

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.002

# 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置

王煜<sup>1</sup>, 周翔南<sup>2</sup>, 彭少明<sup>2</sup>, 武见<sup>2</sup>, 明广辉<sup>2</sup>, 郑小康<sup>2</sup>

(1. 黄河水利委员会, 河南 郑州 450003; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 南水北调西线一期工程生效后黄河流域水量分配模式决定了黄河流域水资源配置格局重塑和南水北调西线工程供水效益评价, 为国家水网构建提供重要技术支撑。考虑西线供水范围可覆盖黄河主要供水区的特点, 西线调入水量应与黄河流域水资源统一配置, 考虑生态优先、公平为主兼顾效率的原则, 构建了流域用水分级配置方法, 建立了基于流域水资源均衡调配的西线调入水量配置模式, 开展了不同情景优化配置方案研究。结果表明: 南水北调西线一期工程调水 80 亿 m<sup>3</sup>, 配置给黄河河流生态用水 33.70 亿 m<sup>3</sup>, 配置给流域河道外经济社会用水 46.30 亿 m<sup>3</sup>, 其中 95% 以上配置给黄河上中游地区, 流域缺水率降低至 7.0% ~ 8.3%。优化配置方案体现了生态优先原则, 保障了黄河河道内基本生态环境用水, 均衡了河道外经济社会用水的公平和效率, 有效缓解了流域缺水。

**关键词:** 生态优先; 均衡调配; 南水北调西线; 黄河流域

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)03-0336-13

大规模跨流域调水工程被世界各国用来解决人口增长和气候变化情况下流域或区域水资源短缺问题<sup>[1-5]</sup>, 跨流域调水量与供水流域或区域的各种水资源耦合构成了复杂的水资源系统, 开展本地水和外调水联合水资源优化配置对于供水流域或区域社会经济和生态环境可持续发展具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。南水北调西线工程是中国“四横三纵”国家水网的重要组成部分, 西线调入水量和黄河流域水资源量如何进行联合调配, 如何在满足流域生态需水的前提下实现水资源利用的公平和效益最大化, 是西线工程论证中亟需研究解决的重大问题, 将直接影响西线工程的功能定位、筹融资方式和水价制定机制等立项决策。

跨流域调水工程是一个涉及多水源、多地区、多目标的高维、复杂的大系统工程, 一些学者围绕跨流域水资源配置的目标、模型、求解算法、合理性等进行了研究。李红艳<sup>[6]</sup>根据调水工程供水目标, 设计了初始水权分配指标体系, 引入多目标多层次模糊优选算法求解, 基于水资源承载能力分析跨流域调水的合理性; 王浩等<sup>[7]</sup>、彭少明等<sup>[8]</sup>研究了不同阶段水资源系统优化配置模式, 基于泛流域概念建立了具有 3 层结构的泛流域多维尺度优化模型, 提出了西线工程适宜的调水规模、工程布局及调水量空间合理分配方案; 赵勇等<sup>[9]</sup>通过设定调水工程最优运行的目标和相关约束实现对水资源的时空和用户分配, 建立水量调配仿真系统和调度模型并采用模糊数学理论将多目标函数转化为单一目标函数求解; 游进军等<sup>[10]</sup>针对两部制水价运行管理机制, 提出了符合实际管理需求的两阶段补偿式外调水配置算法, 实现本地水和外调水的联合配置; 张弛等<sup>[5]</sup>针对跨流域调水工程的实时调度决策问题, 考虑受水水库的供水效益与引水成本, 建立了受水水库实时调度的理论分析框架; 董增川等<sup>[11]</sup>针对传统多目标决策方法难以刻画流域水资源系统调度周期

**收稿日期:** 2022-12-16; **网络出版日期:** 2023-04-14

**网络出版地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230413.2124.005.html>

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202305)

**作者简介:** 王煜(1968—), 男, 河南开封人, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域水利规划、水资源配置研究。

E-mail: 757101915@qq.com

**通信作者:** 彭少明, E-mail: pengshming@163.com

内多目标互馈关系及需求动态变化,构建了流域水资源调度多目标时变偏好决策方法并在金沙江下游进行应用;王煜等<sup>[12]</sup>提出了基于水-沙-生态多因子的黄河流域水资源动态配置机制和“保存量、分增量”的动态配置思路。与南水北调东线工程、中线工程具有独立的输水系统和供水分配体系不同,南水北调西线工程调水进入黄河后没有独立的供水分配体系,西线工程调水如何分配、和黄河流域水资源的分配关系等都是西线工程论证中亟需研究解决的重大问题。对黄河流域而言,黄河“八七”分水方案明确规定了黄河流域水资源调配的基本原则和分配方案,针对已有分水方案的调入流域,如何考虑外调水和本流域水资源联合优化整体配置研究尚需要深化。

黄河流域是中国水资源问题最为尖锐复杂的流域之一,近年来在变化环境影响下,黄河流域天然径流量持续减少,用水需求不断增长,导致供需失衡形势日趋严峻<sup>[13-14]</sup>。缺水流域水资源供需矛盾日益尖锐,区域之间和行业之间用水竞争更加激烈,需要在用水效率和公平之间做出权衡,水资源调配难度极大<sup>[15-17]</sup>。随着水资源调配理论与技术的发展,水资源综合价值和用水公平被用于引导流域水资源均衡调配<sup>[18-20]</sup>,一些研究通过权重、统一度量标准等方法建立单一的水资源价值目标<sup>[21-23]</sup>,或者通过分析不同价值权衡关系为决策者提供决策偏好选择最优调控方案<sup>[24-25]</sup>。目前缺水流域水资源调配理论和方法研究已取得一定成果,但在水资源配置中用水公平性考虑不足,针对缺水流域公平为主兼顾效率的水资源调配理论和技术还有待研究。

本文拟开展公平为主兼顾效率的南水北调西线生效后黄河流域水量分配模式研究,基于未来黄河流域水资源供需总体格局和分区供需状况,建立生态优先、公平为主兼顾效率流域水资源分级配置方法,研发考虑南水北调西线调入水量的黄河流域水资源整体优化配置模型,提出新形势下黄河流域水资源优化配置方案,并解析出西线调入水量的配置方案。

## 1 研究范围和主要数据

### 1.1 研究范围

黄河流域最大的矛盾是水资源短缺。流域人均水资源量为全国的23%,农田灌溉用水定额不足全国的15%。以占全国2%的水资源量,承担着全国15%的耕地面积和12%人口的供水任务,同时还向流域外供水约100亿 $\text{m}^3$ 。现状流域内国民经济发展用水受到抑制,缺水问题严重,4000万亩农田得不到充分灌溉,大量能源项目由于缺水而难以落地,国家粮食安全和能源安全受到严重威胁。规划的南水北调西线工程是从长江上游调水入黄河上游、缓解黄河流域水资源严重短缺形势的跨流域调水工程,是中国“四横三纵”水资源配置战略的重要组成部分,是落实黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的重要支撑。目前,西线一期工程推荐上下线组合方案,即上线雅砻江、大渡河干支流联合调水40亿 $\text{m}^3$ ,下线大渡河双江口调水40亿 $\text{m}^3$ ,共调水80亿 $\text{m}^3$ 。黄河流域干支流关键断面及跨流域调水工程见图1。

