

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.008

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王佳炜,韩美,孔祥伦,孔凡彪,魏帆,孙金欣. 基于系统动力学模型的黄河三角洲“三生”用水配置模拟与调控[J]. 西安理工大学学报,2023,39(3):369-378.

WANG Jiawei, HAN Mei, KONG Xianglun, KONG Fanbiao, WEI Fan, SUN Jinxin. Simulation and regulation of water allocation for “production-living-ecological” in the Yellow River Delta by the system dynamics model[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3):369-378.

基于系统动力学模型的黄河三角洲“三生” 用水配置模拟与调控

王佳炜, 韩 美, 孔祥伦, 孔凡彪, 魏 帆, 孙金欣

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250014)

摘要:近年来,黄河三角洲地区人口增加,经济社会发展,但区域水资源短缺问题突出。进行“三生”用水配置有利于缓解水资源矛盾,推动地区高质量发展。本文基于系统动力学模型,综合考虑人口、经济、生态等影响因子,对黄河三角洲“三生”用水配置进行模拟仿真,在敏感性分析的基础上,设置了三种配置情景:①基准情景根据研究区过去十年的实际情况以及未来预期发展趋势进行设定;②生态优先情景以每年完成一定面积,至2030年完成100万亩湿地的生态修复,并且保持生活用水量不受影响为目标;③节水情景通过增加节水灌溉面积、提高中水回用率等多种节水措施来提高水资源利用效率。最后提出研究区“三生”用水配置的建议。结果表明:①在基准情景下,2020—2030年水资源供需比不断缩小,2030年生产用水量约为生活用水量和生态用水量之和的4倍;②在生态优先情景下,生态用水量平均每年增加0.31亿 m^3 ,每年约52.1%的生产用水无法得到满足,2030年水资源供需比达到0.69:1,供水能力严重不足;③在节水情景下,供水系统比基准情景能多提供共3.6亿 m^3 水量,但仍不能弥补生态建设需水缺口。在实施节水政策的基础上,仍需增加黄河分水和其他跨流域调水才能实现黄河三角洲“三生”用水协调和高质量发展。

关键词:系统动力学;“三生”用水;水资源配置;黄河三角洲

中图分类号:TV213.9

文献标志码:A

文章编号:1006-4710(2023)03-0369-10

Simulation and regulation of water allocation for “production-living-ecological” in the Yellow River Delta by the system dynamics model

WANG Jiawei, HAN Mei, KONG Xianglun, KONG Fanbiao, WEI Fan, SUN Jinxin
(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: In recent years, the population in Yellow River Delta has increased and the economy and society have developed, but the regional water resources shortage is of prominence. The allocation of “production-living-ecological” water using is beneficial for alleviating water resource conflicts and promoting high-quality development in the region. By the system dynamics model, this paper comprehensively considers the influencing factors such as population, economy, ecology and so on, and simulates the “production-living-ecological” water using system in the Yellow River Delta. On the basis of sensitivity analysis, three configuration scenarios are set, which are:

收稿日期:2022-04-21; 网络首发日期:2022-10-27

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20221027.1505.002.html>

基金项目:国家社会科学基金资助项目(21BGL026)

第一作者:王佳炜,男,硕士生,研究方向为自然地理学。E-mail:wangjw1117@126.com

通信作者:韩美,女,博士,教授,博导,研究方向为环境变化与区域响应。E-mail:hanmei568568@126.com

①the benchmark scenario is set according to the actual situation of the study area in the past 10 years and the expected development trend in the future; ②The ecological priority scenario aims to complete the ecological restoration of 1 million mu of wetland by 2030 and keep the living water consumption unchanged. ③The water-saving scenario is set to improve the efficiency of water resource utilization through various water-saving measures such as increasing the area of water-saving irrigation and improving the reuse rate of reclaimed water. Finally, suggestions for the optimal allocation of “production-living-ecological” water using in the study area are put forward. The results show that: ①under the benchmark scenario, the supply-demand ratio of water resources is shrinking from 2020 to 2030, and that the production water consumption in 2030 is about 4 times the sum of domestic water consumption and ecological water consumption. ②Under the ecological priority scenario, the average annual increase of ecological water consumption is 31 million m^3 , about 52.1% of the annual production water can not be met, and the supply-demand ratio of water resources will reach 0.69 : 1 in 2030. ③Under the water-saving scenario, the water supply system can provide a total of 360 million m^3 of excess water than the benchmark scenario, but it still can not make up for the water demand gap of ecological construction. Based on implementing the water-saving policy, it is still necessary to increase the water diversion of the Yellow River and other inter basin water transfers in order to realize the coordinated and high-quality development of “production-living-ecological” water using in the Yellow River Delta.

