第34卷第1期
2023年 2月
水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering
Vol. 34 No. 1
Feb. ,2023

DOI:10.11705/j. issn. 1672-643X. 2023. 01. 01

引黄灌区水资源调配模型及和谐评估

陶 洁[1,2,3], 李 行[1], 孙鑫豪[1], 路振广[4], 左其亭[1,2,3]

(1. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省地下水污染防治与修复重点实验室, 河南 郑州 450001; 4. 河南省水利科技应用中心, 河南 郑州 450000)

摘 要: 基于引黄灌区普遍特征及存在的水资源问题,构建考虑水资源、经济社会和生态环境多维目标的水资源优化调配模型,建立引黄灌区水资源和谐评估指标体系,并将模型和评估体系应用到赵口引黄灌区二期工程。基于模型解集中选取的4种代表性优化调配方案进行水资源、经济社会、生态环境的效益分析,选定 P_4 方案为赵口二期水资源多目标优化调度方案,并基于该方案开展和谐评估和多方案调控研究。结果表明:模型优化后灌区和谐度明显提高,通过对和谐度较低的地下水开采率、农业用水比例、城镇化率、人均粮食产量、绿化覆盖率等指标调控后,和谐度可进一步提高到0.790。

关键词: 水资源调配模型; 和谐评估; 和谐调控; 赵口引黄灌区二期工程; 引黄灌区

中图分类号:TV213.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2023)01-0001-09

Water resources allocation model and harmony evaluation of the Yellow River Irrigation Area

TAO Jie[1,2,3], LI Hang[1], SUN Xinhao[1], LU Zhenguang[4], ZUO Qiting[1,2,3]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 2. *Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 3. *Henan Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Rehabilitation*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 4. *Henan Water Science and Technology Application Center*, *Zhengzhou* 450000, *China*)

Abstract: Based on the general characteristics and existing water resources problems of the Yellow River Irrigation Area, the water resources optimal allocation model considering the multi-dimensional objectives of water resources, social economy and ecological environment is constructed, and the harmony evaluation index system of water resources is established. Then, they are applied to the second phase of Zhaokou Yellow River Irrigation Area Project. In the solution set of this model, four representative optimal allocation schemes are selected to analyze the benefits of water resources, social economy and ecological environment. And the scheme P_4 is selected as the multi-objective optimal scheduling scheme, which is then applied to the harmony evaluation and multi-scheme regulation. The results show that the harmony degree of the irrigation area is significantly improved after model optimization. After the regulation of the indices with low harmony, such as groundwater exploitation rate, agricultural water use ratio, urbanization rate, grain yield per capita and green coverage rate, the harmony degree is further improved to 0.790.

Key words: water resources allocation model; harmony evaluation; harmonious regulation; the second phase of Zhaokou Yellow River Irrigation Area Project; the Yellow River Irrigation Area

1 研究背景

近些年来,由于区域经济发展、水源情势丰枯变化以及统一调度缺乏的共同影响,黄河下游多数引黄灌区水资源短缺风险不断增加,严重制约了其和谐可持续发展[1]。水资源优化调配技术是解决区域多水源、

收稿日期:2022-06-04; **修回日期**:2022-10-03
基金项目:引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021002);河南省水利科技攻关计划项目(GG202022);国家重点研发计划课题(2021YFC3200201)
作者简介:陶 洁(1986-),女,江苏盐城人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事河流生态水文、水环境与水资源管理等研究。
通讯作者:左其亭(1967-),男,河南固始人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

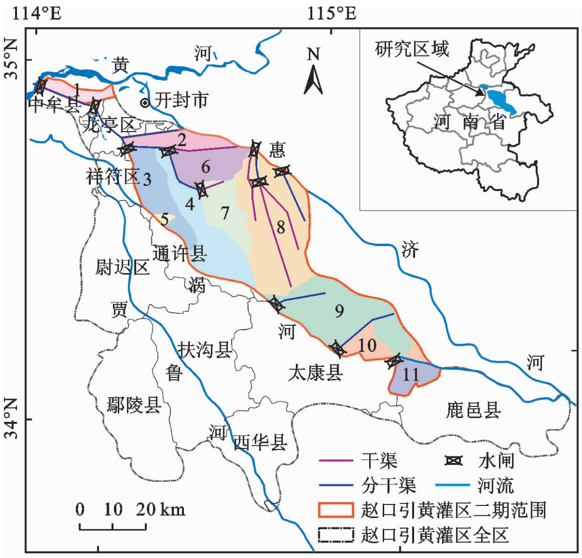
多用户水量分配矛盾的有效手段[2]。现阶段已形成较成熟的水资源优化调配技术[3]。如金菊良等[4]提出依据最小相对熵原理确定区域水资源分配权重的新方法;黄强等[5]基于流域水资源分配网络节点图建立了水资源优化配置模型。桑学锋等[6]基于二元水循环理论和水资源配置理论,建立了水资源综合模拟与调配一体化模型。但是目前从人水和谐角度对水资源调配方案进行优化的研究不多。“人水和谐”是我国现代治水的主导思想,其基本思路就是采取一系列措施使人和水的关系达到一种和谐的状态[7]。人水和谐理论的意义就是解决人水系统中的多方矛盾,以促进多方和谐共生[8]。因此从人水和谐角度优化引黄灌区水资源调配是可行且有意义的。

鉴于此,本文面向引黄灌区特征和面临的现状,构建协同灌区水资源-经济社会-生态环境多维度的优化调配模型和水资源和谐评估指标体系,并应用于赵口引黄灌区二期工程,研究以期为合理制定引黄灌区水资源调配方案,推进其和谐发展提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