### 1.2 主要数据

(1) 天然径流量。采用全国水资源第三次调查评价成果,即1956—2016年系列。兰州、河口镇、三门峡、花园口、利津等5个关键断面平均天然径流量分别为323.97亿、307.41亿、435.38亿、484.22亿、490.04亿 $\text{m}^3$ 。

(2) 经济社会需水量。采用分层需水预测方法<sup>[26]</sup>,刚性需水包括满足人类生活、生物生存、企业开工生产、河湖基本健康所需要的基本水量,刚性需水是指提高生活品质、满足粮食消费需求、发展工业和塑造适宜生态环境所需的水量,弹性需水是指维持生活中的弹性消费、高耗水产业和人工营造高耗水景观所需的水量。预测2030年黄河流域河道外需水总量为534.6亿 $\text{m}^3$ ,如表1所示,其中,刚性需水量为321.62亿 $\text{m}^3$ ,占总需水量的60.2%;刚性需水量为208.15亿 $\text{m}^3$ ,占总需水量的38.9%;弹性需水量为4.85亿 $\text{m}^3$ ,占总需水量的0.9%。分行业来看,生活需水65.22亿 $\text{m}^3$ 全部为刚性需水;工业需水为110.41亿 $\text{m}^3$ ,其中刚



图1 黄河流域关键断面及跨流域调水工程示意

Fig.1 Schematic diagram of key hydrological control transects and inter-basin water transfer projects in the Yellow River basin

性需水和刚弹性需水占比分别为63.9%和36.1%；农业需水为334.33亿 $m^3$ ，其中刚性需水、刚弹性需水和弹性需水占比分别为48.2%、50.3%和1.5%；生态需水24.66亿 $m^3$ 全部为刚性需水。分省区来看，各省区刚性需水占比为46%~90%；刚弹性需水占比为10%~54%；弹性需水本次仅考虑内蒙古农业需水4.85亿 $m^3$ ，占比5%。详见图2及表1。由此可见，黄河流域国民经济需水具有较大的刚性特征和分层需求规律，在流域水资源优化配置时可以针对不同层次需水制定分级配置策略。

表1 2030年黄河流域经济社会需水分层预测结果

Table 1 Hierarchical economic and social water demand in the Yellow River basin in 2030 单位：亿 $m^3$ 

| 省区  | 生活    |    | 工业    |       | 农业     |        |      | 生态    |        | 需水总量   |      |        |
|-----|-------|----|-------|-------|--------|--------|------|-------|--------|--------|------|--------|
|     | 刚性    | 弹性 | 刚性    | 弹性    | 刚性     | 弹性     | 弹性   | 刚性    | 弹性     | 弹性     | 合计   |        |
| 青海  | 2.69  |    | 3.90  | 1.41  | 8.51   | 8.79   | 0    | 1.61  | 16.71  | 10.20  | 0    | 26.91  |
| 四川  | 0.03  |    | 0.01  | 0     | 0.40   | 0.05   | 0    | 0.01  | 0.45   | 0.05   | 0    | 0.50   |
| 甘肃  | 9.80  |    | 8.17  | 10.18 | 12.15  | 19.72  | 0    | 1.55  | 31.67  | 29.90  | 0    | 61.57  |
| 宁夏  | 3.49  |    | 4.47  | 4.35  | 29.34  | 43.00  | 0    | 3.31  | 40.61  | 47.35  | 0    | 87.96  |
| 内蒙古 | 5.55  |    | 10.12 | 4.67  | 42.02  | 31.73  | 4.85 | 6.29  | 63.98  | 36.40  | 4.85 | 105.23 |
| 陕西  | 17.77 |    | 16.63 | 7.30  | 29.37  | 23.00  | 0    | 2.75  | 66.52  | 30.30  | 0    | 96.82  |
| 山西  | 11.64 |    | 10.66 | 6.91  | 18.04  | 17.94  | 0    | 3.46  | 43.80  | 24.85  | 0    | 68.65  |
| 河南  | 9.64  |    | 11.85 | 2.76  | 16.03  | 17.19  | 0    | 4.44  | 41.96  | 19.95  | 0    | 61.91  |
| 山东  | 4.61  |    | 4.71  | 2.31  | 5.36   | 6.84   | 0    | 1.24  | 15.92  | 9.15   | 0    | 25.07  |
| 合计  | 65.22 |    | 70.52 | 39.89 | 161.22 | 168.26 | 4.85 | 24.66 | 321.62 | 208.15 | 4.85 | 534.62 |

(3) 流域地下水供水量。采用《黄河流域水资源综合规划报告(2012—2030年)》(以下简称黄流规)成果，即黄河流域地下水基本实现采补平衡，维持125亿 $m^3$ 左右供水量，见表2。

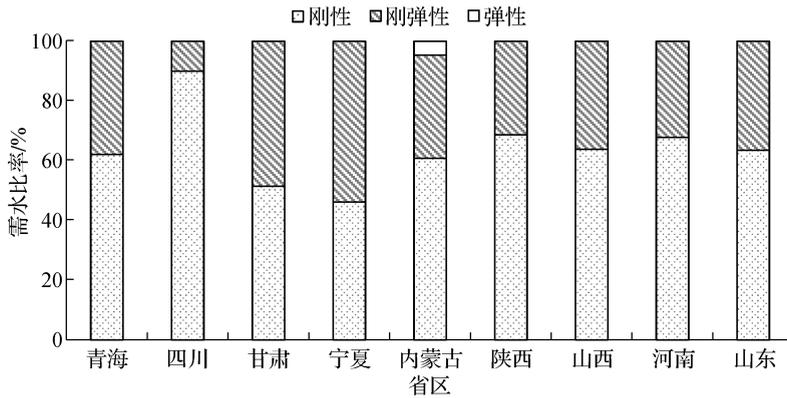


图2 黄河流域各省区需水分层占比

Fig.2 Hierarchical water demand ratios of 9 provinces in the Yellow River basin

表2 黄河流域各省区地下水供水量

Table 2 Groundwater supply of 9 provinces in the Yellow River basin

单位: 亿  $m^3$ 

| 省区  | 青海   | 四川   | 甘肃   | 宁夏   | 内蒙    | 陕西    | 山西    | 河南    | 山东    | 合计     |
|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 供水量 | 3.26 | 0.02 | 5.68 | 7.68 | 25.08 | 29.51 | 21.06 | 21.55 | 11.44 | 125.28 |