Key words: system dynamics; “production-living-ecological” water using; water resource allocation; Yellow River Delta

水资源是区域无可替代的自然资源,是地区生存和发展的重要限制因素^[1]。近年来,社会经济发展和用水量的不断增加,引发了越来越严重的用水矛盾,水资源合理配置显得尤为重要^[2]。“三生”用水配置是统筹协调生产、生活、生态用水关系,通过合理抑制需求、有效增加供水等手段,以综合效益最大化为目标的水量分配方案^[3]。设计合理的“三生”用水配置方案是解决地区用水矛盾,推动地区经济社会发展的重要手段^[4]。

水资源配置研究始于对水库优化调度问题的探索^[5],美国陆军工程师兵团为了解决6座水库的运行调度问题而设计了最早的水资源模拟模型^[6]。以后逐渐发展到流域水资源的优化分配,许多学者研究了水量配置与经济协调发展的课题,构建了基于宏观经济的水量配置模型^[7-8]。随着研究的持续深入,水资源配置开始从单一目标向多目标发展^[9-10]。一些学者开始关注水资源过度开发利用造成的各种生态问题,研究面向生态的水量配置方法^[11-13],寻求经济发展与生态保护的平衡。部分学者将大气有效降水、土壤水、中水回用等非常规水源纳入区域水资源配置中,丰富了配置的内容^[14-15]。南水北调等跨流域调水工程的实施推动了跨界河流、跨流域水资源配置的研究^[16-17]。还有部分学者结合水质进行了水资源配置研究^[18]。近年来,一些学者提出了将“三生”协调发展理念与多目标水资源配置相结合的新视角,主要运用系统演化方法设计多维决策的

水资源配置方案,综合考虑居民生活、生产建设、生态保护目标,以推动区域的经济-生态发展^[19]。“三生”用水协调发展理念已经融入经济-用水关系、生态水利等多个方向。目前,“三生”用水优化配置研究仍处于探索阶段,研究区域集中在发达城市或干旱半干旱地区,较少涉及河口三角洲等自然地理单元;研究内容侧重于区域水资源优化分配的总体调控,对生产、生活、生态用水之间及其内部更细分要素的相互关系、相互影响研究较少。

黄河三角洲根据形成时间可分为古代三角洲、近代三角洲和现代三角洲。其中,近代三角洲是以宁海为顶点,西起套儿河口,南抵支脉河口的扇形地区。近代黄河三角洲的主体约93%的面积在东营市境内,因此,可以近似用东营市辖区范围作为近代黄河三角洲的范围。考虑到资料的完整性和可获取性,本文的黄河三角洲范围就取为东营市辖区范围^[20]。受自然和人为因素综合影响,黄河三角洲水资源呈现总量少、时空分布不均的特点,黄河来水是东营市淡水的最主要来源,目前全市超过70%的供水来自黄河水^[21]。1950年以来,黄河三角洲人口持续增长,工农业发展迅速,淡水用量持续增加,导致水资源在不同部门、不同地区、不同季节之间的配置矛盾日益突出^[22]。当地天然淡水资源稀缺,加之不合理的水资源开发利用,不仅对城乡居民生活和工农业生产造成了不利影响,而且还导致了三角洲生态环境的持续退化^[23]。近年来,作为黄河三角洲典型生

态系统的湿地生态系统,呈现出面积减少、生态功能退化等一系列问题。因此,对黄河三角洲有限的淡水资源进行优化配置,提高水资源的利用效率,实现社会经济与生态保护同步高质量发展已迫在眉睫^[24]。

鉴于上述问题,本文密切结合黄河三角洲的水资源现状和问题,采用系统动力学方法,综合考虑生产用水、生活用水、生态用水和供水4个子系统及其内部要素间的相互关系,建立了黄河三角洲“三生”用水系统模型,对水资源系统演化态势进行科学模拟,并提出针对性的调控方案,以期为解决黄河三角洲用水矛盾提供科学参考。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文所用数据包括社会经济数据和水资源数据两个部分,时间序列为2011—2020年。所有统计资料均以东营市为行政单元进行统计。社会经济数据主要包括GDP、人口、农业生产数据等,主要来自公开出版的《东营统计年鉴》。水资源数据主要来自《山东省水资源公报》、《山东省水资源综合利用中长期规划》以及相关部门走访调查。生活用水定额等参照《国家用水定额标准》来确定。

1.2 研究方法

目前,常用的水资源配置方法包括:政治经济学方法、生态学方法、人工智能、规划与模糊数学方法和系统动力学方法^[25]等。“三生”用水系统涉及居民生活、经济、生态等诸多因素,各因素之间相互影响、相互联结,共同构成一个复杂的供用水系统^[26]。系统动力学(SD)是一种分析并解决复杂动态问题的方法,它能够建立以信息反馈和因果循环关系为特征,内部各因子相互依赖、相互作用的复杂系统。其本质为一阶微分方程组。系统动力学已被广泛应用于水资源研究的诸多方向,如水资源承载力、水资源配置、水资源开发与规划等^[27]。所以本文采用系统动力学模型进行模拟。系统动力学方程可表示为:

$$LEV(t) = LEV(t - \Delta t) + \Delta t \times [R_1(t - \Delta t) - R_2(t - \Delta t)] (\Delta t > 0) \quad (1)$$

$$LEV(t)/_{(t=t_0)} = LEV(t_0) \quad (2)$$

$$RAT(t) = f_1[LEV(t), A(t), RAT_1(t - \Delta t)] \quad (3)$$

$$A_1(t) = f_2[LEV(t), A_2(t), RAT(t - \Delta t)] \quad (4)$$

其中,式(1)和(2)为流位方程 L ,式中 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 分别为流入率和流出率。式(3)为流率方程 R ,式中 $LEV(t)$ 为方程右边 t 时刻流位变量的值;

