

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.008

基于增量动态均衡配置的黄河分水方案 优化方法研究

王煜¹, 彭少明², 周翔南², 武见², 尚文绣², 严登明²

(1. 黄河水利委员会规划计划局, 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:针对“八七”分水方案颁布实施以来黄河流域经济社会发展、工程建设运用、用水特征、水沙情势等分水基础条件的改变,以及黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略对流域水资源配置提出的新要求,结合黄河流域重大水源工程与调节工程建设运用,考虑新战略下维持河流健康生态要求,统筹用水的公平性与效率因素,提出了黄河流域水资源增量动态均衡配置方法。重点研究了南水北调西线工程生效之前的情景,维持“八七”分水方案总体格局,考虑新增水源和分水调整的制约因素,对新增水源工程和调节工程带来的水资源增量进行动态均衡配置,实现对“八七”分水方案的微调优化。对黄河流域多个场景下分水方案调整策略进行研究,结果表明:分水方案优化调整策略为增加上游水量配置占比,调整幅度为2.13%~2.78%;微增中游水量配置占比,调整幅度为0.25%~0.31%;减少下游和河北省、天津市水量配置占比,调整幅度为-3.81%~-2.38%。

关键词:分水方案;水资源配置;增量均衡配置;黄河流域

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-1933(2022)04-0048-08

Water allocation scheme optimization in the Yellow River based on incremental dynamic equilibrium configuration
//WANG Yu¹, PENG Shaoming², ZHOU Xiangnan², WU Jian², SHANG Wenxiu², YAN Dengming² (1. Department of Planning and Programming, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The basic conditions of water distribution have changed since promulgation and implementation of the 1987's Water Allocation Scheme, including economic and social development, engineering construction and application, water use characteristics, and water-sand regime, and the major national strategies for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin also put forward new requirements for water resources allocation. In consideration of above factors, the method of incremental dynamic equilibrium configuration of water resources in the Yellow River Basin was proposed based on the application of major water source projects and regulation projects and idea of maintaining river ecosystem health under the new strategies, in which the factors of the fairness and efficiency of water use were incorporated. Focusing on the scenario before the West Route of South-to-North Water Diversion Project takes effect, following the overall pattern of the 1987's Water Allocation Scheme, and considering the restrictive factors of new water sources and water distribution adjustment, dynamic equilibrium configuration was carried out to distribute water increment from additional water source projects and regulation projects, realizing the fine-tuning optimization of the 1987's Water Allocation Scheme. The adjustment strategy of water allocation scheme in multiple scenarios in the Yellow River Basin is optimized as follows: increasing the amount of water allocation in the upstream, with an increasing rate of 2.13% to 2.78%; slightly increasing the amount of water allocation in the midstream, with an increasing rate of 0.25% to 0.31%; decreasing the amount of water allocation in the downstream as well as Hebei Province and Tianjing City, with a decreasing rate of -3.81% to -2.38%.

Key words: water allocation scheme; water resources allocation; incremental equilibrium configuration; the Yellow River Basin

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404404)

作者简介:王煜(1968—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事流域水资源配置及调控研究。E-mail:blue-sail@qq.com

通信作者:周翔南(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事流域水资源规划及配置研究。E-mail:1031375322@qq.com

黄河流域水少沙多、水资源时空分布不均,是我国水资源供需矛盾最突出的流域之一,变化环境下流域水资源配置面临巨大挑战^[1-2]。“八七”分水方案自1987年颁布实施以来,在流域用水总量控制、省区用水协调、用水效率提高、生态和输沙用水保障等方面发挥了重要作用,支撑了流域经济社会发展和河流生态维持^[3]。同时实施分水方案的经济社会、工程条件、水沙情势等基础条件有所改变,水资源的不适配性开始显现,需要对分水方案优化调整以提高对环境变化的适应性^[4-6]。

国内外围绕缺水流域水资源配置问题开展了大量研究^[6]。随着水资源配置理论发展,水资源配置从单一目标发展为多目标,水资源综合价值和用水公平性被用于指导水资源配置^[7],一些研究通过权重等方法将水资源的社会价值、经济价值和生态价值合并为单一目标考虑^[8-9],也有研究通过多目标优化分析不同目标之间的权衡关系,根据决策偏好选择调控方案^[10]。目前缺水流域水资源配置研究已取得一定成果,对水资源综合价值、多目标优化配置等均有一些探讨,但是对不同类型需水的差别化配置策略、统筹公平性与效率因素的配置理论和方法研究不足;现有水资源动态配置主要考虑径流变化特征^[11-12],对泥沙动态变化性考虑不够,难以应用于多沙流域水资源配置。在流域特征发生变化的情况下,对已有配置方案进行再优化的研究不多,对如何提高已有分水方案对变化环境的适应性研究有待加强。当前黄河流域生态保护和高质量发展已经上升为重大国家战略,流域各省区和社会各界对优化调整黄河分水方案的呼吁越来越多。本文提出了水资源增量动态均衡配置的优化方法,在黄河流域重大国家战略下,研究了分水方案调整方向和幅度等策略,提高分水方案对变化环境的适应性。