(4) 用水效率。根据《水利建设项目经济评价规范: SL 72—2013》, 工业供水效益分摊系数以供水项目费用占供水范围内整个工矿企业生产费用的比例确定。本次的工业供水效益分摊系数在参考以往典型工程经济分析成果的基础上采用1.5%。参考《人民治理黄河70年灌溉效益分析》<sup>[27]</sup>, 并综合近期流域内典型项目效益分析成果, 农田灌溉用水效益分摊系数各省统一采用0.5。采用黄河流域各省区统计年鉴(2012—2018年)及黄河水资源公报(2012—2018年), 测算工农业产值、工农业用水量, 分析确定各省区农业和工业用水单方水效益, 如表3所示。

表3 黄河流域各省区单方水效益

Table 3 Water supply benefit per 1  $m^3$  water of 9 provinces in the Yellow River basin单位: 元/ $m^3$ 

| 行业 | 青海    | 四川    | 甘肃    | 宁夏    | 内蒙古   | 陕西    | 山西    | 河南    | 山东    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 农业 | 0.69  | 0.63  | 1.08  | 0.65  | 1.36  | 1.96  | 2.91  | 3.42  | 1.79  |
| 工业 | 18.84 | 18.34 | 22.09 | 20.61 | 23.47 | 24.42 | 20.78 | 23.46 | 25.10 |

(5) 河流生态需水量。根据黄流规, 在南水北调西线一期调水工程生效后, 入海水量应达到210亿  $m^3$ , 保证基本的河道内生态环境水量, 维持河口地区生态系统及用水要求, 使河口地区生态系统得以良性维持。此外, 根据《黄河流域(片)河湖生态水量(流量)研究》等成果, 确定黄河干流兰州、河口镇、花园口和利津4个关键断面生态基流分别为350、150、200和50  $m^3/s$ , 并考虑主要支流入黄断面生态基流要求。

(6) 水库及调水工程。干支流水库考虑已建的龙羊峡、刘家峡、万家寨、三门峡、小浪底等干流骨干工程及规划的古贤水利枢纽。跨流域调水工程考虑西线一期工程上线和下线调水量共80亿  $m^3$ , 引汉济渭调水量10亿  $m^3$ , 引红济石0.9亿  $m^3$ , 引乾济石0.47亿  $m^3$ 以及南水北调东线向山东供水1.26亿  $m^3$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 总体思路

1987年国务院批准的黄河可供水量分配方案(“八七”分水方案)确定了黄河水量分配的基本格局, 明确了河流生态用水和沿黄各省区经济社会用水量<sup>[28-29]</sup>。以此为基础, 黄流规确定了新的黄河径流条件下黄河

分水方案,这是国家层面确定的黄河流域水权分配,这也是黄河流域水量再分配的基础。

为解决中国水资源时空分布极不均衡的问题,中国正在加快构建以南水北调为主骨架和大动脉的国家水网工程,大力推进南水北调后续工程的高质量发展。南水北调西线工程是中国“四横三纵”国家水网的重要组成部分,从长江上游支流大渡河、雅砻江、金沙江调水进入黄河上游地区,是解决黄河上中游地区和临近的石羊河流域水资源短缺的重大工程。根据有关规划,南水北调西线一期工程调水80亿 $m^3$ ,占黄河现状天然径流量的16.3%,将大大改变黄河流域水源条件。西线调水在黄河源头地区进入干流和黄河径流混合,经过龙羊峡、刘家峡、大柳树、古贤、三门峡和小浪底等干流骨干水库群调节,供水范围可覆盖黄河主要供水区域。区别于南水北调东线和中线等其他调水工程,西线工程调水进入黄河后没有独立的供配水系统,而是利用和扩展黄河供水系统,因此,西线调入水量应和黄河流域水资源统一调节、配置和利用。根据黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略确定的基本原则,黄河流域水资源调配需要遵循生态优先、绿色发展的原则,保证河流基本生态用水要求;基于黄河流域经济社会用水的刚性属性,经济社会用水分配应遵循公平为主兼顾效益的原则,进行均衡配置。

基于以上分析,西线调入水量配置模式应统筹考虑生态、公平和效益,对黄河流域水资源和调入水量进行统一配置,以国家批准的黄河分水方案为基础,据此确定西线调入水量配置方案。

## 2.2 生态优先、公平为主兼顾效率的流域用水分级配置方法

在有限的水资源条件下,按照生态优先的原则,首先满足河道内基本生态用水,再根据天然径流量,确定流域向河道外供水量的上限:

$$S_{\max}(t) = A_v(t) - E(t) \quad (1)$$

式中: $S_{\max}(t)$ 为流域向河道外供水的上限; $A_v(t)$ 为考虑水库群调节后的流域可供水量; $E(t)$ 为河流基本生态用水。

水资源均衡调控是通过统筹兼顾流域内区域及行业间用水效率及用水公平性,实现水资源的可持续利用与生态环境系统良性维持<sup>[22]</sup>。引入福利经济学理论,以流域水资源综合价值为驱动,以用水公平协调性为导向,定义可权衡经济社会用水公平与效率的均衡参数,建立统筹公平与效率的流域水资源社会福利函数:

$$F(x) = F_v^\alpha(x) F_E^{1-\alpha}(x) \quad (2)$$

$$X = \{x \in R^n; g_l(x) \leq 0, l = 1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

$$S(t) = \sum x \leq S_{\max}(t) \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 为水资源调控效果的表征函数; $F_v(x)$ 为流域用水效率表征函数,用各个省区水资源利用效益最大表示; $F_E(x)$ 为流域用水公平协调性表征函数,用不同省区和不同行业满意度的基尼系数表示; $\alpha$ 为均衡参数,取值范围为0~1; $x$ 为待优化的分配水量, $X$ 为 $x$ 的集合; $R^n$ 为 $n$ 维实数; $g_l(x)$ 为水资源分配过程中需要遵守的第 $l$ 个约束条件; $S(t)$ 为流域经济社会用水总量。

黄河流域经济社会水资源配置应考虑需水分层和刚性为主的特征,以流域水资源社会福利最大化为目标,建立公平为主兼顾效率的流域经济社会分级配置方法。以水资源效益梯度引导水资源向效益高的用户分配,以用水基尼系数引导水资源向各区域和部门均等程度供水以追求用水公平,不同层次需水选取不同的均衡参数以体现不同的配置策略。对黄河流域而言,需水以刚性为主,流域水资源配置遵循公平为主兼顾效率。

对于占黄河流域经济社会需水59.7%的刚性需水,第一顺序优先满足, $\alpha$ 取值为0,此时流域水资源社会福利函数为: $\max F(x) = F_E^{1-\alpha}(x)$ ,即遵循公平原则进行配置,优先保障最基本的生活、生产、生态用水,追求用水的公平性。