$A(t)$ 为方程右边 t 时刻辅助变量的值; $RAT_1(t - \Delta t)$ 为方程右边 $t - \Delta t$ 时刻流率变量的值。式(4)为辅助变量方程 A ,式中 $A_2(t)$ 为方程右边 t 时刻辅助变量的值; $RAT(t - \Delta t)$ 为方程右边 $t - \Delta t$ 时刻流率变量的值。

1.2.1 系统动力学模型的构建

本文应用系统动力学方法建立黄河三角洲“三生”用水配置模型,从“三生”用水协调角度研究黄河三角洲水资源的配置情况,模型的建立通过Vensim PLE软件来实现(见图1)。Vensim是目前常用的系统动力学模拟软件,本文采用的是Vensim PLE 6.2版本,该软件在Windows下运行,具有可视化图形界面,可提供图示化编程建模、结构和数据集分析、真实性检验等功能。

由于黄河三角洲地区缺水严重,水资源短缺对研究区经济、生态影响巨大,因此通过水资源供需比进行调控。模型包括4个子系统:生产用水子系统、生活用水子系统、生态用水子系统和供水子系统。

1.2.2 生产用水子系统

生产用水子系统分为“第一产业用水量”、“第二产业用水量”和“第三产业用水量”三个部分。第一产业用水量包括农田灌溉用水和林牧渔用水。农田灌溉用水受控于农田灌溉面积和节水灌溉率;节水灌溉率的提高使得用水效率提高,农田灌溉用水量减少^[28]。林牧渔用水取决于单位林牧渔GDP用水量和林牧渔GDP增长率。二、三产业用水量均由当年的GDP产值与单位GDP用水量决定,GDP增长导致生产用水量增加,而生产用水量的增加导致水资源供需矛盾突出,反过来对各产业GDP的增长造成不利影响,成为经济发展的桎梏。

1.2.3 生活用水子系统

生活用水子系统由农村生活用水量和城镇生活用水量组成。人口增长率决定了本年度的人口数量,人口数量增长导致了居民生活用水量的上升,居民生活成本提高反过来抑制了人口增长速度^[29]。由于城镇和农村用水量存在明显差异,故引入城镇化率加以区分,参照国家定额标准设定城镇生活用水量和农村生活用水量分别为165 L/(人·d)和100 L/(人·d)。

1.2.4 生态用水子系统

本研究中生态用水由城市绿化用水量、河湖补水量以及湿地生态保护修复用水量组成。城市绿化用水量取决于城市绿化面积的变化;本系统中河湖补水量为常数,取0.3亿 m^3 ;黄河三角洲自然保护区的湿地生态保护修复用水量相对复杂,本研究以湿地补水量来表示。

