水质良好的备用水源地缺乏。④ 随着生活水平提高, 人们更希望喝上高品质的水。过去华北等北方地区许多饮用水使用地下水, 矿化度较高, 甚至饮用高氟水或者微咸水, 现在通过南水北调工

程喝上优质的长江水。即使在长江流域,由于许多城镇附近水域质量不好,不得不修建大量引水和调水工程从长江或者附近山区水库引调水。

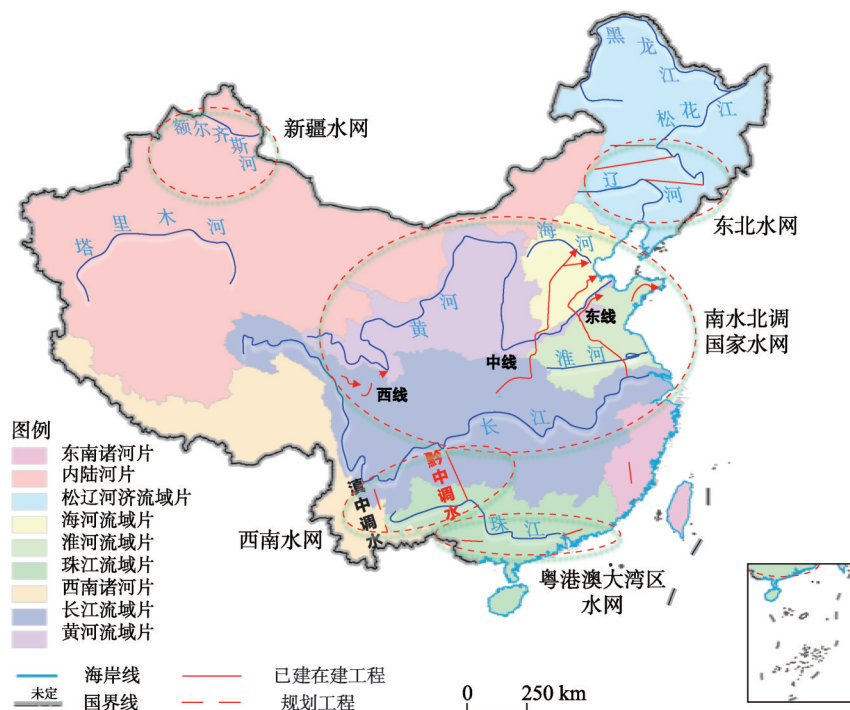
3 建设国家水网的布局及初步成效

3.1 国家水网总体布局

随着国家进入高质量发展阶段,应对气候变化和人类活动带来的不确定性影响,国家水安全保障战略基本思路是提高水系统的韧性,通过国家和区域水网建设,实现水系互联互通,优化水资源配置,支撑经济社会可持续发展。气候变化的不确定性必然使降水和自然河流来水在时间和空间分布更加不均匀,修建水库,特别是大型水库目的是调节水资源在时间分布不均问题,而调水工程主要是解决水土资源及经济社会发展空间分布不均问题,将自然水域和大型水库连成网,可以有效提高国家和区域供水保证率。

根据2023年5月印发的《国家水网建设规划纲要》,国家水网基本思路是以自然河湖为基础,引水、调水和排水工程为通道,调蓄工程(水库)为节点,智慧调控为手段,集水资源优化配置、流域防洪减灾、水生态系统修复和保护等功能于一体的综合体系,目标是“系统完备、安全可靠、集约高效、绿色智能、循环通畅、调控有序”。国家水网总体布局是以南水北调工程为骨干(纲),区域水网为分支(目),大中型湖库为节点,地方和城市水系连通为基础的工程体系(图1)。

中国地势西高东低,主要河流都是自西向东入海,而南北向除京杭大运河外,没有



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号的标准地图绘制,底图边界无修改。

图1 国家水网示意

Fig. 1 Schematic diagram of the national water network

其他水系，北方水少、南方水多，而耕地资源正好相反，所以，国家水网骨架是通过南水北调东、中、西线工程连通长江与黄河、淮河和海河，形成“三纵四横”总体格局，弥补“人—地”关系不协调矛盾。在区域水网方面，东北辽河是水资源利用程度较高，水环境压力突出河流；新疆、云南滇东、贵州黔中、重庆渝西、四川盆地等地区都是传统干旱缺水地区；粤港澳大湾区、北部湾和上海等长三角地区，经济社会发达，但临海，缺乏优质的淡水资源，所以，这些地区需要建设区域水网。在省市级区域，需要并与国家或者区域水网连接，构建直通水户—农田和城镇的地方和城市水网，作为水网工程体系的基础部分。