对于占黄河流域经济社会需水37.4%的刚弹性需水,第二顺序满足, $\alpha$ 取值为(0,1),刚弹性需水的配置目标为: $\max F(x) = F_v^\alpha(x) F_E^{1-\alpha}(x)$ ,根据兼顾效率与公平的原则,追求水资源在不同区域和部门配置的合理权衡。

对于占黄河流域经济社会需水2.9%的弹性需水,第三顺序满足, $\alpha$ 取值为1,弹性需水的配置目标为:

$\max F(x) = F_V^\alpha(x)$ , 遵循效率优先原则, 将水资源优先配置给综合效益高的区域和部门, 追求用水效益的最大化。

### 2.3 基于流域水资源均衡调配的西线调入水量配置模式

西线工程调入水量和黄河流域水资源统一调配, 基于上述生态优先、公平为主兼顾效率的流域用水分级配置和均衡配置方法, 得到黄河流域水资源优化配置方案, 并和南水北调西线生效之前黄河流域水资源配置方案相比, 确定西线调入水量配置方案。

西线调入水量( $A_{wl}(k)$ )配置方案由西线工程生效后的河流生态(入海水量)和省区配置水量与西线工程生效前的配置水量相减得到:

$$A_{wl}(k) = A_F(k) - A_B(k) \quad (5)$$

$$A_B(k) = \frac{W_n}{W_p} A_p(k) \quad (6)$$

式中:  $k$  为分水方案涉及的配置单元个数, 包括河流生态水量控制断面和流域省区;  $A_F(k)$  为基于上述优化方法确定的南水北调西线生效之后黄河流域优化配置方案;  $A_B(k)$  为新径流条件下南水北调西线生效之前黄河流域配置方案;  $A_p(k)$  为依据黄流规提出的南水北调西线生效前流域水资源配置方案, 并根据新径流条件按照同比例调整原则确定;  $W_n$  为本次研究采用的 1956—2016 年系列黄河流域多年平均天然径流量 490 亿  $m^3$ ;  $W_p$  为黄流规采用的 1956—2000 年系列黄河流域多年平均天然径流量 519.8 亿  $m^3$ 。

## 3 流域用水分级配置模型

### 3.1 模型构建

生态优先、公平为主兼顾效率的流域用水分级配置模型包括刚性需水配置模型、刚弹性需水配置模型和弹性需水配置模型等 3 级模型。

(1) 刚性需水配置模型。流域刚性需水追求公平配置, 目标函数为

$$F = \max\{F(x_{r_{i,k}})\} = \max\{F_E^\alpha(x_{r_{i,k}})\} \quad (7)$$

式中:  $F(x_{r_{i,k}})$  为流域水资源社会福利函数;  $F_E(x_{r_{i,k}})$  为流域用水公平表征函数;  $x_{r_{i,k}}$  为第  $k$  个分区第  $i$  个行业的刚性需水对应的供水量,  $i=1 \sim 6$ ,  $k=1 \sim 9$ 。

主要约束条件包括供需关系约束、河段水量平衡约束、分区入流断面水量约束等<sup>[18]</sup>, 以及黄河干流主要断面基本生态用水约束:

$$x_{e_m} \geq d_{e_m} \quad (8)$$

并需要考虑刚性需水供水量约束:

$$\sum \sum x_{r_{i,k}} \leq S_{\max} \quad (9)$$

式中:  $x_{e_m}$  为  $m$  断面生态用水量;  $d_{e_m}$  为  $m$  断面基本生态需水量,  $m=1 \sim 4$ ;  $S_{\max}$  为流域经济社会最大供水量。

(2) 刚弹性需水配置模型。刚弹性需水追求公平与效率均衡配置, 目标函数为

$$F = \max\{F(x_{re_{i,k}})\} = \max\{F_V^\alpha(x_{re_{i,k}}) F_E^{1-\alpha}(x_{re_{i,k}})\} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

式中:  $x_{re_{i,k}}$  为第  $k$  个分区第  $i$  个行业的刚弹性需水对应的供水量,  $i=1 \sim 6$ ,  $k=1 \sim 9$ 。

除了以上约束条件, 还需要考虑刚弹性需水供水量约束:

$$\sum \sum x_{re_{i,k}} + \sum \sum x_{r_{i,k}} \leq S_{\max} \quad (11)$$

(3) 弹性需水配置模型。弹性需水追求效率优先配置, 目标函数为

$$F = \max\{F(x_{e_{i,k}})\} = \max\{F_V^\alpha(x_{e_{i,k}})\} \quad (12)$$

式中:  $x_{e_{i,k}}$  是第  $k$  个分区第  $i$  个行业的弹性需水对应的供水量,  $i=1 \sim 6$ ,  $k=1 \sim 9$ 。

除了以上约束条件,还需要考虑弹性需水供水约束:

$$\sum \sum x_{e_{i,k}} + \sum \sum x_{re_{i,k}} + \sum \sum x_{f_{i,k}} \leq S_{\max} \quad (13)$$

### 3.2 模型求解

流域水资源分级配置求解流程如下:

(1) 求解刚性需水配置模型。河流基本生态用水量全部满足,据此确定流域经济社会可供水量。考虑水库群调节,以追求各单元刚性需水的用水配置公平性为目标,在流域经济社会年度可供水量大于流域刚性需水时,刚性需水全部满足;在流域年度可供水量小于刚性需水时,各计算单元的刚性需水缺水率一致,由此确定各个计算单元的刚性需水供水。

(2) 求解刚弹性需水配置模型。考虑水库群调节,以水资源社会福利函数最大为目标,统筹各单元刚弹性需水的用水配置公平性和效益。在流域可供水量减去刚性需水的供水大于刚弹性需水时,刚弹性需水全部满足;在流域可供水量减去刚性需水的供水小于刚弹性需水时,刚弹性需水部分被满足。

(3) 求解弹性需水配置模型。以追求各单元弹性需水的用水效益为目标,在流域可供水量减去刚性需水的用水配置和刚弹性需水的用水配置大于弹性需水时,弹性需水全部满足;在流域可供水量减去刚性需水的用水配置和刚弹性需水的用水配置小于弹性需水时,弹性需水部分被满足,按照用水效率最高进行优化配置。

水资源供需网络模拟基于网络流优化方法,根据优化后的供水规则,模拟长序列水库群调度和流域各用水单元的需-供-耗-排水过程。流域经济社会可供水量由黄河流域供需网络模拟模型计算得到。针对上述不同的目标函数,将各分区各行业的供水及河道内主要断面下泄水量作为求解变量,采用带线性约束条件及精英策略的改进遗传算法进行迭代求解。