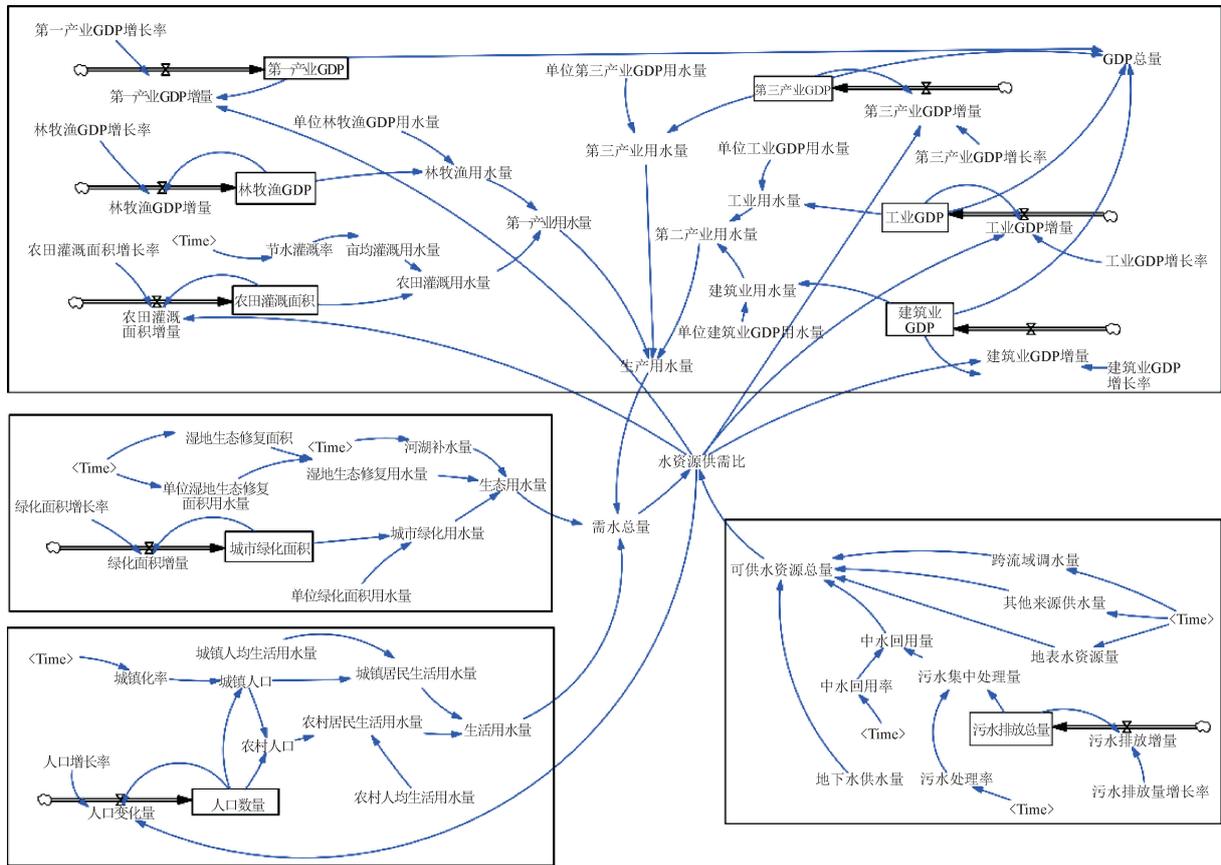


图1 “三生”用水优化配置 SD 流程图

Fig. 1 SD flow chart of “production-living-ecological” water using optimal allocation

1.2.5 供水子系统

考虑到黄河三角洲跨流域调水供水受政策、技术和自然条件的影响,本研究中设定为固定值 7.02 亿 m³。地下水供水具有供水量少、总量稳定、年际变化小和开发潜力有限四个特点,因此参考历史数据将地下水供水量设定为固定值 0.74 亿 m³。

受水利条件改善的影响,地表水资源利用率会逐渐上升。中水回用量代表了研究区的污水处理与回用水平,中水回用量与科技进步有很强关联,污水集中处理量受污水排放总量和污水处理率的影响^[17]。

“三生”用水配置模型涉及方程较多,现选取主要方程予以展示,如表 1 所示。

表 1 模型主要方程

Tab. 1 Main equations of model

变量	方程
中水回用量/(万 m ³)	中水回用量 = 污水集中处理量 × 中水回用率
农村生活用水量/(亿 m ³)	农村生活用水量 = 农村人口 × 农村人均生活用水量
农田灌溉用水量/(亿 m ³)	农田灌溉用水量 = 亩均灌溉用水量 × 农田灌溉面积
可供水资源总量/(亿 m ³)	可供水资源总量 = 中水回用量 + 其他来源供水量 + 地下水供水量 + 地表水资源量 + 跨流域调水量
城市绿化用水量/(亿 m ³)	城市绿化用水量 = 单位绿化面积用水量 × 城市绿化面积
城镇人口/(万人)	城镇人口 = 人口数量 × 城镇化率
城镇居民生活用水量/(亿 m ³)	城镇居民生活用水量 = 城镇人口 × 城镇人均生活用水量
工业用水量/(亿 m ³)	工业用水量 = 单位工业 GDP 用水量 × 工业 GDP
建筑业用水量/(亿 m ³)	建筑业用水量 = 建筑业 GDP × 单位建筑业 GDP 用水量
林牧渔用水量/(亿 m ³)	林牧渔用水量 = 林牧渔 GDP × 单位林牧渔 GDP 用水量

表 1(续)

变量	方程
水资源供需比	水资源供需比=可供水资源总量/需水总量
污水排放增量/(万 m ³)	污水排放增量=污水排放总量×污水排放量增长率
污水集中处理量/(万 m ³)	污水集中处理量=污水处理率×污水排放总量
湿地生态修复用水量/(亿 m ³)	湿地生态修复用水量=单位湿地生态修复面积用水量×湿地生态修复面积
生产用水量/(亿 m ³)	生产用水量=第一产业用水量+第二产业用水量+第三产业用水量
生态用水量/(亿 m ³)	生态用水量=城市绿化用水量+湿地生态修复用水量+河湖补水
生活用水量/(亿 m ³)	生活用水量=农村生活用水量+城镇居民生活用水量
需水总量/(亿 m ³)	需水总量=生产用水量+生态用水量+生活用水量
绿化面积增量/(hm ²)	绿化面积增量=城市绿化面积×绿化面积增长率

1.3 模型验证与敏感性分析

本研究使用两种模型验证方法,其一是运用 Vensim PLE 软件的“check model”功能,检查模型是否存在运行错误;其二是进行历史性验证,选取生活用水量、生态用水量、可供水资源总量和工业用水量 4 个核心变量,将 2016—2020 年的模型模拟值与历史数据进行对比验证。

在敏感性分析方面,本研究选取 2025 年人口变化率、中水回用率等多个可通过开源节流或行政管控措施进行调控进而影响“三生”用水配置系统的变量,对每个变量取自身的 0.5 倍到 1.5 倍,观察生产用水量、生活用水量、生态用水量、可供水资源总量和需水总量 5 个主要变量变化的平均值。

1.4 情景方案设计

以 2020 年为基准年,对黄河三角洲“三生”用水进行模拟分析。模拟步长为 1 年,模拟时段为 2020—2030 年。为了更好地模拟黄河三角洲 2020—2030 年“三生”用水系统的变化情况,本文设置了 3 个配置情景。