1 研究方法

1.1 基本思路

黄河“八七”分水方案调整是一个多要素变化背景下资源性缺水流域水资源再优化配置问题,有以下特点:①缺水配置,黄河流域现状缺水89亿 m^3 ,资源性缺水问题十分严峻^[13];②减量配置,按照最新的第三次水资源调查(1956—2016年水文系列)评价成果,现状天然径流量为490亿 m^3 ,较“八七”分水方案制定时(1919—1975年水文系列)的580亿 m^3 减少90亿 m^3 ;③再优化配置,黄河“八七”分水方案是国务院批复的南水北调生效前的分水方案,本研究考虑南水北调等工程的建设 and 生效情况,在“八七”分水方案基础上,在水情、工情、经济社会

发展等变化环境下对水资源进行再配置。

根据黄河分水方案调整的特点,本研究的思路是结合流域重大水源工程与调节工程建设运用,研究提出不同时期和条件下的调整策略。调整策略考虑流域经济社会发展和维持河流健康生态要求,统筹用水的公平性与效率因素,对流域水资源进行均衡配置。本文研究南水北调西线工程生效前的分水调整问题,以“八七”分水方案为基础,考虑新增水源和分水调整的制约性因素,维持“八七”分水方案的总体格局不发生大的调整,对新增水源工程带来的水资源增量进行动态均衡配置。

1.2 方法构建

黄河流域水资源增量动态均衡配置以黄河“八七”分水方案为基础,维持有关省区在新径流条件下的分水指标占比不降低,对新建流域外调水工程产生的河道外水资源增量进行流域均衡配置。

1.2.1 流域概化

将黄河流域河道外区域概化为182个计算单元,每个计算单元考虑城镇生活、农村生活、第三产业、工业、农业、城镇生态、农村生态7类用水需求;河道内主要包含16个干支流重要断面,以满足河道内防凌、冲沙和生态基流需要;通过天然河道、人工渠道等水力联系将计算单元、水库枢纽(34个)、入流节点(地表水199处、地下水181处)等有机衔接,形成流域水资源配置网络,见图1。

1.2.2 目标函数

考虑天然径流的变化性,在分水指标调整前,需根据年度来水预测对“八七”分水指标进行丰增枯减,得到该年度河道内分水指标 A_{Pi} 和第 i 省区分水指标 A_{Poi} , $i=1,2,\dots,11$ (见图1中的省区)。河道外分水指标增量包括两种:①来沙量减少和水库调蓄能力增加使河道内年输沙用水减少 ΔA_1 ;②河南、山东、河北和天津4省区可用南水北调工程调水置换部分引黄水,引黄水量可减少 ΔA_0 。河道外分水指标减少的 n 个省区不参与增量分配,其他 n' ($n'=11-n$)个省区分配增量 ΔA , $\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_0$ 。

黄河流域水资源增量动态均衡配置的目标函数为

$$\max F(\Delta A_{0i}) = \max [F_V^\alpha(\Delta A_{0i}) F_E^{1-\alpha}(\Delta A_{0i})] \quad (1)$$

式中: F 为水资源配置效果的表征函数; F_V 为流域用水效率表征指标,包括用水产生的经济价值、社会价值和生态环境价值; F_E 为流域用水公平表征指标,反映区域及行业间的用水公平; ΔA_{0i} 为第 i 省区的分水指标增量,亿 m^3 ; α 为均衡参数,取值范围是0~1,根据已有研究成果,本文 α 取0.50。