## 4 情景方案研究

运用上述方法和模型,考虑南水北调生效前和一期工程生效后的多个情景方案,研究提出西线一期调水后黄河流域水资源优化配置方案和西线一期工程配置方案。

### 4.1 方案设置

考虑设置4个方案,包括基准方案和西线一期工程生效3个情景方案。

(1) 基准方案。黄流规确定了南水北调东、中线工程生效后至南水北调西线一期工程生效以前的黄河地表水耗水量配置方案,见表4中黄流规方案。按照本次采用的天然径流量490.04亿 $m^3$ 与黄流规中519.79亿 $m^3$ 的关系进行同比例调整,确定南水北调西线生效前黄河地表水耗水量分配方案,河道外各省区配置水量为313.74亿 $m^3$ ,河道内配置水量为176.30亿 $m^3$ ,详见表4中基准方案。

表4 西线生效前不同径流条件下的黄河地表水耗水量配置方案

Table 4 Allocation scheme of surface consumed water of the Yellow River basin under different runoff sceneries before the operation of Western Route Project

| 方案对比  | sceneries before the operation of Western Route Project |      |       |       |       |       |       |       |       |      | 单位: 亿 $m^3$ |
|-------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
|       | 青海  | 四川   | 甘肃    | 宁夏    | 内蒙    | 陕西    | 山西    | 河南    | 山东    | 河北   | 河道内         |
| 黄流规方案 | 13.16   | 0.37 | 28.37 | 37.32 | 54.68 | 35.46 | 40.22 | 51.69 | 65.32 | 6.20 | 187.00      |
| 基准方案  | 12.41   | 0.35 | 26.75 | 35.18 | 51.55 | 33.43 | 37.92 | 48.73 | 61.58 | 5.85 | 176.30      |

(2) 方案1。西线调水80亿 $m^3$ 进入黄河上游地区。调水后河北、天津分水指标与基准方案保持一致,其发展用水由南水北调东线和中线解决。西线调水量和黄河流域水资源统一配置,按照上述方法和模型优化分配给河流生态用水和其他省区经济社会用水。

(3) 方案2。西线调水80亿 $m^3$ 进入黄河上游地区。调水后河北、天津、河南、山东仍维持基准方案指标不变,其发展用水由南水北调东线和中线解决。西线调水量和黄河流域水资源统一配置,按照上述方法和

模型优化分配给河流生态用水和其他省区经济社会用水。

(4) 方案3。西线调水 80 亿  $m^3$  进入黄河上游地区。调水后河北、天津分水指标与基准方案保持一致,其发展用水由南水北调东线和中线解决。考虑到 2013 年、2014 年东中线一期工程相继通水,其供水范围与下游引黄供水区存在一定的空间重叠,按照重叠区工业、生活尽可能多使用南水北调水置换引黄水的原则,确定河南及山东流域外可能置换出的引黄指标。经计算分析,河南省可调减中线一期工程与黄河供水重叠区的引黄用水指标为 2.0 亿  $m^3$ ,山东省可调减东线一期工程与黄河供水重叠区的引黄用水指标为 4.2 亿  $m^3$ 。将西线调水量、黄河流域水资源、下游引黄灌区减少的引黄分水量统一配置,按照上述方法和模型优化分配给河流生态用水和其他省区经济社会用水。

#### 4.2 西线调水后黄河流域水资源优化配置方案

采用上述生态优先、公平为主兼顾效率的流域用水分级配置方法,地下水按照基本采补平衡维持 125 亿  $m^3$  供水量,确定黄河地表水耗水量配置结果见表 5。与基准方案相比,河道内水量由 176.3 亿  $m^3$  提升至 210 亿  $m^3$ ,优先保障了河道内基本生态环境用水需求;除了方案 2、方案 3 限定了河南、山东、河北 3 省配置指标外,其余各省区配置水量均有所增加。

表 5 西线调水后黄河地表水耗水量配置

Table 5 Allocation scheme of surface consumed water of the Yellow River after the operation of Western Route Project

单位:亿  $m^3$

| 省区  | 西线调水后地表水耗水量配置方案 |        |        | 西线一期工程配置水量 |       |       |
|-----|-----------------|--------|--------|------------|-------|-------|
|     | 方案 1            | 方案 2   | 方案 3   | 方案 1       | 方案 2  | 方案 3  |
| 青海  | 17.81           | 17.95  | 18.35  | 5.40       | 5.54  | 5.94  |
| 四川  | 0.44            | 0.44   | 0.44   | 0.09       | 0.09  | 0.09  |
| 甘肃  | 38.99           | 39.41  | 40.62  | 12.25      | 12.66 | 13.88 |
| 宁夏  | 46.54           | 47.00  | 48.32  | 11.36      | 11.82 | 13.14 |
| 内蒙古 | 59.90           | 60.41  | 61.90  | 8.36       | 8.87  | 10.35 |
| 陕西  | 39.04           | 39.31  | 40.08  | 5.61       | 5.88  | 6.65  |
| 山西  | 39.01           | 39.36  | 40.37  | 1.09       | 1.44  | 2.45  |
| 河南  | 48.89           | 48.73  | 46.73  | 0.15       | 0     | -2.00 |
| 山东  | 63.57           | 61.58  | 57.38  | 1.99       | 0     | -4.20 |
| 河北  | 5.85            | 5.85   | 5.85   | 0          | 0     | 0     |
| 河道外 | 360.04          | 360.04 | 360.04 | 46.30      | 46.30 | 46.30 |
| 河道内 | 210.00          | 210.00 | 210.00 | 33.70      | 33.70 | 33.70 |
| 合计  | 570.04          | 570.04 | 570.04 | 80.00      | 80.00 | 80.00 |

#### 4.3 西线调水量配置方案

基于上述西线调水后黄河地表水耗水量配置方案,对比各方案与基准方案,即可获得南水北调西线一期工程配置方案,见表 5。

方案 1 配置上游省区 37.46 亿  $m^3$ ,中游省区 6.70 亿  $m^3$ ,下游省区 2.14 亿  $m^3$ ;方案 2 配置上游省区 38.98 亿  $m^3$ ,中游省区 7.32 亿  $m^3$ ,下游省区未分配水量;方案 3 配置上游省区 43.39 亿  $m^3$ ,中游省区 9.11 亿  $m^3$ ,下游省区指标减少 6.2 亿  $m^3$ 。3 个方案中,甘肃、宁夏、内蒙古的配置水量均位于前列,配置水量分别为 12.24 亿~13.87 亿  $m^3$ 、11.36 亿~13.14 亿  $m^3$ 、8.36 亿~10.35 亿  $m^3$ ;陕西、青海、山西也有一定的增加,配置水量分别为 5.61 亿~6.65 亿  $m^3$ 、5.40 亿~5.94 亿  $m^3$ 、1.09 亿~2.45 亿  $m^3$ ,西线配置水量与这些省区需水总量、需水特征以及单方水效益等有关。河南、山东、河北配置水量较少或者有所减少,主要是与考虑南水北调东线和中线供水而控制有关。