1) 基准情景:地区的用水情况和水资源开发利

用率等参照黄河三角洲过去十年的实际情况以及未来预期发展趋势设定。

2) 生态优先情景:东营市政府组织编制的《百万亩湿地恢复工程规划》中提出将每年拨出专项资金用于生态恢复,目标为修复黄河三角洲退化湿地面积的 90%,完成约百万亩退化湿地的生态修复。据此,生态优先情景设置为在基准情景基础上,逐年增加湿地的生态补水面积直至 2030 年达到 100 万亩,与此同时也逐年提高单位面积生态补水量。

3) 节水情景:在该情景下研究区采取了一系列节水措施,包括污水处理厂的投入使用、创新中水回用技术等,以提高中水回用率;制定节水法律法规,敦促工业企业升级节水设备以降低工业用水量;提高采用喷灌、滴灌等节水灌溉方式的农田比例,减少农田灌溉用水;通过提高水价和宣传倡导节约用水等方式来降低居民生活用水比重。指标的设置参考《山东省水资源规划》、《国民经济“十四五”规划》中对预测期中水回用率、节水灌溉率等指标的要求,并结合实际情况进行拟定,具体调控变量如表 2 所示。

表 2 调控变量参考值

Tab. 2 Reference values of the control variables

情景方案	调控变量	基准值	参考值		
			2020 年	2025 年	2030 年
生态优先	单位湿地生态修复面积用水量/(m ³ ·亩 ⁻¹)	300	400	450	500
	湿地生态修复面积/(万亩)	50	50	70	100
节水优先	中水回用率	0.4	0.42	0.52	0.62
	节水灌溉率	0.50	0.50	0.62	0.67
	单位工业 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	130	120	110	100
	城镇居民用水量/(L·(人·d) ⁻¹)	165	120	120	120
	农村居民用水量/(L·(人·d) ⁻¹)	100	90	90	90

2 结果与分析

2.1 模型验证与敏感性分析结果

首先,借助计算机语言对黄河三角洲“三生”用水配置模型进行表达并试运行,Vensim 软件提供的编译纠错和跟踪功能结果显示“Model is ok”,表明模型通过运行检验。

其次,选取工业用水量、生活用水量、生态用水

量、可供水资源总量 4 个变量作为历史性检验变量,将 2016—2020 年作为历史性检验时段,对比模型预测结果和实际历史结果,并计算相对误差。图 2 显示,除工业用水量外,其余变量的模拟值相对误差都小于 10%。由于本研究在计算工业用水量时所涉及的工业 GDP 增长率是以多年平均增长率来表示,其个别数据出现异常也属于正常现象,因此本模型通过历史性检验,可用于未来系统模拟。

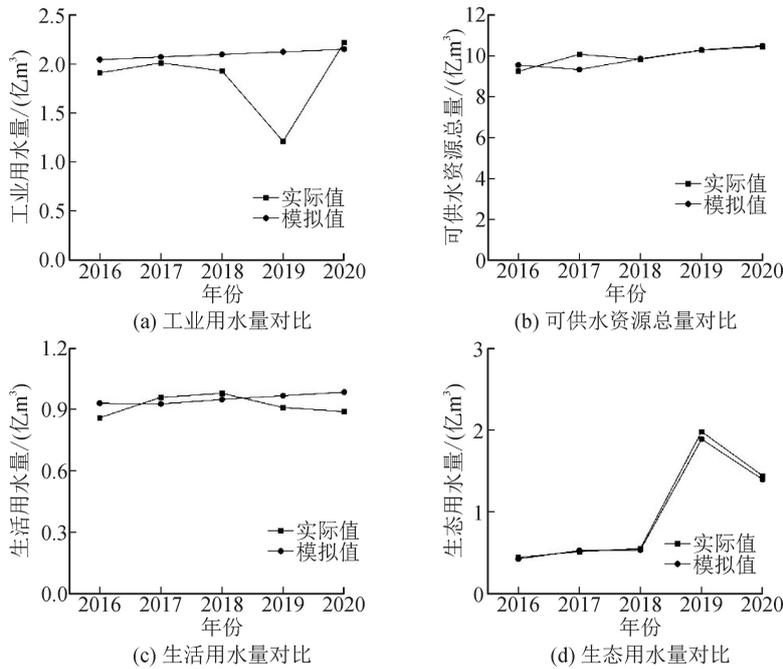


图 2 模拟值与实际值的对比

Fig. 2 Comparison between simulated and actual values

根据研究区实际情况,本文界定敏感度大于 5%为相对敏感,小于 5%为相对不敏感。变量的敏感性测试结果如表 3 所示,单位工业 GDP 用水量、湿地生态修复面积等变量的敏感度均大于 5%,相对较为敏感。

分析可知,黄河三角洲工业用水占比较大,降低

单位工业 GDP 用水量是减少需水量的有效途径;黄河三角洲湿地修复工程需水量较多,湿地修复面积的增加会导致水资源系统负担增大。人口增长率、建筑业 GDP 增长率、第三产业 GDP 增长率等变量的敏感度低于 5%,相对不敏感,在进行用水情景设置时将不做过多考虑。

表 3 敏感性测试结果

Tab. 3 Sensitivity test results

变量	敏感度/%	变量	敏感度/%
人口增长率	2	农村人均生活用水量	6.5
节水灌溉率	3.1	城镇人均生活用水量	15.1
林牧渔 GDP 增长率	4.1	工业 GDP 增长率	1.2
建筑业 GDP 增长率	0.1	单位工业 GDP 用水量	8.5
第三产业 GDP 增长率	3.4	湿地生态修复面积	22.9
中水回用率	1.6	绿化面积增长率	0.8