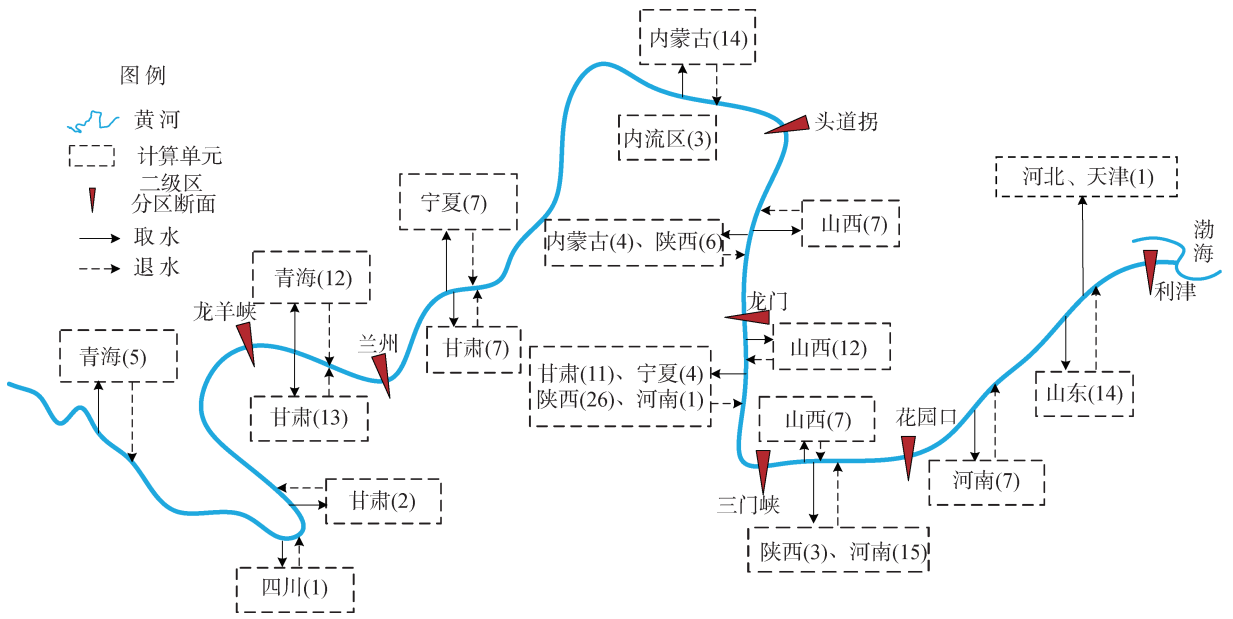


图1 黄河流域水资源配置网络

Fig. 1 Water resources allocation network of the Yellow River Basin

用水效率表征指标 F_V 为

$$F_V = \sum_{k=1}^K (F_{V1,k} + F_{V2,k} + F_{V3,k}) \quad (2)$$

式中: K 为流域内的分区总数; $F_{V1,k}$ 、 $F_{V2,k}$ 和 $F_{V3,k}$ 分别为第 k 个计算分区的水资源经济价值、社会价值和生态环境价值。

用水公平表征指标 F_E 为

$$F_E = \sqrt{F_{EA} F_{ED}} \quad (3)$$

其中 $F_{EA} = 1 - G_A$ $F_{ED} = 1 - G_D$
式中: G_A 为计算单元满意度的用水基尼系数; G_D 为部门满意度的用水基尼系数。用水公平性指标 F_{EA} 反映不同分区计算单元满意度的差异, F_{EA} 越大, 表示各分区计算单元满意度越接近, 即水资源在不同地区间的分配越公平; 部门用水协调性指标 F_{ED} 反映不同行业部门满意度的差异, F_{ED} 越大, 表示各部门间用水满意度越接近, 即水资源在不同用水部门间的分配越协调。 F_V 与 F_E 的计算方法详见前期研究成果^[14]。

1.2.3 约束条件

a. 耗水总量约束。地表水耗水总量约束和地下水耗水总量约束分别为

$$\sum_{j=1}^{f_i} \sum_{l=1}^7 V_{Si,j,l} \leq A_{POi} + \Delta A_{Oi} \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^7 V_{Gi,j,l} \leq V_{Gi,j} \quad (5)$$

式中: $V_{Si,j,l}$ 、 $V_{Gi,j,l}$ 分别为第 i 省区第 j 个计算单元第 l 个行业的地表水耗水量和地下水耗水量, 亿 m^3 ; f_i 为第 i 省区计算单元的数量; l 为行业编号, 分别代

表城镇生活、农村生活、工业、农业、城镇生态、农村生态、第三产业 7 类行业; $V_{Gi,j}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元的地下水耗水量上限, 亿 m^3 。

b. 计算单元供水约束为

$$W_{ri,j,t} \leq W_{Si,j,t} \leq W_{ri,j,t} + W_{rei,j,t} + W_{ei,j,t} \quad (6)$$