## 5 讨 论

### 5.1 流域供需平衡分析

(1) 河道内生态用水满足情况。各方案中利津断面河道内生态用水量均达到 210 亿  $m^3$ ，其他关键断面的生态流量及过程也均达到要求。

(2) 经济社会缺水情况。各方案流域供需分析结果如表 6 所示。方案 1 流域内供水量为 489.65 亿  $m^3$ ，缺水量为 44.97 亿  $m^3$ ，缺水率为 8.4%；方案 2 流域内供水量为 490.01 亿  $m^3$ ，缺水量为 44.60 亿  $m^3$ ，缺水率为 8.3%；方案 3 流域内供水量为 497.31 亿  $m^3$ ，缺水量为 37.31 亿  $m^3$ ，缺水率为 7.0%。

表 6 西线一期工程生效后黄河流域经济社会缺水量与缺水率

Table 6 Economic and social water shortage and the shortage rate in the Yellow River basin after the operation of the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project

| 方 案  | 需水量/亿 $m^3$ | 供水量/亿 $m^3$ | 缺水量/亿 $m^3$ | 缺水率/% |
|------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 方案 1 | 534.62      | 489.65      | 44.97       | 8.4   |
| 方案 2 | 534.62      | 490.01      | 44.60       | 8.3   |
| 方案 3 | 534.62      | 497.31      | 37.31       | 7.0   |

(3) 流域内各省区缺水情况。方案 1 各省区河道外经济社会缺水量为 0.01 亿 ~ 11.90 亿  $m^3$ ，缺水量较大的为内蒙古、宁夏、甘肃，缺水量较小的为四川、山东、青海，流域各省区缺水率为 2.1% ~ 11.3%；方案 2 缺水量为 0.01 亿 ~ 11.35 亿  $m^3$ ，缺水量较大的为内蒙古、宁夏、甘肃，缺水量较小的为四川、青海、陕西，流域各省区缺水率为 2.0% ~ 14.6%；方案 3 缺水量为 0.01 亿 ~ 9.77 亿  $m^3$ ，缺水量较大的为内蒙古、宁夏、甘肃，缺水量较小的为四川、青海、陕西，流域各省区缺水率为 1.6% ~ 14.6%。排除边界条件设置的影响，不同方案省区整体缺水的分布规律基本一致，见表 7。

表 7 2030 年西线生效后黄河流域各省区缺水情况

Table 7 Water shortage of 9 provinces in the Yellow River basin after the operation of Western Route Project in 2030

| 省区   | 方案 1        |       | 方案 2        |       | 方案 3        |       |
|------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
|      | 缺水量/亿 $m^3$ | 缺水率/% | 缺水量/亿 $m^3$ | 缺水率/% | 缺水量/亿 $m^3$ | 缺水率/% |
| 青海   | 2.14        | 7.9   | 1.99        | 7.4   | 1.54        | 5.7   |
| 四川   | 0.01        | 2.1   | 0.01        | 2.0   | 0.01        | 1.6   |
| 甘肃   | 6.27        | 10.2  | 5.82        | 9.5   | 4.52        | 7.3   |
| 宁夏   | 9.78        | 11.1  | 9.07        | 10.3  | 7.01        | 8.0   |
| 内蒙古  | 11.90       | 11.3  | 11.35       | 10.8  | 9.77        | 9.3   |
| 陕西   | 3.89        | 4.0   | 3.60        | 3.7   | 2.78        | 2.9   |
| 山西   | 5.14        | 7.5   | 4.77        | 7.0   | 3.69        | 5.4   |
| 河南   | 4.18        | 6.8   | 4.35        | 7.0   | 4.35        | 7.0   |
| 山东   | 1.65        | 6.6   | 3.65        | 14.6  | 3.65        | 14.6  |
| 黄河流域 | 44.97       | 8.4   | 44.60       | 8.3   | 37.31       | 7.0   |

### 5.2 流域用水公平性分析

各方案中省区刚性需水均得到满足，缺水率为 0；各方案中内蒙古的弹性需水均未能得到满足，缺水率为 100%。用水公平性主要体现在刚弹性需水层的供水量，见表 8。

方案 1 各省区刚性需水均得到满足，该层需水的缺水率均为 0；各省区刚弹性需水的缺水率基本为 21.0%，实现了区域间用水公平；内蒙古弹性需水没有得到满足，弹性需水缺水率为 100%。方案 2 各省区

刚性需水均得到满足, 该层需水的缺水率均为0; 刚弹性需水的缺水率为19.4%~30.3%, 由于限定河南、山东用水量维持基准方案指标不变, 其刚弹性缺水率有所上升分别达到21.8%和30.3%, 其他省区刚弹性供水有所增加, 刚弹性缺水率从21.0%降低至19.5%; 内蒙古弹性需水层缺水率为100%。方案3各省区刚性需水缺水率为0; 刚弹性需水缺水率为15.1~30.3%, 该方案调减了河南及山东引黄用水指标6.2亿m<sup>3</sup>, 增加了上中游用水量, 上中游省区刚弹性缺水率进一步降低至15.1%。

表8 2030年西线生效后黄河流域各省区分层需水和供水情况

Table 8 Hierarchical water demand and supply of 9 provinces in the Yellow River basin after the operation of Western Route Project in 2030

| 省区  | 刚性需水量/亿m <sup>3</sup> | 刚性需水供水/亿m <sup>3</sup> | 刚弹性需水量/亿m <sup>3</sup> | 刚弹性需水供水/缺水率        |       |                    |       |                    |       | 弹性需水量/亿m <sup>3</sup> | 弹性需水供水/亿m <sup>3</sup> |
|-----|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|-----------------------|------------------------|
|     |                       |                        |                        | 方案1                |       | 方案2                |       | 方案3                |       |                       |                        |
|     |                       |                        |                        | 供水/亿m <sup>3</sup> | 缺水率/% | 供水/亿m <sup>3</sup> | 缺水率/% | 供水/亿m <sup>3</sup> | 缺水率/% |                       |                        |
| 青海  | 16.71                 | 16.71                  | 10.20                  | 8.06               | 21.0  | 8.22               | 19.4  | 8.66               | 15.1  | —                     | —                      |
| 四川  | 0.45                  | 0.45                   | 0.05                   | 0.04               | 21.0  | 0.04               | 19.5  | 0.04               | 15.1  | —                     | —                      |
| 甘肃  | 31.67                 | 31.67                  | 29.90                  | 23.63              | 21.0  | 24.08              | 19.5  | 25.38              | 15.1  | —                     | —                      |
| 宁夏  | 40.61                 | 40.61                  | 47.35                  | 37.42              | 21.0  | 38.14              | 19.5  | 40.19              | 15.1  | —                     | —                      |
| 内蒙古 | 63.98                 | 63.98                  | 36.40                  | 28.77              | 21.0  | 29.32              | 19.5  | 30.90              | 15.1  | 4.85                  | 0                      |
| 陕西  | 66.52                 | 66.52                  | 30.30*                 | 14.96              | 21.0  | 15.24              | 19.5  | 16.07              | 15.1  | —                     | —                      |
| 山西  | 43.78                 | 43.78                  | 24.87                  | 19.65              | 21.0  | 20.03              | 19.5  | 21.11              | 15.1  | —                     | —                      |
| 河南  | 41.96                 | 41.96                  | 19.95                  | 15.77              | 21.0  | 15.60              | 21.8  | 15.60              | 21.8  | —                     | —                      |
| 山东  | 15.92                 | 15.92                  | 9.15**                 | 6.24               | 20.9  | 5.50               | 30.3  | 5.50               | 30.3  | —                     | —                      |