赵口引黄灌区二期工程(简称“赵口二期”)是赵口引黄灌区的重要组成部分,位于河南省黄河南岸豫东平原,属淮河流域,总土地面积 2 174 km^2,涉及郑州市的中牟县和开封市的鼓楼区、城乡一体化示范区、祥符区、通许县、杞县以及周口市的太康县和商丘市的柘城县。工程范围内有涡河、惠济河两条主要河流,以及多条人工沟渠和多座拦河闸。区域用水以地下水和引黄水为主,主要保障农业用水,兼顾生产、生活用水。灌区内旱涝等自然灾害时有发生,盐碱化问题目前基本消除。然而现状年多数河沟淤积严重,因此赵口二期工程的主要任务就是对现有灌排工程系统进行改扩建。工程已于 2019 年 12 月开工,总工期 32 个月,拟建设渠道 31 条,治理河道 28 条,设计灌溉面积 14.7×10^4 hm^2。通过采用井、渠、河结合的灌排合一供水体系,实现灌区水资源的高效开发利用,缓解供需矛盾,改善灌区生态环境。赵口引黄灌区二期工程地理位置及范围如图 1 所示。



1.总干灌片 2.东一干灌片 3.朱仙灌片 4.下惠贾灌片 5.姜清沟灌片 6.陈留灌片 7.石岗灌片 8.惠济灌片 9.幸福灌片 10.团结灌片 11.宋庄灌片

注:该图是对赵口二期工程初设报告中的灌溉分区图经过校正配准后绘制而成。

图 1 赵口引黄灌区二期工程地理位置及范围示意图

2.2 单元节点

根据赵口二期地形、地貌、土壤、气象水文条件、工程建设和布局,以及行政区划情况,以主要渠系和输水河道为主线,以重要引水闸和节制闸为控制节点,将赵口二期分为 11 个灌片(图 1);并以灌片为计算单元,结合河流渠系分布状况,确定各灌片节点水力联系,赵口二期工程各灌片节点关系如图 2 所示。

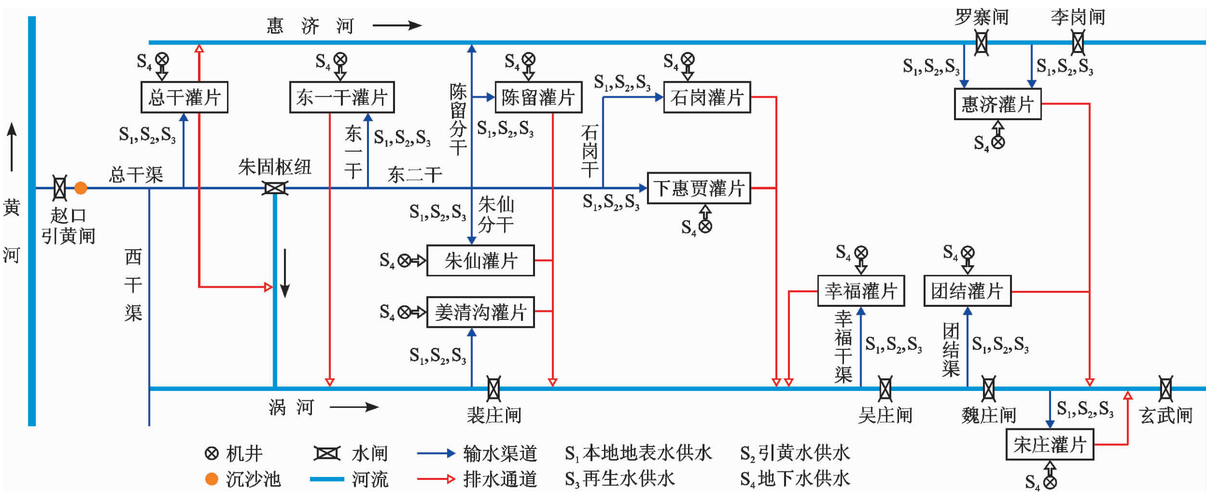


图 2 赵口引黄灌区二期工程各灌片节点关系图

2.3　数据来源

研究包含水资源、经济社会和生态环境三个维度的多种数据,主要来源于《河南省赵口引黄灌区二期工程初步设计报告》(2019 年),其中部分数据参考 2000－2015 年河南省及其地级市统计年鉴与水资源公报、黄河与淮河流域综合规划,用水定额的确定依据河南省地方标准 DB41/T 385—2014、DB41/T 985—2014,并参考最新的河南省地方标准 DB41/T 385—2020、DB41/T 985—2020。

3　研究方法

3.1　水资源调配模型

目前引黄灌区中大中型灌区偏多,灌区范围内以渠系工程为主,水源结构复杂,多以引黄水和地下水为主,区域经济社会欠发达,用水以农田灌溉为主。灌区普遍存在地表水开发利用程度低、地下水超采严重、生态水源不足以及供需矛盾突出、水资源利用效率偏低、工程老化和管理环节薄弱等问题[9-11]。

3.1.1　目标函数　灌区水资源调配研究涉及水资源、经济社会和生态环境 3 个维度。调配模型目标函数也从该 3 个维度进行设置。其中水资源维度以总缺水量最小 $W(x)$ 为目标;经济社会维度以供水经济效益最大 $S(x)$ 为目标;生态环境维度以生态用水满足度最大 $E(x)$ 为目标。模型目标函数如下,模型构建符号说明见表 1。

$$\begin{cases} W(x) = \min \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{4} \sum_{t=1}^{m} \left[\left(D_{k,j,t} - \sum_{i=1}^{4} R_{ij} x_{k,i,j,t} \right) / D_{k,j,t} \right] \\ S(x) = \max \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} \left(e_j R_{ij} \sum_{k=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} x_{k,i,j,t} \right) \\ E(x) = \max \sum_{k=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} \left(\sum_{i=1}^{4} x_{k,i,4,t} / D_{k,4,t} \right) \end{cases} \tag{1}$$