式中: $W_{ri,j,t}$ 、 $W_{rei,j,t}$ 、 $W_{ei,j,t}$ 分别为第 i 省区第 j 个计算单元 t 时段的刚性、刚弹性、弹性需水, m^3 ; $W_{Si,j,t}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元 t 时段的供水量。

c. 水库约束。水量平衡约束、库容约束、流量约束和出力约束分别为

$$V_{m,t+1} = V_{m,t} + V_{Im,t} - V_{Om,t} - V_{Lm,t} \quad (7)$$

$$V_{Dm} \leq V_{m,t} \leq V_{maxm,t} \quad (8)$$

$$Q_{minm,t} \leq Q_{m,t} \leq Q_{maxm,t} \quad (9)$$

$$N_{minm,t} \leq N_{m,t} \leq N_{maxm,t} \quad (10)$$

式中: $V_{m,t}$ 为第 m 个水库 t 时段初蓄水量, 亿 m^3 ; $V_{Im,t}$ 、 $V_{Om,t}$ 、 $V_{Lm,t}$ 、 $V_{maxm,t}$ 分别为第 m 个水库 t 时段的入流量、泄水量、蒸发渗漏损失量和最大容许蓄水量, 亿 m^3 ; V_{Dm} 为第 m 个水库的死库容, 亿 m^3 ; $Q_{m,t}$ 、 $Q_{minm,t}$ 、 $Q_{maxm,t}$ 为第 m 个水库 t 时段的下泄流量、最小容许下泄流量和最大容许下泄流量, m^3/s ; $N_{m,t}$ 、 $N_{minm,t}$ 和 $N_{maxm,t}$ 为第 m 个水库 t 时段的发电量、机组最小容许出力和机组满发出力, $kW \cdot h$ 。

d. 引提水能力约束为

$$W_{i,j,t} \leq W_{maxi,j} \quad (11)$$

式中: $W_{i,j,t}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元 t 时段的引提水量, 亿 m^3 ; $W_{maxi,j}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元的引提水能力, 亿 m^3 。

e. 地下水埋深约束为

$$D_{i,j,t} \leq D_{\max i,j} \quad (12)$$

式中: $D_{i,j,t}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元 t 时段的平均地下水埋深, m; $D_{\max i,j}$ 为第 i 省区第 j 个计算单元的最大容许地下水埋深, m。

f. 最小生态流量约束为

$$E_{p,t} \leq R_{p,t} \quad (13)$$

式中 $E_{p,t}$ 、 $R_{p,t}$ 分别为第 p 个生态控制断面 t 时段的最小生态流量和实际流量, m^3/s 。

1.2.4 求解流程

流域水资源增量动态均衡配置由需水分层预测、水资源配置增量分析、水资源综合价值评估、用水公平协调性分析、供水规则优化和水资源供需网络模拟等部分构成(图2)。需水分层预测提出流域刚性、刚弹性、弹性需水预测,为流域水资源配置提供需水边界^[14];水资源配置增量分析提出不同调水工程和调节工程情境下国民经济供水增量,为流域水资源配置提供供水边界;水资源综合价值评估基于能值方法提出用水单元的水资源经济、社会、生态环境价值,并进行无量纲化处理^[15];用水公平协调性分析构建用水基尼系数,提出各省区用水和部门用水的公平协调性^[16];供水规则优化将供水规则作为求解变量,基于社会福利函数构建水资源综合价值及用水公平协调性的均衡目标函数,采用基于精英策略和线性约束的改进遗传算法进行迭代求解,得到供水规则优化结果;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,模拟长序列梯级水库群调度和流域各用水单元的需-供-耗-排水过程。

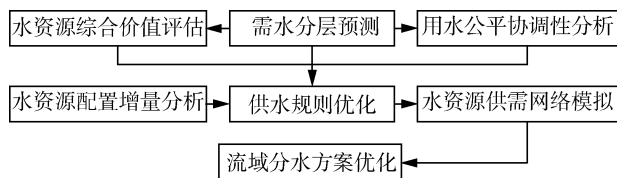


图2 水资源增量动态均衡配置流程

Fig.2 Flowchart of water resources incremental dynamic equilibrium configuration

2 场景分析与方案计算

考虑流域重大水源工程建设运用,根据黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略下维持河流健康生态的要求,设置多个场景和方案,运用流域水资源增量动态均衡配置方法,对不同情境下的水资源增量进行均衡配置,提出分水方案优化建议。

2.1 基本数据

a. 水沙情景。径流系列采用1956—2016年多年平均天然径流量,黄河干流兰州、头道拐、花园口、利津4个关键断面平均天然径流量分别为391.80亿 m^3 、307.41亿 m^3 、484.22亿 m^3 和490.04亿 m^3 。黄河来沙按中游4站(干流龙门站及泾河、北洛河、渭河3条支流的控制站)年来沙量的总和考虑。