注: \*陕西省流域内刚弹性需水量先由外调水工程满足11.37亿m<sup>3</sup>(引汉济渭、引红济石、引乾济石), 剩余的刚弹性需水作为模型优化边界; \*\*山东省流域内刚弹性需水量先由外调水工程满足1.26亿m<sup>3</sup>(南水北调中线), 剩余的刚弹性需水作为模型优化边界。

### 5.3 流域经济社会供水效益分析

考虑未来用水需求增长、供水结构调整以及西线一期工程调入水量, 从生活、生产、生态等方面, 按照流域各省区各行业供水量和单方水效益估算流域经济社会供水效益, 其中生活用水和生态用水的单方水效益分别用工业用水和农业用水单方水效益替代。经估算, 方案1、方案2、方案3的供水效益分别为4 509.3亿、4 508.6亿、4 518.5亿元, 单方水的经济社会效益为9.09~9.21元/m<sup>3</sup>, 见表9。根据《人民治理黄河70年黄河治理开发与保护成就及效益》报告, 近年来黄河年均供水效益约为3 050亿元, 可见随着供水量增加和供水结构调整, 黄河流域供水效益将大幅增加。

表9 黄河流域经济社会供水效益估算

Table 9 Estimated economic and social water supply benefits of the Yellow River basin 单位: 亿元

| 省区   | 生活供水效益  | 工业供水效益  | 生态供水效益 | 农业供水效益 |       |       | 供水效益合计  |         |         |
|------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|---------|---------|---------|
|      |         |         |        | 方案1    | 方案2   | 方案3   | 方案1     | 方案2     | 方案3     |
| 青海   | 50.5    | 100.0   | 1.1    | 10.5   | 10.6  | 10.9  | 162.1   | 162.2   | 162.5   |
| 四川   | 0.6     | 0.2     | 0      | 0.3    | 0.3   | 0.3   | 1.0     | 1.0     | 1.0     |
| 甘肃   | 216.5   | 405.4   | 1.7    | 27.6   | 28.1  | 29.5  | 651.2   | 651.6   | 653.0   |
| 宁夏   | 71.9    | 181.8   | 2.2    | 40.7   | 41.1  | 42.5  | 296.5   | 297.0   | 298.3   |
| 内蒙古  | 130.0   | 347.1   | 8.6    | 90.7   | 91.5  | 93.6  | 576.4   | 577.2   | 579.3   |
| 陕西   | 433.9   | 584.4   | 5.4    | 95.2   | 95.7  | 97.3  | 1 118.9 | 1 119.4 | 1 121.0 |
| 山西   | 241.9   | 365.3   | 10.1   | 89.5   | 90.6  | 93.7  | 706.8   | 707.8   | 711.0   |
| 河南   | 226.2   | 342.8   | 15.2   | 99.3   | 98.7  | 98.7  | 683.4   | 682.8   | 682.8   |
| 山东   | 115.7   | 176.2   | 2.2    | 18.9   | 15.3  | 15.3  | 313.0   | 309.4   | 309.4   |
| 黄河流域 | 1 487.2 | 2 503.1 | 46.4   | 472.6  | 471.9 | 481.9 | 4 509.3 | 4 508.6 | 4 518.5 |

## 6 结 论

本文分析了黄河流域需水特征和南水北调西线调入水量可以覆盖黄河供水区等特点,提出应统筹考虑生态、公平、效益因素对黄河流域水资源和调入水量进行整体优化配置,以国家批准的黄河分水方案为基础来确定西线调入水量配置,研究考虑南水北调东线和中线生效后置换黄河供水的多个情景方案,研究不同情境下黄河流域水资源优化配置和南水北调一期调入水量配置方案。主要结论如下:

(1) 南水北调西线一期工程调水 80 亿  $\text{m}^3$ , 占黄河现状天然径流量的 16.3%, 将大大改变黄河流域水源条件, 可覆盖黄河主要供水区域。区别于南水北调东线和中线等其他调水工程, 西线工程调水进入黄河后利用和扩展黄河供水系统, 西线调入水量应和黄河流域水资源统一调节、配置和利用。

(2) 根据黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略确定的基本原则, 遵循生态优先、绿色发展, 保证河流基本生态用水要求, 西线调入水量考虑优先满足河流基本生态用水, 配置河道内生态水量 33.70 亿  $\text{m}^3$ , 河流生态用水恢复到 210 亿  $\text{m}^3$ , 可保障河道内生态环境用水量及河口地区生态系统用水要求。

(3) 在满足河道内生态环境用水后, 采用流域用水分级配置模型计算分析, 西线剩余的 46.3 亿  $\text{m}^3$  水量重点配置到了黄河上中游地区, 占比 95% 以上。西线调水后按照本文方法优化配置, 黄河流域缺水率降低至 7.0% ~ 8.3%, 保证了省区用水公平性, 可发挥巨大的供水效益。

### 参考文献:

- [1] MOUSAVI S J, ANZAB N R, ASL-ROUSTA B, et al. Multi-objective optimization-simulation for reliability-based inter-basin water allocation[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(11): 3445-3464.
- [2] LIU J Y, QIN K Y, ZHEN L, et al. How to allocate interbasin water resources? A method based on water flow in water-deficient areas[J]. *Environmental Development*, 2020, 34: 100460.
- [3] CAMPBELL GRANT E H, LYNCH H J, MUNEEPEERAKUL R, et al. Interbasin water transfer, riverine connectivity, and spatial controls on fish biodiversity[J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): e34170.
- [4] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 缺水流域用水竞争与协作关系: 以黄河流域为例[J]. *水科学进展*, 2020, 31(6): 897-907. (SHANG W X, PENG S M, WANG Y, et al. Competition and cooperation relationship of water utilization in water shortage basins: a case study of Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(6): 897-907. (in Chinese))
- [5] 张弛, 陈晓贤, 李昱, 等. 跨流域引水受水水库最优调度决策的理论分析[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 492-504. (ZHANG C, CHEN X X, LI Y, et al. Analytical analysis for optimal operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 492-504. (in Chinese))
- [6] 李红艳. 基于模糊决策的调水水权初始分配研究[J]. *统计与决策*, 2009(20): 40-42. (LI H Y. Study on initial allocation of water rights for water transfer based on fuzzy decision-making[J]. *Statistics & Decision*, 2009(20): 40-42. (in Chinese))
- [7] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. *水利学报*, 2008, 39(10): 1168-1175. (WANG H, YOU J J. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese))
- [8] 彭少明, 王浩, 王煜, 等. 泛流域水资源系统优化研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(1): 10-17. (PENG S M, WANG H, WANG Y, et al. Study on the pan-basin optimization of water resources system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(1): 10-17. (in Chinese))
- [9] 赵勇, 解建仓, 马斌. 基于系统仿真实验的南水北调东线水量调度[J]. *水利学报*, 2002, 33(11): 38-43. (ZHAO Y, XIE J C, MA B. Water dispatch of east-route of South-to-North Water Transfer Project based on system simulation method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(11): 38-43. (in Chinese))
- [10] 游进军, 王忠静, 甘泓, 等. 两阶段补偿式跨流域调水配置算法及应用[J]. *水利学报*, 2008, 39(7): 870-876. (YOU