表 1　水资源调配模型构建符号说明表

符号	含义	取值范围及解释说明	单位
i	供水水源	$i=1$(当地地表水)、2(引黄水)、3(其他水)、4(地下水)	
j	用水户	$j=1$(生活用水)、2(工业用水)、3(农业用水)、4(生态用水)	
k	计算单元	$k=1$(总干灌片)、2(东一干灌片)、3(朱仙灌片)、4(下惠贾灌片)、5(姜清沟灌片)、6(陈留灌片)、7(石岗灌片)、8(惠济灌片)、9(幸福灌片)、10(团结灌片)、11(宋庄灌片)	
t	调配时段	调配时段为年时,$t=1$;调配时段为月时,$t\in[1,12]$	
R_{ij}	配水关系	水源 i 向用水户 j 的配水关系,0 表示不配水,1 表示配水。	
$D_{k,j,t}$	需水量	调配时段 t 内分区 k 用水户 j 的需水量	$10^4\ m^3$
$x_{k,i,j,t}$	分配水量	调配时段 t 内分区 k 中水源 i 向用水户 j 的分配水量	$10^4\ m^3$

3.1.2　约束条件　约束条件包括供水约束、需水约束和变量非负约束。

(1) 需水约束:各用水户的需水量不超出其需水量的上、下限。

$$\sum_{t=1}^{m} D_{k,j_{\min},t} \leqslant \sum_{i=1}^{4} \sum_{t=1}^{m} x_{k,i,j,t} \leqslant \sum_{t=1}^{m} D_{k,j_{\max},t} \tag{2}$$

式中:$D_{k,j_{\max},t}$、$D_{k,j_{\min},t}$ 分别为不同时段 t 分区 k 用水户 j 的需水量上下限,$10^4\ m^3$。

(2) 供水约束:各水源供水量不超过其可供水量。

$$\sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{4} \sum_{t=1}^{m} x_{k,i,j,t} \leqslant \sum_{k=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} S_{k,i,t} \tag{3}$$

式中:$S_{k,i,t}$ 为不同时段 t 分区 k 水源 i 的可供水量,$10^4\ m^3$。

(3) 非负约束:

$$x_{k,i,j,t} \geqslant 0 \tag{4}$$

3.1.3　模型参数　(1) 用水净效益系数 e_j 和配水关系 R_{ij}。用水效益系数利用单位水资源产生的经济效益表示,通过查阅相关文献资料[12-14],并结合引黄灌区不同水平年经济社会发展状况综合确定。配水关系应考虑引黄灌区实际情况,按照一定规则,实现多水源多用户的联合调配。一般情况下引黄灌区配水关系如表 2 所示,其中 1 表示配水,0 表示不配水。实际应用时可具体分析。

表 2　一般情况下引黄灌区水源向用水户配水关系

水源	生活	工业	农业	生态环境
当地地表水	0	0	1	0
黄河水	0	1	1	0
再生水	0	1	0	1
地下水	1	1	1	0

(2)需水量上、下阈值 $D_{j_{\max}}$、$D_{j_{\min}}$。水资源系统中

各用水户需水量存在阈值范围，超过其范围均会造成水资源系统的退化甚至崩溃。为保障灌区内人民基本生活、粮食用水安全、生态环境用水的需求，并考虑工业和商品服务业用水特征，确定生活需水量的上、下阈值均取生活需水量预测值；农业需水量的上、下阈值分别取农业需水量预测值及其值的75%；工业和商品服务业用水需水量的上、下阈值分别取相应的需水量预测值及其值的80%；生态环境需水量的上、下阈值分别取生态环境需水量预测值及其值的70%。

3.1.4 模型求解 采用带经营策略的快速非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II 算法)[15]来求解模型。该算法通过非支配快速排序和拥挤距离筛选个体，提供多种决策方案供参考，对解决水资源优化调配问题具有良好的适用性[16]。算法函数[17]如下：

$$[x, fval] = \mathrm{gamultiobj}(fitnessfcn, nvars, \boldsymbol{A}, b, \boldsymbol{Aeq}, beq, lb, ub, options) \quad (5)$$

式中：x 为决策变量；$fval$ 为 x 对应的函数值；$fitnessfcn$ 为模型目标函数；$nvars$ 为变量个数；$\boldsymbol{A}$、b 分别为线性不等式约束矩阵及其约束值；$\boldsymbol{Aeq}$、beq 分别为线性等式约束矩阵及其约束值，即 $\boldsymbol{A} \cdot x \leqslant b$，$\boldsymbol{Aeq} \cdot x = beq$；$lb$ 和 ub 分别为 x 的下限和上限；$options$ 为算法的参数设置。

3.2 和谐评估

结合引黄灌区实际特征和存在的水资源问题，通过理论分析、相关文献频率统计、专家咨询等方法，从水资源、经济社会和生态环境 3 个维度筛选合适的和谐评估指标，按照“目标 - 准则 - 分类 - 指标”4 个层次构建引黄灌区水资源和谐评估指标体系(表 3)，并参考相关文献[18-20]与地区发展规划，综合确定各指标节点值(表 4)。