水网的主要功能包括供水与灌溉、防洪与排涝、水环境与水生态修复等，工程运行时一般采用多水源兼顾、多种功能综合利用，如南水北调中、东线一期工程基本功能是供水与灌溉，兼顾生态环境用水；淮海入海通道是以防洪与排涝为主，兼顾灌溉和生态环境用水；城市水网主要是供水和排涝，兼顾水环境和水景观改善等。

近期正在加快国家及区域水网工程建设，如南水北调东、中线后续工程、滇中引水、引汉济渭、引江济淮、粤港澳大湾区水资源配置等工程和南水北调西线和河北雄安干渠等重大工程的前期工作。在省级水网建设方面，水利部已经确定广东、浙江、山东、江西、湖北、辽宁、广西7个省（自治区）作为第一批省级水网先导区，谋划和实施好本地区水网建设任务，与国家水网建设布局重点任务有效衔接，国家已建和在建主要水网工程见表1所示。

表 1 截至 2022 年中国已建和在建主要水网工程(亿 m³)

Tab. 1 Major national water network projects (10 ⁸ m³)						
水网等级	工程名称	已建水量(一期)	在建水量(二期)	规划(远期)	合计水量	说明
国家水网	南水北调东线	89(包括北延工程)		148	148	
	南水北调中线	95	引江补汉 40	130	130	
	南水北调西线			170	170	
区域水网	引江济太	25			25	进入太湖 10
	引江济淮	5	5		10	
	引江济渭	10	5		15	
	滇中调水	26		9	35	
	黔中调水	5.5		1.91	7.41	
	鄂北调水	10	5		15	
	东北水网	呼玛河引水、引绰入辽、吉林中部引水、辽西北供水、大火房输水等				
	粤港澳大湾区水网	珠江西江大腾峡，珠江北江飞来峡和珠江东深输水等				
	环北部湾调水工程	涉及广西北海、玉林、贵港 3 市和广东湛江、茂名、阳江、云浮 4 市。通过水网连接城市与水库或者水源地				
	新疆水网	引额济乌、引额济克、艾比湖调水等				

3.2 典型水网工程成效

3.2.1 南水北调中线一期工程 南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月通水以来，已累计向北方受水区调水超 550 亿 m³（截至 2023 年 3 月），受益人口 8500 万人。工程沿线 20 多座大中城市、200 多个县市区用上了长江水，从根本上改变了受水区供水格局，改善了城市供水水质，受水城市的生活供水保证率由最低不足 75%提高到 90%以上，工业供水保证率也达到 90%以上。目前郑州中心城区 90%以上居民生活用水、北京市城区供水的 70%以上、天津主城区 95%以上为南水北调水，长江水已成为沿线大部分城市的供水生命线。河北省沧州、衡水、邯郸等地区，告别了长期饮用高氟水和苦咸水的历史。自

2017年开始,南水北调中线一期工程利用丹江口水库汛前腾库和汛期洪水,向沿线50余条河道及湖泊实施生态补水约90亿 m^3 ,华北地区地下水位稳步回升,许多过去已经干涸的洼、淀、河、渠、湿地等重现生机,显著地改善和恢复了河湖生态环境。

3.2.2 引江济太工程 引江济太工程是向太湖水系补水、改善水质和兼顾防洪的综合工程,已经运行20年^[24]。工程通过将长江水调入太湖并供给望虞河两岸地区,经太湖调蓄后,将太湖清水供给到太浦河下游及环太湖周边地区,加快湖湾水体交换和流动速度,提高了太湖水系水环境容量,提升了水资源供给水平,很大程度地改善太湖和河网水体水质。工程执行“以动治静,以清释污,以丰补枯,改善水质”的调度原则。通过骨干工程调度,将长江水引入太湖(流量为100~120 m^3/s),保持并适当抬高太湖和河网水位,增加了河网水系的水量,增强了平原河网地区水动力条件,明显加快了望虞河、太浦河沿线河网以及太湖贡湖水域的水体流动速度,受益地区河网流速由原来的0.1 m/s 提高到0.2~0.3 m/s ,减少了太湖的换水周期。引江济太工程实施引水后,由于进入望虞河的水量稳定且水质好,明显增加了望虞河的稀释能力和自净能力,此外,环湖周边河网的稀释能力和自净能力也随之逐步增加,太湖及河网水质得到不同程度的改善,受益面积最大可达2万 km^2 ,约占流域河网面积的2/3。通过实施“以丰补枯”,有效增加了太湖流域的水资源供给,保证了太湖流域生活、生产和生态用水需求^[24]。