- J J, WANG Z J, GAN H, et al. Stepwise compensatory allocation of inter-basin water diversion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(7): 870-876. (in Chinese))
- [11] 董增川, 倪效宽, 陈牧风, 等. 流域水资源调度多目标时变偏好决策方法及应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 376-386. (DONG Z C, NI X K, CHEN M F, et al. Multi-objective time-varying preference decision-making method for basin water resource dispatch and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 376-386. (in Chinese))
- [12] 王煜, 彭少明, 尚文绣, 等. 基于水-沙-生态多因子的黄河流域水资源动态配置机制探讨[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 534-543. (WANG Y, PENG S M, SHANG W X, et al. Study on the dynamic allocation mechanism of water resources in the Yellow River basin considering runoff, sediment and ecosystem[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 534-543. (in Chinese))
- [13] MENG F, SU F, YANG D, et al. Impacts of recent climate change on the hydrology in the source region of the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016, 6: 66-81.
- [14] ZHANG B, HE C, BURNHAM M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 539: 436-449.
- [15] HUA Y, CUI B. Environmental flows and its satisfaction degree forecasting in the Yellow River[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 207-220.
- [16] YIN Y, TANG Q, LIU X, et al. Water scarcity under various socio-economic pathways and its potential effects on food production in the Yellow River basin[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 791-804.
- [17] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 614-624. (WANG Y, PENG S M, ZHENG X K. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 614-624. (in Chinese))
- [18] 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 等. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 287-295. (QI X B, HUANG Z D, QIAO D M, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 287-295. (in Chinese))
- [19] 严登华, 秦天玲, 肖伟华, 等. 基于低碳发展模式的水资源合理配置模型研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(5): 586-593. (YAN D H, QIN T L, XIAO W H, et al. Study on the model of water resources rational deployment for the low-carbon development mode[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(5): 586-593. (in Chinese))
- [20] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 44-55. (WANG Y, PENG S M, WU J, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(1): 44-55. (in Chinese))
- [21] 黄强, 赵冠南, 郭志辉, 等. 塔里木河干流水资源优化配置研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 38-46, 58. (HUANG Q, ZHAO G N, GUO Z H, et al. Study on optimization of water resources allocation in the Tarim River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 38-46, 58. (in Chinese))
- [22] 栗晓玲, 康绍忠. 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 128-132. (SU X L, KANG S Z. Multi-objectives allocation model of water resources and its application in the Shiyang River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 128-132. (in Chinese))
- [23] 王丽霞, 任志远, 任朝霞, 等. 陕北延河流域基于 GLP 模型的流域水土资源综合配置[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 48-53, 393. (WANG L X, REN Z Y, REN Z X, et al. Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 48-53, 393. (in Chinese))
- [24] 王学斌, 畅建霞, 孟雪姣, 等. 基于改进 NSGA- II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(2): 135-145, 156. (WANG X B, CHANG J X, MENG X J, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA- II for the Lower Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(2): 135-145, 156. (in Chinese))
- [25] AHMADIANFAR I, ADIB A, TAGHIAN M. Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(6): 3075-3086.

- [26] 武见, 明广辉, 周翔南, 等. 黄河流域需水分层预测[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 31-37. (WU J, MING G H, ZHOU X N, et al. Forecasting of water demand hierachy in the Yellow River basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 31-37. (in Chinese))
- [27] 安玉洁, 赵麦换, 苏柳, 等. 人民治理黄河 70 年灌溉效益分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(12): 24-27. (AN Y J, ZHAO M H, SU L, et al. Analysis of irrigation benefits of the Yellow River management in recent 70 years[J]. Yellow River, 2016, 38(12): 24-27. (in Chinese))
- [28] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河“八七”分水方案实施 30 a 回顾与展望[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 6-13, 19. (WANG Y, PENG S M, WU J, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years [J]. Yellow River, 2019, 41(9): 6-13, 19. (in Chinese))
- [29] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 黄河“八七”分水方案的适应性评价与提升策略[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 632-642. (WANG Y, PENG S M, ZHENG X K, et al. Adaptability assessment and promotion strategy of the Yellow River Water Allocation Scheme[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 632-642. (in Chinese))

## Water allocation of the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project based on balanced provisioning of water resources in the Yellow River basin \*

WANG Yu<sup>1</sup>, ZHOU Xiangnan<sup>2</sup>, PENG Shaoming<sup>2</sup>, WU Jian<sup>2</sup>, MING Guanghui<sup>2</sup>, ZHENG Xiaokang<sup>2</sup>

(1. *Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China*; 2. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*)

**Abstract:** Water allocation of the Yellow River basin (YRB) after the first phase of South-to-North Water Diversion Western Route Project (WRP) takes effect will determine the rebuilding of water resources allocation framework of YRB and the evaluation of economic benefits of water supply of WRP, and support technologically the construction of the national water network. Given that WRP covers the main water supply areas of YRB, water diversion of WRP shall be allocated conjunctively with water resources of YRB. A hierarchical water allocation model, which gives first priority to ecology, followed by equity and efficiency, are constructed, and water diversion of WRP is allocated based on balanced provision. Water allocation schemes under different scenarios are optimized and scrutinized. The results show that out of the 8 billion m<sup>3</sup> of first phase WRP diversion 3.37 billion m<sup>3</sup> is allocated to in-stream ecological use and 4.63 billion m<sup>3</sup> to off-stream socioeconomic use. More than 95% of the WRP diversion is allocated to the upper and middle reaches of YRB, and water shortage rate at the basin level is reduced to 7.0%—8.3%. The optimized allocation reflects the principle of ecological priority, ensures basic in-stream ecological water use, balances equity and efficiency of off-stream socioeconomic water use, and reduces water shortage effectively.

**Key words:** ecological priority; balanced provisioning; South-to-North Water Diversion Western Route Project; Yellow River basin

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3202305).