2.2 不同情景下黄河三角洲“三生”用水配置模拟与调控

2.2.1 基准情景

如图 3(a)和图 4(a),在基准情景下,随着各产业 GDP 的不断增长,生产用水量逐年上升,生产用水量占比小幅下降,2020—2030 年间从 83%降至 81%,生产用水量仍然维持在较高水平。生活用水

量增长不明显,在未来 10 年保持在 1 亿 m^3 左右。生态用水量占比在 2022 年即超过了生活用水量占比,但由于生态建设步伐较缓,到研究时段末生态用水量占比仅为 11.1%。如图 5(a),基准情景水资源供需比在预测期内持续下降,预计到 2030 年,黄河三角洲的供水系统仅能满足区域内 82%的用水需求,整个用水系统的缺水量将高达 2.384 9 亿 m^3 。

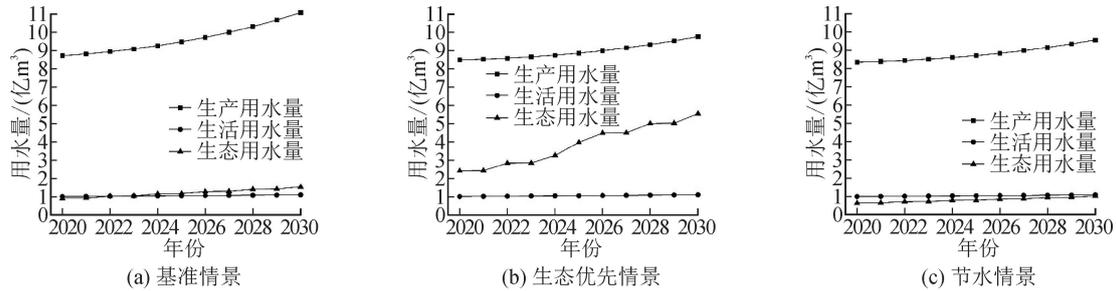


图 3 三种情景“三生”用水量

Fig. 3 “Production-living-ecological” water consumption in three scenarios

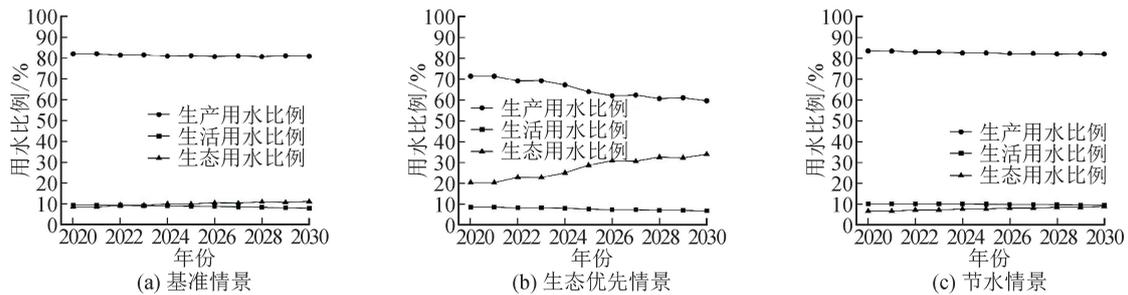


图 4 三种情景“三生”用水比例

Fig. 4 Proportion of “production-living-ecological” water using in three scenarios

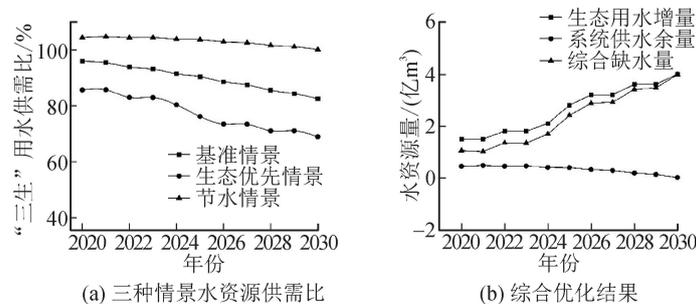


图 5 三种情景水资源供需比和综合优化结果

Fig. 5 Water supply and demand ratio in three scenarios and comprehensive optimization results

2.2.2 生态优先情景

在此情景下,由于湿地生态修复面积以及单位湿地生态修复面积用水量逐年增加,如图 3(b)和图 4(b),生态用水量在“三生”用水系统中的占比明显提高,在 2025 年达到 28.6%,2030 年达到 33.8%,超过总用水量的三分之一。而生态用水量的大幅增加成为了区域供水系统的严重负担,如图 5(a),水资源供需比远低于基准情景,2030 年此情景生态用水量将达到 5.53 亿 m^3 ,系统总需水量也将达到

16.4 亿 m^3 ,相对应的系统缺水量将达到 5.08 亿 m^3 ,仅能满足 69%的用水需求。若优先满足湿地生态修复且保证生活用水量不受影响,则 2030 年系统剩余可供水量仅为 4.66 亿 m^3 ,将有 52.1%的生产用水得不到满足,地区经济发展将会受到极大影响。