3.2.3 牛栏江—滇池补水工程 云南滇池及滇东地区处于长江、珠江和红河三河分水岭区域,是传统的干旱缺水地区。1949—2010年滇池一直是昆明的“排污地”,加上流域严重的面源污染,使滇池从20世纪90年代起就发生严重的富营养化,1995—2015年20年间滇池水质一直处于劣V类。牛栏江—滇池补水工程主要目标是改善滇池水环境,兼顾昆明市应急供水功能。该工程由德泽水库枢纽、干河泵站和输水线路工程组成,输水是通过提水泵站从德泽水库提水,引至输水线路后,在通过自流至盘龙江,最后进入滇池。工程多年平均设计引水量5.72亿 m^3 ,向滇池补水5.66亿 m^3 。自2013年12月工程运行以来,对滇池水质提升、水环境改善、水生态修复发挥了重要作用。截至2021年8月,已累计向昆明补水40.01亿 m^3 ,其中昆明市应急供水2.80亿 m^3 ,向滇池补水37.21亿 m^3 。2020年滇池外海水水质有4个月达到IV类,草海有2个月达到III类,水质提升了两个等级。

3.2.4 多水源联合调度向大运河全线补水 京杭大运河是中国古代人工建造的伟大工程,具有防洪排涝、供水输水、内河航运、生态景观等功能。受自然演变和人类活动影响,自20世纪初以来,京杭大运河黄河以北河段水资源短缺问题十分严重,出现了有河皆干、有水皆污、河道断流、水环境污染等突出问题。2022—2023年水利部联合北京、天津、河北、山东四省份开展了京杭大运河全线贯通补水工作。补水水源分别来自南水北调东线北延工程、潘庄引黄、官厅水库、岳城水库、引滦工程、再生水及雨洪水6个水源,2023年再生水使用量从上年的0.72亿 m^3 提高到1.05亿 m^3 ,占总补水量(4.65亿 m^3)的22.6%,补水河道总长达1146 km,使京杭大运河黄河以北段(自北京市东便门至山东省聊城市位山闸)707 km全线贯通,实现大运河全线连续两年有流动的水,不仅推进了华北地区河湖生态环境复苏和地下水超采治理,也使运河沿线生态环境质量明显改善,助力了大运河文化遗产和保护。

以上前3个案例共同特点是通过引调水工程将长江与黄淮海、长江与太湖、长江与滇池连通,解决经济社会和生态环境用水问题,最后一个案例是通过国家和区域水网工程联合运行,将天然河水、水库水及再生水等多水源联合利用,成功构成了自然+人工水网系统联合调度。

4 中国水网工程建设需要解决的科学和管理问题

国家水网工程是一个复杂巨系统工程。为了科学规划、建设、运行和管理,提高水网工程的综合效率,减小对生态环境影响,仍然有许多科学和管理问题需要解决^[25],尤其需要在总结过去经验和教训基础上,加强科学观测及研究和工程管理体制机制创新,以下是国家水网工程建设和运行过程中需要解决的几个问题:

4.1 全球气候变化导致水循环变异趋势具有不确定性的问题

全球气候变化及发展趋势是目前科学研究的前沿和热点,气候变化导致水循环变异成因及极端程度存在不确定性,应对气候变化的全球协作及未来30~40年“双碳目标”能否实现,仍然具有较大的不确定性,需要加强观测、检测和归因分析。全球气候变化对中国区域气候和水文循环影响,特别是区域间水量变化对国家水网布局及调控带来诸多挑战。例如,目前中国西北部出现的暖湿化和黄淮海流域未来降雨量增加的预测是否可靠,给南水北调工程,特别是西线工程的设计及国家水网运行带来很大挑战,气候变化对全球及中国水文周期影响及南北区域间变异趋势及不确定性值得深入研究。