表 3 引黄灌区水资源和谐评估指标体系

目标层	准则层	分类层	指标层		
			指标名称	指标序号	指标单位
引黄灌区人水和谐	水资源	水资源现状	单位面积水资源量	X_{1101}	$10^4\ m^3 \cdot km^{-2}$
			人均水资源占有量	X_{1102}	m^3
		水资源开发	本地地表水开发利用率	X_{1201}	%
			地下水开采率	X_{1202}	%
			引黄水供水比例	X_{1203}	%
		水资源利用	生活用水比例	X_{1301}	%
			农业用水比例	X_{1302}	%
			工业用水比例	X_{1303}	%
	经济社会	社会	人口自然增长率	X_{2101}	‰
			城镇化率	X_{2102}	%
			人均综合用水量	X_{2103}	m^3
			恩格尔系数	X_{2104}	%
			人均粮食产量	X_{2105}	kg
			农村居民收入	X_{2106}	10^4 元
		经济	人均 GDP	X_{2201}	10^4 元
			GDP 增长率	X_{2202}	%
			工业产值占 GDP 比重	X_{2203}	%
		科技	万元 GDP 用水量	X_{2301}	m^3
			万元工业增加值用水量	X_{2302}	m^3
			单位面积灌溉用水量	X_{2303}	$m^3 \cdot hm^{-2}$
			灌溉水利用系数	X_{2304}	
			人均日生活用水量	X_{2305}	L
	生态环境	环境	绿化覆盖率	X_{3101}	%
			生态用水满足度	X_{3102}	%
		保护	污水处理率	X_{3201}	%
			环保投资占 GDP 比重	X_{3202}	%
			公众环保意识	X_{3203}	

表 4　引黄灌区水资源和谐评估各指标节点值

指标序号	最差值 a	较差值 b	及格值 c	较优值 d	最优值 e	指标方向
X_{1101}	0.1	1	5	15	25	正向
X_{1102}	100	400	1000	1500	2400	正向
X_{1201}	1	10	30	50	70	正向
X_{1202}	150	100	80	60	30	逆向
X_{1203}	5	10	20	30	50	正向
X_{1301}	3	6.5	9	11	14	正向
X_{1302}	90	80	60	50	40	逆向
X_{1303}	7	13.5	28	45	60	正向
X_{2101}	10	7	5.7	3.8	2	逆向
X_{2102}	15	25	35	50	70	正向
X_{2103}	800	660	520	360	200	逆向
X_{2104}	60	55	50	40	30	逆向
X_{2105}	80	200	400	700	1000	正向
X_{2106}	3000	5000	10000	15000	25000	正向
X_{2201}	1	2	5	10	15	正向
X_{2202}	2	3.5	5	6.5	8	正向
X_{2203}	20	32.5	45	52.5	60	正向
X_{2301}	610	355	100	60	20	逆向
X_{2302}	200	160	120	65	10	逆向
X_{2303}	600	487.5	375	300	225	逆向
X_{2304}	0.2	0.4	0.6	0.8	0.95	正向
X_{2305}	5	30	65	85	110	正向
X_{3101}	5	10	20	30	40	正向
X_{3102}	5	30	60	85	100	正向
X_{3201}	5	30	60	85	100	正向
X_{3202}	1	1.5	2	3	5	正向
X_{3203}	20	40	60	75	90	正向

采用“单指标量化－多指标综合－多准则集成”评价方法(即“SMI－P”方法)[21],评估引黄灌区水资源和谐度。其中:①单指标量化,采用分段模糊隶属度计算单指标和谐度。函数分为 5 段,并将对应的5 个特征值($a\sim e$)的和谐度分别定为0、0.3、0.6、0.8、1.0[21]。②多指标综合,运用层次分析法[22]和熵权法[23]分别计算各指标的主、客观权重,再利用最小相对熵原理[24]得到各指标综合权重,进而计算水资源、经济社会和生态环境 3 个维度的和谐度。③多准则集成,对各维度和谐度进一步加权得到灌区综合和谐度。为了直观地反映引黄灌区和谐水平,设置 7 个和谐等级(表 5)。

4　结果与分析

4.1　供需预测结果

以 2015 年为现状年,利用定额法开展规划年2030 年的供需水预测,其中农田灌溉用水定额是在综合考虑赵口二期灌溉用水现状、规划年作物种植结构、节水措施推广、不同灌溉方式和田面损失后综合确定,预测结果如图 3 所示。

由图 3 可知,保证率 P ＝50% 条件下,2030 年赵口二期可供水总量为 65 427.5×10^4 m^3,总需水量为 64 726.1×10^4 m^3,可供水量有所富余,各用水户用水过程可得到保障;但 P ＝75% 条件下,可供水总量为 62 042.6×10^4 m^3,总需水量为 68 278.6×10^4 m^3,缺水量为 6 236.0×10^4 m^3,各灌片将出现不同程度的缺水。

4.2　优化调配结果

利用 MATLAB 编程,运行模型后求得 Pareto 最优解集。按照对各维度目标效益的侧重,从解集中选择 4 种有代表性的优化调配方案,分别记作 $P_1\sim P_4$。其中:P_1 侧重水资源效益,P_2 侧重经济社会效益,P_3 侧重生态环境效益,P_4 综合考虑平衡水资源、经济社会、生态环境三者间的效益。规划年不同保证率下调配方案见表 6。

4.3　方案效益分析

为了进一步优选方案,依据表 6 中水资源调配结果,比较规划年 $P_1\sim P_4$ 方案下的缺水率、经济效益和生态用水满足度,分别代表不同方案的水资源、经济社会和生态环境效益,结果如图 4～6 所示。