b. 需水情景。2030年高效节水模式下河道外国民经济发展及生态维持分层需水量为534.62亿 m^3 ^[20]。与2018年现状年实际用水相比,2030年城镇综合刚性需水(包括城镇生活、建筑及第三产业、河道外生态等需水量)和工业刚性需水(一般工业需水)增加33.84亿 m^3 ,其中上、中、下游分别为16.90亿 m^3 、10.81亿 m^3 、6.13亿 m^3 ;2030年刚性需水及工业刚性需水(限制性工业需水)共增加73.73亿 m^3 ,其中上、中、下游分别为37.50亿 m^3 、25.03亿 m^3 、11.20亿 m^3 (表1)。根据《黄河流域水资源综合规划》《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、头道拐、花园口和利津4个关键断面生态基流分别为350 m^3/s 、150 m^3/s 、200 m^3/s 和50 m^3/s ,并考虑主要支流入黄断面生态基流要求^[17-18];利津断面非汛期综合考虑河道内基本生态、河口淡水湿地保护、河口近海水域低盐区维持,需水量为60亿 m^3 ^[5];古贤水库建成运行后与小浪底水库联合运用,考虑中游来沙6亿t的情景。

c. 调蓄工程。现状考虑龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡、小浪底等34个大中型水利枢纽工程;2030年考虑古贤水利枢纽投入运行。

d. 调水工程。现状考虑南水北调东线向山东省调水1.26亿 m^3 ,引乾济石向陕西省调水0.47亿 m^3 ,引红济石向陕西省调水0.90亿 m^3 。2030年考虑引

表1 流域刚性及刚弹性需水较现状实际用水量增量

单位:亿 m^3

Table 1 Rigid and rigid-elastic water demand increases over actual water consumption unit: 10^8 m^3

河段	2018年实际用水		2030年新增刚性需水			2030年新增刚性和刚弹性需水		
	城镇综合	工业	城镇综合	工业	合计	城镇综合	工业	合计
上游	24.60	19.50	9.73	7.17	16.90	9.73	27.77	37.50
中游	30.45	21.64	5.16	5.65	10.81	5.16	19.87	25.03
下游	16.88	13.48	3.05	3.08	6.13	3.05	8.15	11.20
合计	71.93	54.62	17.94	15.90	33.84	17.94	55.79	73.73

汉济渭调入水量 10 亿 m³。

e. 非常规水源。2030 年黄河流域非常规水资源利用量为 22.16 亿 m³,其中再生水 15.93 亿 m³、矿井水 2.52 亿 m³、微咸水 2.15 亿 m³、雨水 1.56 亿 m³。

2.2 场景分析

考虑南水北调东、中线一期工程建成生效以及后续二期工程供水区情况,研究黄河下游部分流域外引黄供水由其他调水工程承担的可能性。

a. 现状场景,东、中线一期工程生效。黄河“八七”分水方案分配给河北省和天津市 20 亿 m³ 水量指标。南水北调东、中线一期工程生效后,其供水区包含了河北省、天津市的部分地区,根据 2002 年国务院批复的《南水北调工程总体规划》和 2013 年国务院批复的《黄河流域综合规划》,黄河向河北省配置水量 6.2 亿 m³,不再考虑向天津市配置水量。本研究考虑东、中线一期工程向河北省和天津市引黄地区供水 13.8 亿 m³,调减了河北省和天津市引黄水量指标 13.8 亿 m³。

b. 中期场景,东、中线二期工程生效。根据目前东、中线后续工程的成果分析,东线二期供水区涉及山东半岛及山东省黄河以北地区(配置引黄水量 12.9 亿 m³,其中生活及第三产业用水量约 4.5 亿 m³)。中线以及后续工程引江补汉供水区涉及河南省引黄供水区(配置引黄水量 3.0 亿 m³,其中生活及第三产业用水量约 2.5 亿 m³)。综合考虑供水水价、工程条件等因素,河南和山东省流域外地区生活及第三产业用水可以通过东、中线二期增加供水和优化配置承担,即最大可以减少山东、河南省引黄水量 7.0 亿 m³。

c. 分水调整的制约因素分析。根据 2012 年批复的《黄河流域综合规划》,1956—2000 年黄河头道拐断面天然径流量 331.8 亿 m³,河道内生态环境需水量 197.0 亿 m³,其中汛期输沙需水量 120.0 亿 m³,非汛期生态需水量 77.0 亿 m³,河段水资源开发利用率为 55.8%。2001—2018 年头道拐断面以上天然径流量 305.4 亿 m³,实测平均水量 170.5 亿 m³,河道内生态需水尚不能完全满足,河段水资源开发利用率达 59.6%。如果增加上游省区河道外耗水指标 10 亿~20 亿 m³,头道拐断面水资源开发利用

率将提高至 65%~70%,将进一步影响河道内生态环境用水安全和区域生态安全。因此,调整河道外各省区配置关系,尤其是增加上游地区河道外分水指标时,需要考虑河道内生态用水和区域生态要求,不能大幅度增加上游省区用水指标。