4.2 应该重视水网工程建设和运行对生态环境影响

水网工程虽然具有巨大的经济社会效益,但也会带来对水源区、工程沿线及受水区产生深远的生态环境影响,人工水网不能代替天然河湖巨大的生态环境功能,也不能显著改变国家整体气候、水文和地理特征,应该避免过度通过工程措施改变自然地理和环境状态。调水使水源区水资源量减少,河道内生态流量减少;工程建设需要穿越生态环境敏感区,损坏沿线森林植被和地貌环境,占用一些耕地;受水区在获得额外水资源的同时,也可能造成外来生物通过水流入侵或者改变受水区土地地球物理化学特性,等等。所以,水网工程建设和运行的生态环境影响需要长期监测和分析,如受水区地表与地下水循环及地球物理化学变化,水源区河流生态环境影响及人工渠道对附近区域地下水环境变化影响,水工程对自然河湖生态服务功能影响等,需要开展多学科的交叉研究,并采取综合措施减轻对自然河湖及沿线地区生态环境影响。

4.3 节水及水资源高效利用问题

通过水网工程提高缺水地区供水保障率十分必要,但调水总量改变不了中国水资源时空分布的整体格局,也不可能改变北方半干旱地区生态环境缺水的总体格局。受水区仍然要坚持节水优先,“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的“四定”基本原则,不能忽视本地水资源的主体地位。应该加强受水区水污染的治理和水源地的保护,维持本地水资源的主体地位。在节水前提下,开展南水北调后续工程建设,补齐区域水网,研究“水—土—气—生”及“人—地”关系协调的水土资源科学配置的理论,优化水网布局和联合调度技术。

4.4 协调提高粮食产量与保护土壤质量的矛盾

保障粮食自给率,不仅要求保住耕地红线,而且要求耕地是“良田”或者是“高标准农田”。需要提高农田灌溉保证率和排涝能力,解决农田灌溉“最后一公里”问题。但耕地长期灌溉和大量使用化肥,会造成土壤有机质流失、土壤质量下降、灌区水污染等问题,特别在干旱地区,长期灌溉,会使地下盐碱矿物质上升,使土壤出现盐碱化。

4.5 亟待完善如何提高水资源利用效益的机制

南水北调西线工程之所以尚未启动,除有一些工程技术问题有待解决外,重要的问题是长江上游水源区到底有多少可调水量?调入黄河上游后,与黄河水合为一体,两者水权水价如果确定等资源经济学问题。西线水源区海拔在2000~3000 m,调水不仅减少

长江水系水量,也给其下梯级水电站发电带来损失,而调入黄河上游的水会增加黄河梯级水电站的发电量,需要研究黄河受益区(包括水电站)如何给予长江上游水源区及利益受损者进行合理补偿。南水北调东线工程调水价格10倍于黄河水,而目前两者水质处于同一水平,受水区山东自然先使用已经分配的黄河水,然后再用长江水,这就是为什么东线调水量远小于中线工程的主要原因,所以,需要制定考虑水权、水价和利益补偿机制的水量分配方案,使受水区与水源区利益协调,研究实施跨流域调水工程补偿机制。

4.6 国家水网工程智慧管理与优化调控科技创新问题

水网一般由天然河湖和水库、渠道或者管道和受水端设施(自来水厂、田间等)组成,需要建立自然与人类取水、用水结合的气候、水文、用水、耗水和排水一体的监测、分析、评估及调度决策系统需要开展数字孪生流域、智慧水网工程调度、长江模拟器、元宇宙理念等技术研发^[26],推动国家水网工程智能运行和管理的科技创新。

5 结论及对策建议

根据中国水土资源禀赋,面对气候变化、人类活动及经济社会发展等变化环境影响,构建以自然河湖为基础,通过国家、区域和地方水网连通的人工水网工程体系,提高中国水安全保障,促进经济社会高质量发展是十分必要的,从已建工程运行情况看,虽然取得了显著成绩。但是,国家水网工程不仅耗资大,而且生态环境影响也大,迫切需要从“水—土—气—生”及“人—地”关系的协调发展出发,坚持以生态环境保护和绿色发展为目标,尊重自然,强调水土资源及生态安全的承载力的约束,避免过度干扰自然地理和生态环境,在维护天然河湖服务和生态功能基础上开展国家及区域水网工程建设和运行管理,使国家水网工程成为运行高效、管理先进,支撑国家高质量发展的国之重器。具体对策建议如下:

(1) 加强全球气候变化及21世纪“双碳”目标实现情况下,全球水循环变化机制及对中国水资源格局影响的科学研究,特别是不同排放情景下中长期气候和水文变化的监测、模拟、分析和预报研究。