综合图 4～6 来看,P_1 方案体现了灌区间水资源的公平分配,但各用水户均存在一定程度缺水,经济效益不高。P_2 方案经济效益最大,但农业和生态环境缺水量较大,生态环境效益最低。P_3 方案生态用水满足度最高,但工业缺水较大,经济效益最低。P_4 方案水资源效益与 P_1 方案相近,但经济和生态效益均比 P_1 方案大,体现了各维度之间的协调发展。故选取 P_4 方案作为赵口二期规划年水资源优化调配方案,且方案年内调配结果如图 7 所示。

表 5　引黄灌区水资源和谐等级

和谐度	0	(0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1)	1.0
和谐等级	完全不和谐	较不和谐	基本不和谐	接近和谐	基本和谐	较和谐	完全和谐

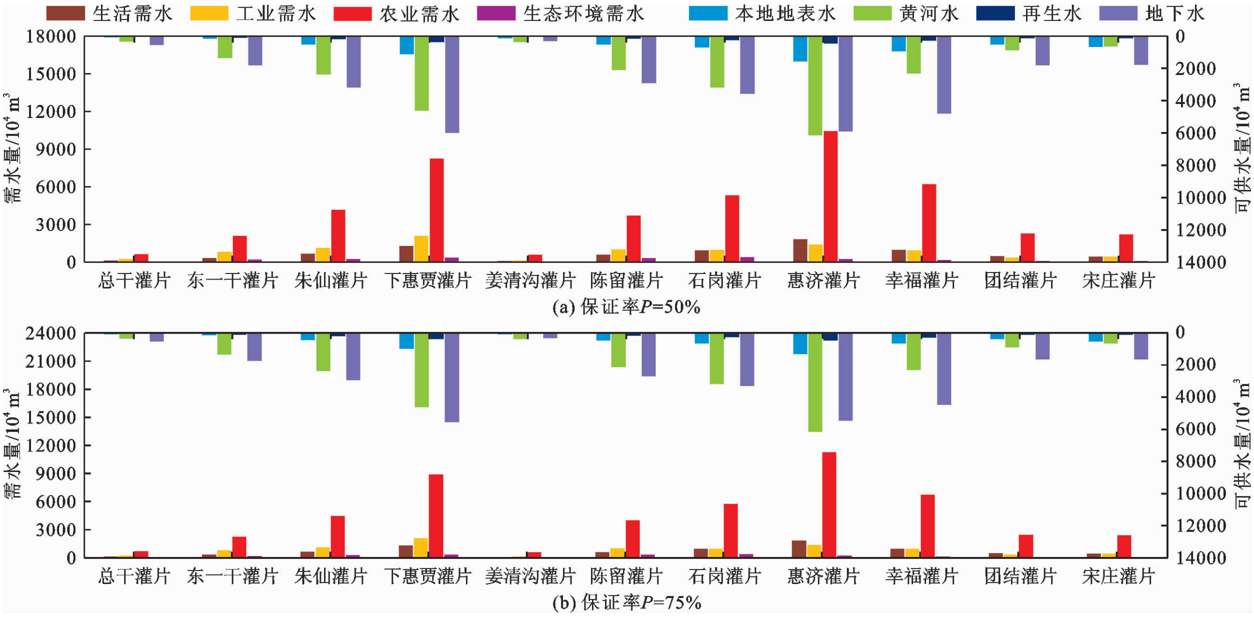


图3 2030年50%、75%保证率下赵口二期水资源供、需量预测结果

表6 2030年不同保证率下赵口二期水资源4种优化调配方案 10^4 m^3

方案	用水户	P =50%					P =75%				
		本地地表水	引黄水	再生水	地下水	合计	本地地表水	引黄水	再生水	地下水	合计
P_1	生活	0	0	0	7583.8	7583.8	0	0	0	7583.8	7583.8
	工业	0	1159.5	1187.4	7036.9	9383.8	0	1062.4	1087.9	6447.6	8598.0
	农业	5781.7	23219.8	0	16759.1	45760.6	5571.5	22375.6	0	16149.8	44096.9
	生态环境	0	889.0	1108.8	0	1997.8	0	785.0	979.0	0	1764.0
P_2	生活	0	0	0	7583.8	7583.8	0	0	0	7583.8	7583.8
	工业	0	1159.9	1205.6	7018.3	9383.8	0	1125.9	1170.3	6813.1	9109.4
	农业	5839.4	23377.6	0	16543.6	45760.6	5571.5	22304.7	0	15784.4	43660.6
	生态环境	0	937.3	1060.6	0	1997.8	0	792.3	896.6	0	1688.9
P_3	生活	0	0	0	7583.8	7583.8	0	0	0	7583.8	7583.8
	工业	0	1140.4	1053.3	7190.2	9383.8	0	1038.6	959.2	6548.4	8546.2
	农业	5805.0	23233.7	0	16721.9	45760.6	5571.5	22298.9	0	16049.1	43919.4
	生态环境	0	887.6	1110.2	0	1997.8	0	885.5	1107.7	0	1993.2
P_4	生活	0	0	0	7583.8	7583.8	0	0	0	7583.8	7583.8
	工业	0	1319.0	1015.2	7049.6	9383.8	0	1072.9	1072.9	6505.0	8650.8
	农业	6661.9	21251.6	0	17847.2	45760.6	5571.5	22357.8	0	16092.4	44021.7
	生态环境	0	0	1997.8	0	1997.8	0	792.3	994.1	0	1786.4