2.2.3 节水情景

图 3(c)显示,此情景下生产用水量仍然逐年增加,但在用水结构方面,由于更新了节水生产设备,使得单位工业 GDP 用水量逐年降低,如图 4(c),生

产用水量占比逐年下降,在2030年下降至81.9%。中水回用率的提高增加了可供水资源总量,在没有额外增加客水的情况下,如图5(a),节水情景下的一系列开源节流措施使得未来10年的水资源供需比始终超过100%,供水系统累计比基准情景能多提供共3.6亿 m^3 水量。其中,2020—2026年间均超过0.3亿 m^3 ,可以相对减少黄河分水以及跨流域调水的指标,从一定程度上缓解山东省乃至黄河下游地区的水资源紧缺情况。如图5(b),在节水情景中,供水系统比需水系统多的水量,即系统供水余量,远小于生态情景下的生态用水增量(生态-基准),综合缺水量呈大幅上升趋势。由此可以看出,仅通过在区域内实行常规的节水措施是无法满足研究区生态建设用水需求的。若要完成黄河三角洲退化湿地修复任务,在实行节水情景的系列措施的基础上,还需要增加黄河分水、跨流域调水等客水量,以弥补预测的综合缺水量。

3 讨论

受限于研究区当地水资源条件和自然生态环境的特殊性,以及生产、生活和生态用水在经济社会持续发展背景下的不断增长,黄河三角洲的水资源供需矛盾在本研究时间序列中将长期存在。黄河三角洲湿地是黄河流域生态健康的晴雨表,研究区的湿地保护修复工程关系到黄河下游乃至黄河流域的生态安全。区域内部的地表水、地下水资源开发潜力非常有限,“开源”措施依赖客水量的增加。退化湿地修复等生态建设的推动加剧了地区的供水矛盾,在没有新增水源的情况下,生态用水势必会挤占生产、生活用水,改变“三生”用水结构,影响区域正常的工农业生产。而要求企业换用节水的生产设备,创新中水回用技术,推广喷灌、滴灌等节水灌溉设施,宣传提高居民节水意识等措施可在一定程度上优化地区“三生”用水结构,缓解供需水矛盾,但无法从根本上解决研究区的水资源供需矛盾。在采取节水措施的基础上,必须增加黄河分水和其他跨流域调水才能有效支持黄河三角洲的生态建设,如建设国家湿地公园、进行湿地生态恢复以及发展以湿地资源开发利用为核心的产业等,从而实现黄河三角洲“三生”用水协调和高质量发展。另外,“三生”用水配置模型涉及的因素太多,本研究仍有许多要素未考虑到,如降水、水价等变量都会对其造成影响。因此,本模型还有待进一步完善,以使经济-生态效益最大化目标下黄河三角洲“三生”用水配置更加合理。

4 结论

1) 按照现在的社会经济发展趋势,未来10年内黄河三角洲生产用水量增长明显,生态用水量也有所增长。“三生”用水比例失调。水资源供需比始终低于100%,到2030年将有18%的用水需求不能被满足,这将会影响区域的经济增长和生态建设。

2) 若在现有经济社会发展基础上大力开展湿地退化修复工程,区域供水首先要考虑满足生态用水需求,即增加黄河三角洲保护区湿地补水,并且保证区域的生活用水不受影响,那么系统剩余的水资源远不能保障生产用水的需求,到2030年将有52.1%的生产用水得不到满足,区域经济将严重萎缩。

3) 若采取一系列节水措施,如提高节水灌溉率、降低单位工业GDP用水量等,可使黄河三角洲保持水资源供需平衡,使得2020—2030年间系统供水量始终多于需水量。但节水情景下系统的多余水量仍远远不能满足生态情景下的水量缺口。

4) 若要完成百万亩湿地修复目标,需要增加平均每年3亿 m^3 ,至少在2030年增加5亿 m^3 供水,才能同时满足区域的经济发展和生态建设。在制定区域水资源优化配置方案时需要开源与节流并举,实施节水政策的同时要增加黄河分水和跨流域调水,从而实现黄河三角洲“三生”用水合理配置和高质量发展。

参考文献:

- [1] 杨洋, 效存德, 王晓明, 等. 基于投入产出理论的水资源研究进展及水资源管理展望[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 214-224.
YANG Yang, XIAO Cunde, WANG Xiaoming, et al. Review on water resources based on input-output theory and prospect of water resources management[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 214-224.
- [2] 向龙, 龚泓博. 基于IFMOP的玉环市区域水资源配置[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 49-53, 73.
XIANG Long, GONG Hongbo. Regional water resources allocation in Yuhuan based on IFMOP[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 49-53, 73.
- [3] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.
HUANG Jinchuan, LIN Haoxi, QI Xiaoxiao. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391.