2.3 方案设置

考虑影响分水方案调整的因素和上述配置模式,设置 3 个方案,如表 2 所示。方案 1 为现状场景(P1D),不考虑新增水源,设置同比例调整方案作为基准方案,即按照现状天然径流量 490 亿 m³与“八七”分水方案采用的天然径流量 580 亿 m³的比例关系,根据“八七”分水方案各省区配置指标进行同比例调整,不改变河道内和河道外各省区配置水量与天然径流量的比例关系。方案 2 为现状场景(P2I),考虑调减河北省和天津市 13.8 亿 m³引黄水量指标(在天然径流量 490 亿 m³条件下折减为 11.66 亿 m³),按照增量动态均衡配置方法设置方案。方案 3 为规划中期场景(P3I),考虑南水北调东、中线一期工程生效,调减河北省和天津市 11.66 亿 m³引黄水量指标,考虑南水北调东、中线二期工程生效,调减河南省 2.5 亿 m³、山东省 4.5 亿 m³引黄水量指标(其中 3.5 亿 m³用于增加下游河道内生态用水),按照增量动态均衡配置方法设置方案。

表 2 不同场景下方案设置

Table 2 Scheme settings in different scenarios

方案	场景	工程条件	优化方法
P1D	现状场景	东、中线一期工程生效	同比例调整
P2I	现状场景	东、中线一期工程生效	增量均衡配置
P3I	规划中期场景	东、中线一、二期工程生效	增量均衡配置

2.4 方案计算

采用流域水资源增量动态均衡配置方法,得到各方案的优化配置结果(表 3),配置水量以其占天然径流量的百分比来表示。

P1D 方案(基准方案)各省区配置水量均有所减少,但是配置水量占天然径流量的比例(简称配置占比)同“八七”分水方案一致,因此 P1D 方案是新的径流条件下的“八七”分水方案。其他配置方案均与基准方案比较。

表 3 方案优化配置结果

Table 3 Optimized allocation results for different schemes

方案	省区水量配置占比/%											河道内水量配置占比/%
	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	河北、天津	合计	
P1D	2.43	0.07	5.24	6.90	10.10	6.55	7.43	9.55	12.07	3.45	63.79	36.21
P2I	3.02	0.09	5.97	7.46	10.34	6.80	7.43	9.55	12.07	1.07	63.79	36.21
P3I	3.06	0.09	6.22	7.60	10.56	6.86	7.43	9.04	11.15	1.07	63.08	36.92

P2I 方案调减河北省和天津市引黄水量指标 11.66 亿 m³,不改变河道内、外水量配置关系,即河道内、外水量配置占比分别为 36.21% 和 63.79%。与 P1D 方案相比,P2I 方案将河北省和天津市调减的引黄水量指标配置给青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西等省区,而山西、河南、山东等省没有新增水量指标。

与 P2I 方案相比,P3I 方案各省区水量配置占比的变化幅度较大,说明随着水源置换增大,流域水资源优化的方向保持不变,优化空间增大,各省区调整幅度加大。

3 讨 论

3.1 河道内、外水量配置关系

河道内主要断面下泄水量如表 4 所示。P2I、P3I 方案利津断面下泄水量分别为 180.47 亿 m³和 183.97 亿 m³,与现状水平 2000—2018 年利津断面实测平均下泄水量 167.26 亿 m³相比,分别增加 13.21 亿 m³、16.71 亿 m³,增加了下游干流河流用水,实现了还水于河。

表 4 河道内主要断面下泄水量 单位:亿 m³

Table 4 Discharges of main sections in river channel		
unit: 10 ⁸ m ³		
方案	头道拐断面	利津断面
P1D	196.53	180.47
P2I	187.20	180.47
P3I	187.72	183.97

3.2 河道外省区水量配置关系

P2I 方案调减河北省和天津市引黄水量指标 11.66 亿 m³,与 P1D 方案相比,青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古等上游省区水量配置占比增幅为 0.02% ~ 0.73%,其中甘肃省增幅最高,陕西省水量配置占比增加 0.25%,山西、河南、山东省水量配置占比维持基准方案,即维持“八七”分水方案的占比不变,河北省和天津市水量配置占比共减少 2.38%。

P3I 方案调减河北、天津、河南、山东省区引黄水量指标共 18.66 亿 m³,与 P1D 方案相比,上游省区水量配置占比增幅为 0.02% ~ 0.98%,其中甘肃省增幅最高,陕西省水量配置占比增加 0.31%,山

西省水量配置占比维持基准方案,和“八七”分水方案一致,河南、山东省水量配置占比分别减少 0.51% 和 0.92%,河北省和天津市水量配置占比共减少 2.38%。