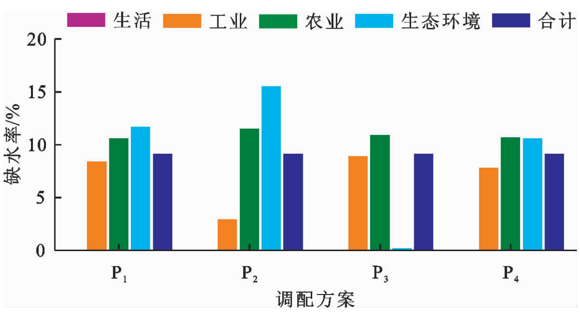


图4 2030年方案 $P_1 \sim P_4$ 的缺水情况(P=75%)

4.4 和谐评估与调控

依据上述和谐评估方法计算出赵口二期不同水平年各维度及综合和谐度,如图8所示。由图8可知,现状年2015年赵口二期综合和谐度为0.614,刚达到"基本和谐";其中水资源维度和谐度最低,仅为0.407,从侧面反映出灌区水资源供需矛盾突出;2015年经济社会和生态环境维度和谐度相对较高,分别为0.640和0.612,说明现状年赵口二期经济发展良好,且具有一定的生态环境保护基础。规

划年 2030 年通过模型调配后,在 50% 和 75% 保证率下全区综合和谐度分别达到 0.747 和 0.716,均达到“基本和谐”。其中,水资源维度和谐度在 50% 和 75% 保证率下分别提升至 0.680 和 0.672;经济社会维度分别提升至 0.740 和 0.736,生态环境维度分别提升至 0.790 和 0.694。综合来看,通过优化调配后规划年赵口二期和谐度有明显提升,但仍有一定的提升空间。

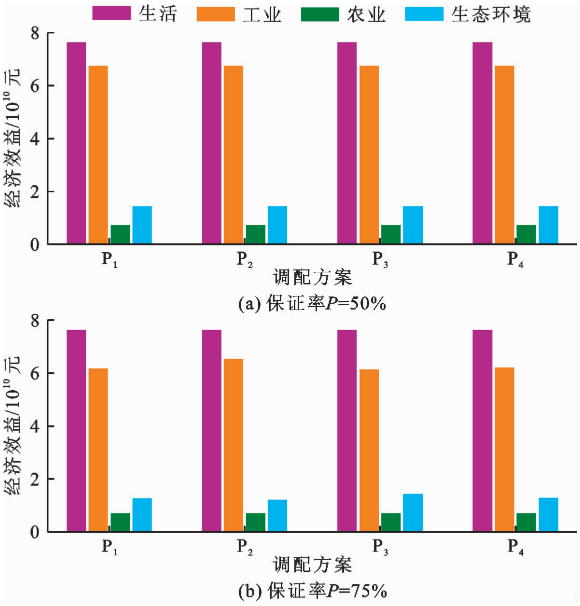


图 5　2030 年不同保证率下方案 $P_1 \sim P_4$ 的经济效益

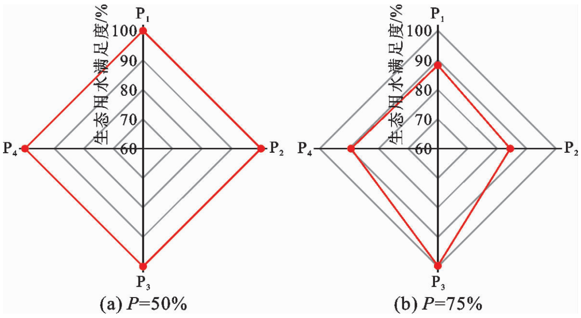


图 6　2030 年不同保证率下方案 $P_1 \sim P_4$ 的生态用水满足度

将优化调配方案 P_4 记为基础方案 F_0。基于和谐评估结果,综合考虑指标可操作性,选择部分和谐度较低的指标作为赵口二期和谐度多维调控指标,并按照表 4 中对应的节点值确定其调控范围,具体如表 7 所示。

根据基础方案 F_0 和谐度评价结果,结合赵口二期实际情况及发展规划,将水资源、经济社会、生态环境和谐度调控目标分别设为 0.70、0.75、0.80。在此基础上,对各维度调控指标在其调控范围内向下阶梯取值,作为不同调控方案中各指标调控值,并将其排序组合,共得到 36 个调控方案,记作 $F_1 \sim F_{36}$。以 P =50% 保证率为例,计算得到所有调控方案 $F_1 \sim F_{36}$对应的和谐度结果,并筛选出各维度和谐度达标的 8 种有效方案及其和谐度结果,具体如表 8 ~9 所示。