(2) 基于全球和中国已建调水工程运行情况,分析水网工程对区域地理格局和生态环境机制和经验教训,提出减小中国水网建设和运行生态环境影响的措施。

(3) 根据区域水文地质和土壤特点,科学运用水网工程,避免“大水漫灌”灌溉方式,科学灌溉,推广喷灌、滴灌等节水灌溉技术,在保粮与保土之间取得平衡。加大非常规水利用,提高水资源利用效率。

(4) 强化多部门参与国家水网综合管理与协作机制,如系统监管跨部门、跨行业、跨领域、跨区域、跨省际、跨时空协作,创新水网工程建设和运行管理的体制和机制,拓展工程投融资渠道,完善水权、水价、利益补偿和生态补偿机制。

(5) 充分利用数字孪生和人工智能科技成果,加强水网工程与流域、城市防洪排涝调控结合,优化各级水网及大型控制性水库群多目标联合调度,在满足供水灌溉、防洪排涝基础上,开展多水源联合调控,向河湖生态补水,改善水环境和水生态。

参考文献(References)

- [1] Tang Qihong. Global change hydrology: Terrestrial water cycle and global change. Scientia Sinica: Terrae, 2020, 50(3): 436-438. [汤秋鸿. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(3): 436-438.]
- [2] Ouyang Qi, Zhang Yuandong. Water transfer projects in California. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(6): 1-12. [欧阳琪, 张远东. 加利福尼亚州水资源调配工程. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 1-12.]

- [3] Bao Shujun, Wang Jianhua, Liu Miao, et al. Trend and inspiration of international practice of intelligent water network. *China Water Resources*, 2012(21): 27-29. [鲍淑君, 王建华, 刘淼, 等. 智能水网国际实践动态及启示. *中国水利*, 2012(21): 27-29.]
- [4] Ben Keping. Water transfer project in history. *Science & Technology Information*, 2003(9): 17-18. [黄克平. 国际上大规模跨流域调水工程实例. *科技信息*, 2003(9): 17-18.]
- [5] Wang Long, Xu Houzhen. Overview of famous water transfer projects abroad. *Geography Teaching*, 2010(14): 4-7. [王龙, 徐厚臻. 国外著名的调水工程概览. *地理教学*, 2010(14): 4-7.]
- [6] Shen Ying, Mao Chunmei. The operation and management of inter-basin water diversion projects abroad and its inspiration to China. *Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(2): 391-394. [沈滢, 毛春梅. 国外跨流域调水工程的运营管理对我国的启示. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2): 391-394.]
- [7] Kuang Liangbo. A Legacy of history-Dujiangyan irrigation system: Values and protection. *China Flood & Drought Management*, 2018, 28(9): 72-76. [旷良波. 都江堰灌溉工程遗产体系、价值及其保护研究. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(9): 72-76.]
- [8] Li Yunpeng. Ling Channel system and its historical and cultural characteristics. *China Flood & Drought Management*, 2018, 28(7): 63-68. [李云鹏. 灵渠水利工程体系及其历史文化特征. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(7): 63-68.]
- [9] Tang Xiaofeng. How the Beijing-Hangzhou Grand Canal became an economic artery. *People's Tribune*, 2020(33): 110-112. [唐晓峰. 京杭大运河何以成为经济大动脉. *人民论坛*, 2020(33): 110-112.]
- [10] Liu Changming, Li Zongli, Wang Zhonggen, et al. Key scientific issues and research directions of the interconnected river system network. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 505-512. [刘昌明, 李宗礼, 王中根, 等. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向. *地理学报*, 2021, 76(3): 505-512.]
- [11] Guo Xuning, He Jun, Zhang Haibin, et al. Considerations on forming national water networks. *China Water Resources*, 2019(15): 1-4. [郭旭宁, 何君, 张海滨, 等. 关于构建国家水网体系的若干考虑. *中国水利*, 2019(15): 1-4.]
- [12] People's Government of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Outline of the Long-range Goals to 2035. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2021-03-13. [中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2021-03-13.]
- [13] Braga B, Chartres C, Cosgrove A, et al. *Water and the Future of Humanity: Revisiting Water Security*. New York: Springer Press, 2014. DOI 10.1007/978-3-319-01457-9.
- [14] Liu Changming, He Xiwu. *China's Water Strategy for the 21st Century*. Beijing: Science Press, 1996. [刘昌明, 何希吾. 中国21世纪水问题方略. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [15] Xia Jun, Zuo Qiting, Shi Wei. *Water Security and Future in China*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2019. [夏军, 左其亭, 石卫. 中国水安全与未来. 武汉: 湖北科技出版社, 2019.]
- [16] Zhang Jianyun. Impacts of climate change on national water security and mitigation strategies. *China Water Resources*, 2022(15): 3-5. [张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略. *中国水利*, 2022(15): 3-5.]
- [17] Jiang Tong, Sun Hemin, Li Xiucang, et al. Impacts of climate change on water cycle. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(3): 289-300. [姜彤, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化对水文循环的影响. *气象*, 2020, 46(3): 289-300.]
- [18] Xia Jun, Luo Yong, Duan Qingyun, et al. *Impacts of Climate Change on Terrestrial Water Cycle and Water Resources Security in the Eastern China Monsoon Region and Adaptation Strategies*. Beijing: Science Press, 2016. [夏军, 罗勇, 段青云, 等. 气候变化对中国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [19] Luo Yong, Jiang Tong, Xia Jun, et al. *Evolution and Causes of Terrestrial Water Cycle in China*. Beijing: Science Press, 2017. [罗勇, 姜彤, 夏军, 等. 中国陆地水循环演变与成因. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [20] Xia Jun, Chen Jin. A new era of flood control strategies from the perspective of managing 2020 Yangtze River flood. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51(1): 27-34. [夏军, 陈进. 从防御2020年长江洪水看新时代防洪战略. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 27-34.]
- [21] Xia Jun, Chen Jin, She Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1143-1153. [夏军, 陈进, 余敦先. 2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策. *水利学报*, 2022, 53(10): 1143-1153.]
- [22] Yang Guiyu, Wang Hao, Lyu Ying, et al. Analysis on the function of national water network construction to guarantee national food security strategy. *China Water Resources*, 2022(9): 34-37. [杨贵羽, 王浩, 吕映, 等. 国家水网建设对保障国家粮食安全战略作用研究. *中国水利*, 2022(9): 34-37.]
- [23] Zhang Mingdou, Weng Aihua. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization

- efficiency in the Yangtze River Economic Belt. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2353-2373. [张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制. *地理学报*, 2022, 77(9): 2353-2373.]
- [24] Wu Haoyun, Gan Yueyun, Jin Ke. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021: Practices, achievements and future challenges. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1393-1412. [吴浩云, 甘月云, 金科. “引江济太”20年: 工程实践、成效和未来挑战. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1393-1412.]
- [25] Xia J. Climate change impact on water security & adaptive management in China. *Water International*, 2012, 37(5): 509-610.
- [26] Xia Jun, Zhan Chesheng, Zeng Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(5): 505-514. [夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索. *水利学报*, 2022, 53(5): 505-514.]

Opportunities and challenges of national water network construction under changing environment

XIA Jun^{1,2}, CHEN Jin^{1,3}, SHE Dunxian^{1,2}, LUO Wenguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China;

3. Yangtze River Academy of Sciences, Changjiang Water Resources Commission
of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430015, China)

Abstract: The national water network project is a major strategic deployment in the 14th Five-Year Plan (2021-2025) and the Outline of the 2035 Vision Goals. However, under the influence of global changes, it is facing new opportunities and challenges. Based on the analysis of the background of climate, geography and economic and social development and the characteristics of unbalanced distribution of soil and water resources, this paper has completed three research works. It studies the relationship between supply and demand of water resources in the changing environment. Then it analyzes the planning and layout of the national water network and the effectiveness of the typical water network. Finally, some problems and countermeasures in the planning and construction of the national water network are discussed. Research shows that the impact of global change is more and more prominent. As the country enters the stage of high-quality development, people have higher requirements on the quality and guarantee of water supply. Moreover, the construction of national and regional water networks is an important measure to cope with the impact of environmental change and improve national water security. The construction of the national water network can significantly improve the guarantee of water supply and irrigation, flood control and drainage capacity, and enhance the quality of natural river and lake water environment, but it still has room for optimization and improvement. We need to coordinate regional "water-soil-air-gas" and "man-land" relations, strengthen scientific and technological innovation in the construction of the national water network, improve the comprehensive benefits of ecological environment and economic development of the project, and support the construction of national ecological civilization and high-quality development.

Keywords: climate change; water resources pattern; high-quality development; national water network; water safety assurance