对以上方案与基准方案进行对比分析,从上、中、下游 3 个河段来看,水量配置占比优化调整策略为上游增加、中游微增、下游及河北省和天津市减少;调整的幅度为上游 2.13% ~ 2.78%、中游 0.25% ~ 0.31%、下游及河北省和天津市 -3.81% ~ -2.38%。从省区来看,各省区水量配置占比优化调整幅度不同,上游各省区和陕西省水量配置占比比较基准方案均增加;山西省水量配置占比维持基准方案;河南、山东省水量配置占比维持基准方案或有所减少;河北省和天津市水量配置占比比较基准方案减少。

3.3 流域缺水缓解分析

对各方案的流域供需分析结果如表 5 所示,与 P1D 方案相比,2030 年 P2I、P3I 方案黄河流域河道外缺水量和缺水率均有所下降。为了进一步分析省区间水量配置的公平性,对比各方案流域各省区的刚弹性和弹性需水的缺水率(以下简称“弹性缺水率”),结果如表 6 所示。基于本次预测的 2030 年需水量及分层结果^[14],P1D 方案省区间弹性缺水率差异较大,上、中、下游的弹性缺水率分别为 67.1%、44.2%、25.9%;P2I 方案上、中、下游弹性缺水率分别调整为 57.8%、41.2%、24.5%;P3I 方案上、中、下游弹性缺水率差异继续缩小,分别为 55.0%、40.5%、39.3%。

表 5 2030 年黄河流域河道外缺水量与缺水率

Table 5 Water shortage and water shortage rate outside river channel in the Yellow River Basin in 2030			
方案	供水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	缺水率/%
P1D	421.4	113.2	21.2
P2I	440.0	94.6	17.7
P3I	440.7	93.9	17.6

3.4 下游河道淤积分析

分别采用下游河道冲淤量计算的经验公式、下游河道高效输沙公式等方法^[19],计算不同汛期输沙水量下的下游河道全年淤积比。在中游来沙 6 亿 t、

表 6 2030 年黄河流域弹性缺水率

Table 6 Elastic water shortage rate of the Yellow River Basin in 2030												
方案	省区弹性缺水率/%									区域弹性缺水率/%		
	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	上游	中游	下游
P1D	84.6	100.0	70.0	62.9	65.7	60.1	32.0	24.8	29.0	67.1	44.2	25.9
P2I	53.3	53.2	56.0	53.9	63.3	53.2	32.0	20.7	35.5	57.8	41.2	24.5
P3I	51.5	51.6	51.6	51.6	61.0	51.6	32.0	35.2	51.1	55.0	40.5	39.3

小浪底年平均拦沙 2 亿 t 情境下,下游河道可以基本实现全年冲淤平衡。

4 结 语

针对黄河流域现状缺水配置、减量配置及再优化配置的客观需求,提出了一种适用于分水方案调整的增量动态均衡配置方法。该方法从流域层面统筹用水的效率因素和公平因素进行水资源增量的均衡配置。本文研究首先考虑调减河北省和天津市引黄水量指标,再视南水北调东、中线后续工程建设以及向黄河下游引黄地区的配置水量、配套工程和相关政策支持情况,调减河南和山东省分水指标,采用提出的增量动态均衡配置方法进行全流域水量分配。通过对不同情景下黄河分水方案优化调整策略和变化幅度的研究,可以看出分水方案优化调整策略为上游配置占比增加、中游配置占比微增、下游及河北省和天津市配置占比减少,调整幅度分别为上游 2.13% ~ 2.78%、中游 0.25% ~ 0.31%、下游及河北省和天津市 -3.81% ~ -2.38%。黄河分水方案调整十分复杂,本次研究仅仅进行了一些初步的探索,一些问题仍需要进一步深化研究,包括变化环境下下游河道内生态用水和输沙用水量,南水北调东、中线工程对黄河下游地区供水的可能性、可行性以及合理规模等。另外,分水方案调整需要开展规划层面的技术方案研究以及后续大量的管理协调工作。

参考文献:

- [1] 王浩,赵勇.新时期治黄方略初探[J].水利学报,2019,50(11):1291-1298. (WANG Hao, ZHAO Yong. Preliminary study on harnessing strategies for Yellow River in the new period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(11):1291-1298. (in Chinese))
- [2] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J].资源科学,2020,42(1):29-36. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020,42(1):29-36. (in Chinese))
- [3] 王煜,彭少明,武见,等.黄河“八七”分水方案实施 30a 回顾与展望[J].人民黄河,2019,41(9):6-13. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years[J]. Yellow River, 2019,41(9):6-13. (in Chinese))
- [4] 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 Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, 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))
- [5] 王煜,彭少明,尚文秀,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 Yu, PENG Shaoming, SHANG Wenxiu, 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))
- [6] 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 Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. 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))
- [7] 付湘,陆帆,胡铁松.利益相关者的水资源配置博弈[J].水利学报,2016,47(1):38-43. (FU Xiang, LU Fan, HU Tiesong. Game theory in water resources allocation for stakeholders[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(1):38-43. (in Chinese))
- [8] 李原园,曹建廷,黄火键,等.国际上水资源综合管理进展[J].水科学进展,2018,29(1):127-137. (LI Yuanyuan, CAO Jianting, HUANG Huojian, et al. International progresses in integrated water resources management[J]. Advances in Water Science, 2018,29(1):127-137. (in Chinese))
- [9] 白涛,阚艳彬,畅建霞,等.水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J].水科学进展,2016,27(1):116-127. (BAI Tao, KAN Yanbin, CHANG Jianxia, et al. Single-multi-objective operation models and its application on the regulation of water and sediment by cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2016,27(1):116-127. (in Chinese))
- [10] 王浩,刘家宏.国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J].中国水利,2016(17):7-9. (WANG Hao, LIU Jiahong. Collaboration of national water resources with eco-social system in China[J]. China Water Resources, 2016(17):7-9. (in Chinese))
- [11] SHEN Xiaojing, WU Xu, XIE Xinmin, et al. Synergetic theory-based water resource allocation model[J]. Water Resources Management, 2021,35:2053-2078.
- [12] 黄显峰,石志康,金国裕,等.基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J].水资源保护,2020,36(4):47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint[J]. Water Resources Protection, 2020,36(4):47-51. (in Chinese))
- [13] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的

- 黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [14] 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 Jian, MING Guanghui, ZHOU Xiangnan, et al. Forecasting of water demand hierachy in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 31-37. (in Chinese))
- [15] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on energy theory[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [16] 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 Yu, PENG Shaoming, WU Jian, 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))
- [17] 余真真, 闫莉, 王瑞玲, 等. 多目标协控下伊洛河自净需水流量研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 38-42. (YU Zhenzhen, YAN Li, WANG Ruiling, et al. Study on self-purification water demand flow in the Yiluo River under multi-objective coordination control[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 38-42. (in Chinese))
- [18] 孟望生, 邵芳琴. 黄河流域环境规制和产业结构对绿色经济增长效率的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 24-30. (MENG Wangsheng, SHAO Fangqin. Influence of environmental regulation and industrial structure on the growth efficiency of green economy in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 24-30. (in Chinese))
- [19] 李小平, 李勇, 曲少军. 黄河下游洪水冲淤特性及高效输沙研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 71-73. (LI Xiaoping, LI Yong, QU Shaojun. Study on characteristics of flood scour and fill and high efficient sediment transport of the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2010, 32(12): 71-73. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-17 编辑: 施业)

(上接第 38 页)

- [15] 何宏谋, 付新峰, 蔡大应. 黄河下游傍河地下水开采对河川径流量的影响[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 59-61. (HE Hongmou, FU Xinfeng, CAI Daying. Influence of riverside groundwater exploitation on river runoff in the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2008, 30(12): 59-61. (in Chinese))
- [16] 王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 157-162. (WANG Hao, JIA Yangwen, WANG Jianhua, et al. Evolutionary laws of the Yellow River Basin's water resources under the impact of human activities[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 157-162. (in Chinese))
- [17] 田景环, 崔庆, 徐建华, 等. 黄河流域大中型水库水面蒸发对水资源量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(3): 70-73. (TIAN Jinghuan, CUI Qing, XU Jianhua, et al. Surface-evaporation of large and middle reservoirs affects the counout of water resource in the Yellow River valley[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 36(3): 70-73. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [19] 贾绍凤. 根据植被估算黄土高原的自然侵蚀和加速侵蚀: 以安塞县为例[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 25-32. (JIA Shaofeng. Estimation of natural erosion and accelerated erosion of human action on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(4): 25-32. (in Chinese))
- [20] 刘红珍, 李保国, 张学成, 等. 黄河流域水文设计成果修订研究[J]. 水文, 2019, 39(2): 81-85. (LIU Hongzhen, LI Baoguo, ZHANG Xuecheng, et al. Study on the revision of hydrological design results in the Yellow River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(2): 81-85. (in Chinese))
- [21] 史辅成, 慕平, 王玉峰. 黄河流域下垫面变化对径流量影响的讨论[J]. 人民黄河, 2005, 27(1): 21-22. (SHI Fucheng, MU Ping, WANG Yufeng. Discussion on the influence of underlying surface changes on amount of runoff in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2005, 27(1): 21-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-22 编辑: 俞云利)