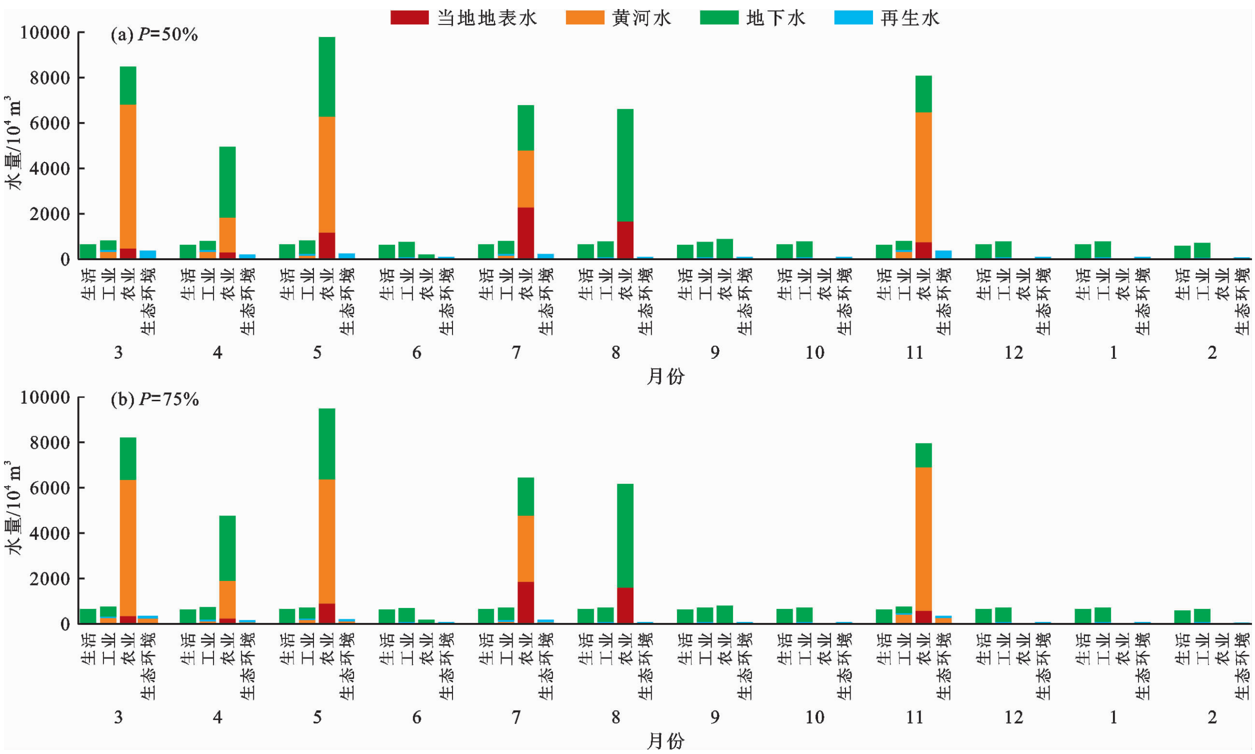


图 7　赵口二期不同保证率下 2030 年水资源年内优化调配结果

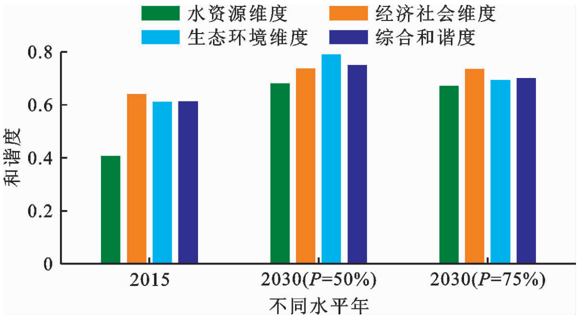


图 8 不同水平年赵口二期各维度及综合和谐度

结合表 8 ~ 9 可知，当地下水开采率控制在 70%、农业用水比例控制在 60%、城镇化率控制在 35%、人均粮食产量控制至 400 kg、绿化覆盖率控制在 30% 时，灌区各维度和谐度均达标，综合和谐度达到 0.790（方案 F_{36}），接近“较和谐”，和谐度较基本方案 F_0 有明显提升。

5 讨 论

（1）本文构建的引黄灌区水资源调配时间尺度为年和月，从指导渠系工程实际调度运行角度，有必要进一步细化时间尺度到旬、天、实时。同时引黄灌区水循环转化机制非常复杂，涉及外调引黄水、当地地表水、土壤水、地下水、再生水等，后续调配模型构建中可以引入灌区地表 - 土壤 - 地下的水文模拟模型，用以描述引黄灌区复杂的水循环转化过程。

表 7 赵口二期和谐度多维调控指标及其调控范围

维度	调控指标	规划年取值	最差值	最优值
水资源	地下水开采率 X_{1202} /%	84.6	150	30
	农业用水比例 X_{1302} /%	70.7	90	40
经济社会	城镇化率 X_{2102} /%	26.4	15	70
	人均粮食产量 X_{2105} /kg	333.3	80	1000
生态环境	绿化覆盖率 X_{3101} /%	5.0	5	40

表 8 赵口二期和谐度多维调控有效方案

方案	水资源调控指标		经济社会调控指标		生态环境调控指标
	X_{1202} /%	X_{1302} /%	X_{2102} /%	X_{2105} /kg	X_{3102} /%
F_{16}	75	70	35	400	30
F_8	80	65	35	400	30
F_{28}	70	70	35	400	30
F_{20}	75	65	35	400	30
F_{12}	80	60	35	400	30
F_{32}	70	65	35	400	30
F_{24}	75	60	35	400	30
F_{36}	70	60	35	400	30

表 9 赵口二期和谐度多维调控有效方案和谐度计算结果

方案	各维度和谐度			综合和谐度
	水资源	经济社会	生态环境	
F_{16}	0.705	0.751	0.823	0.785
F_8	0.708	0.751	0.823	0.785
F_{28}	0.711	0.751	0.823	0.786
F_{20}	0.714	0.751	0.823	0.787
F_{12}	0.718	0.751	0.823	0.787
F_{32}	0.720	0.751	0.823	0.788
F_{24}	0.724	0.751	0.823	0.789
F_{36}	0.730	0.751	0.823	0.790

（2）本文通过理论分析、相关文献频率统计、专家咨询等方法，从水资源、经济社会和生态环境 3 个维度构建了引黄灌区水资源和谐评估指标体系。许多学者也从其他角度选取水资源和谐评价指标，如张金鑫等[25]从发展、效率、协调 3 要素入手选取评价指标；杨丹等[26]从水系统健康度、水文系统发展度、人水系统协调度 3 个维度出发选取评价指标。不同学者选取的评价指标会因研究背景、对象或专业而不同，但指标体系构建和指标节点值设定应该符合研究区域时代特性和未来发展需求。同时在其他引黄灌区（包括灌区）的水资源和谐评估研究及应用过程中，可以根据实际情况对构建的指标体系进行完善修改，使其更具针对性。

（3）利用和谐量化理论技术对水资源优化调配方案进行评估和调控，虽然能够实现促进人水和谐的目的，但是优化调配方案与和谐评估工作属于分阶段的工作，并未形成一个整体，未来有必要将两部分工作深入融合，构建面向灌区多水源循环转化关系的水资源和谐调配模型，真正打造现代化的智慧灌区。

6 结 论

本文构建了考虑水资源、经济社会、生态环境多目标下的引黄灌区水资源优化调配模型和水资源和谐评估体系，并进行了赵口引黄灌区二期工程水资源优化调配方案以及多方案下的和谐评估和调控研

究,主要结论如下:

(1)2030 年 75% 来水保证率下赵口二期工程各灌片出现不同程度缺水,按照对水资源、经济社会、生态环境 3 个维度目标效益的侧重优化调配得到 4 种方案,从总缺水率、供水经济效益、生态用水满足度角度分别对 4 种方案进行效益分析,最终选择 3 个维度均协调发展的 P_4 方案作为最终优化调配方案。

(2)对优选出的 P_4 方案开展和谐评估和调控研究发现,规划年 2030 年水资源优化调配后赵口灌区二期工程和谐度明显提高,但仍有上升空间;进一步对和谐度较低的地下水开采率、农业用水比例、城镇化率、人均粮食产量、绿化覆盖率 5 个指标调控后,灌区和谐度可进一步提高到 0.790,接近“较和谐”等级。

(3)在后续开展引黄灌区水资源调配模型构建工作时,可以引入灌区多水源循环转换关系模拟模型,并深入融合人水和谐评估和调控技术体系,建立基于灌区自然 - 人工多水源循环转换机制的水资源和谐调配模型。

参考文献:

[1] 彭少明,郑小康,严登明,等. 黄河流域水资源供需新态势与对策[J]. 中国水利,2021(18):18 - 20 + 26.

[2] 李 茉,曹凯华,付 强,等. 不确定条件下考虑水循环过程的灌区多水源高效配置[J]. 农业工程学报,2021,37(18):62 - 73.

[3] 樊红梅,刘晓民,刘廷玺,等. 基于空间均衡的水资源合理配置研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):61 - 67.

[4] 金菊良,程吉林,魏一鸣,等. 确定区域水资源分配权重的最小相对熵方法[J]. 水力发电学报,2007,26(1):28 - 32.

[5] 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.

[6] 桑学锋,王 浩,王建华,等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(Ⅰ):模型原理与构建[J]. 水利学报,2018,49(12):1451 - 1459.

[7] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):135 - 144.

[8] 左其亭,邱 曦,符运友,等. 人与自然和谐共生的灌区水利现代化建设框架及实践探索[J]. 人民黄河,2022,44(9):30 - 35 + 45.

[9] 金菊良,沈时兴,崔 毅,等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报,2021,52(5):507 - 520.

[10] 卞艳丽,黄福贵,曹惠提. 黄河下游三刘寨引黄灌区引水能力分析[J]. 人民黄河,2019,41(1):507 - 520.

[11] 王军涛,李根东,宋常吉,等. 黄河灌区高效节水灌溉发展对策与建议[J]. 灌溉排水学报,2021,40(S2):111 - 114.

[12] 张 妍,郭 萍,张 帆. 黑河中游农业水资源多目标优化配置[J]. 中国农业大学学报,2019,24(5):185 - 192.

[13] 刘寒青,赵 勇,李海红,等. 基于区间两阶段随机规划方法的北京市水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(4):34 - 41 + 137.

[14] 成 波,李怀恩,徐梅梅. 西安市农业灌溉水效益分摊系数及效益的时间变化研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):244 - 248.

[15] WANG Youzhi, GUO Shanshan, GUO Ping. Crop-growth-based spatially-distributed optimization model for irrigation water resource management under uncertainties and future climate change[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 345: 131182.

[16] XU Wei, CHEN Cong. Optimization of operation strategies for an interbasin water diversion system using an aggregation model and improved NSGA - II algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2020, 146(5): 0402006.

[17] GOORANI Z, SHABANLOU S. Multi - objective optimization of quantitative-qualitative operation of water resources systems with approach of supplying environmental demands of Shadegan Wetland[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292: 112769.

[18] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源 - 经济社会 - 生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):55 - 62.

[19] 于 磊,郭佳航,王慧丽. 区域水资源 - 能源 - 粮食耦合系统和谐评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):437 - 445.

[20] 宋秋英,赵德芳,刘恩民,等. 鲁西北灌区农业水资源特征及评价方法刍议[J]. 灌溉排水学报,2021,40(S1):112 - 116.

[21] 左其亭. 人水和谐论及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[22] ARAUJO J C, DIAS F F. Multicriterial method of AHP analysis for the identification of coastal vulnerability regarding the rise of sea level: Case study in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil[J]. Natural Hazards, 2021, 107: 53 - 72.

[23] 陈雨晴,席海洋,李 斌,等. 改进 TOPSIS 法在甘肃省农村饮水安全评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):27 - 34.

[24] 姜秋香,张舜凯,张 旭,等. 三江平原水资源开发利用程度变化与驱动因素[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(1):74 - 81.

[25] 张金鑫,唐德善,丁亿凡,等. 基于云模型的流域人水和谐评价方法[J]. 水电能源科学,2015,33(9):155 - 158 + 127.

[26] 杨 丹,唐德善,周 祎. 基于正态云模型的人水和谐度评价[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):53 - 58.