- [4] 邓铭江,黄强,畅建霞,等. 广义生态水利的内涵及其过程与维度[J]. 水科学进展,2020,31(5): 775-792.
DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 775-792.
- [5] DEGEFU D M, HE W, YUAN L, et al. Water allocation in transboundary river basins under water scarcity: a cooperative bargaining approach[J]. Water Resources Management, 2016, 30(12): 4451-4466.
- [6] NAGHDI S, BOZORG-HADDAD O, KHORSANDI M, et al. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776(12): 146026.
- [7] ELLEUCH M A, ANANE M, EUCHI J, et al. Hybrid fuzzy multi-criteria decision making to solve the irrigation water allocation problem in the Tunisian case [J]. Agricultural Systems, 2019, 176: 102644.
- [8] NAGHDI S, BOZORG-HADDAD O, KHORSANDI M, et al. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776(12): 146026.
- [9] 陈太政,侯景伟,陈准. 中国水资源优化配置定量研究进展[J]. 资源科学,2013,35(1): 132-139.
CHEN Taizheng, HOU Jingwei, CHEN Zhun. Quantitative studies of the optimization allocation of water resources in China - a review[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 132-139.
- [10] 许新宜,王浩,甘泓,等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社,1997.
- [11] 刘健民,张世法,刘恒. 京津唐水资源系统供水规划和调度优化的递阶模型[J]. 水科学进展,1993,4(2): 98-105.
LIU Jianmin, ZHANG Shifa, LIU Heng. Hierarchical model of optimal planning and operation for water supply in JJT area water resources large-scale system[J]. Advances in Water Science, 1993, 4(2): 98-105.
- [12] 王浩,陈敏建,秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2003.
- [13] 周祖昊,王浩,秦大庸,等. 基于广义ET的水资源与水环境综合规划研究 I: 理论[J]. 水利学报,2009,40(9): 1025-1032.
ZHOU Zuhao, WANG Hao, QIN Dayong, et al. Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation—transpiration water consumption control I. Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1025-1032.
- [14] 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.
- [15] 田进宽,郭佳航,左其亭,等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. 水资源保护,2022,38(2): 62-67.
TIAN Jinkuan, GUO Jiahang, ZUO Qiting, et al. Thoughts and calculation model for water resources allocation in Shaying River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 62-67.
- [16] KAZEMI M, BOZORG-HADDAD O, FALLAH-MEHDIPOUR E, et al. Optimal water resources allocation in transboundary river basins according to hydro-political consideration[J]. Environment Development and Sustainability, 2022, 24(1): 1188-1206.
- [17] 王海云,高太忠,高京,等. 基于 AHP-LP 法的南水北调中线水资源优化配置——以河北省受水区为例[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(5):588-592.
WANG Haiyun, GAO Taizhong, GAO Jing, et al. Water resources optimal allocation in the middle line of south-to-north water transfer project using AHP-LP—a case of Hebei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(5):588-592.
- [18] 方国华,王雪,方应学,等. 基于改进粒子群算法的区域水量水质联合配置研究[J/OL]. 水资源保护: 1-15 [2022-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20211009.1156.007.html>.
FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Research on joint allocation of regional water quantity and quality based on improved particle swarm algorithm [J/OL]. Water Resources Protection: 1-15 [2022-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20211009.1156.007.html>.
- [19] 游进军,薛志春,林鹏飞,等. 二层结构的流域生态调度研究 I: 方法与模型[J]. 水利学报,2021,52(12): 1449-1457.
YOU Jinjun, XUE Zhichun, LIN Pengfei, et al. Study on the integrated riverbasin ecological operation based on two-layer structure I: methodology and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1449-1457.
- [20] 韩美,杜焕,张翠,等. 黄河三角洲水资源可持续利用评价与预测[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(7):154-160.
HAN Mei, DU Huan, ZHANG Cui, et al. Water resources sustainable utilization evaluation based on the DPSIR in the Yellow River Delta[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 154-160.

- 154-160.
- [21] 韩美,孔祥伦,李云龙,等. 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制[J]. 地理科学, 2021,41(6):1009-1018.
HAN Mei, KONG Xianglun, LI Yunlong, et al. Eco-environmental effects and its spatial heterogeneity of ‘ecological-production-living’ land use transformation in the Yellow River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(6): 1009-1018.
- [22] 邵东国,贺新春,黄显峰,等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报,2005, 36(9): 1050-1056.
SHAO Dongguo, HE Xinchun, HUANG Xianfeng, et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1050-1056.
- [23] ZARGHAMI M, AKBARIYEH S. System dynamics modeling for complex urban water systems: application to the city of Tabriz, Iran[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 60(3): 99-106.
- [24] YANG J, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3): 885-899.
- [25] 王浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016,47(3): 265-271,282.
WANG Hao, YOU Jinjun. Progress of water re-sources allocation during the past 30 years in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265-271,282.
- [26] 张久丹,李均力,包安明,等. 1962—2019 年锡尔河-咸海三角洲湿地时空变化及驱动因素[J]. 水科学进展, 2021,32(4): 587-596.
ZHANG Jiudan, LI Junli, BAO Anming, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of wetlands in the delta of the Syr Darya River-Aral Sea during 1962—2019[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 587-596.
- [27] 刘爽,白洁,罗格平,等. 咸海流域社会经济用水分析与预测[J]. 地理学报,2021, 76(5): 1257-1273.
LIU Shuang, BAI Jie, LUO Geping, et al. Analysis and prediction of socio-economic water use in the Aral Sea Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1257-1273.
- [28] SHAO W, YANG D, HU H, et al. Water resources allocation considering the water use flexible limit to water shortage—a case study in the Yellow River Basin of China[J]. Water Resources Management, 2009, 23(5): 869-880.
- [29] STAVE K A. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada [J]. Journal of Environmental Management, 2003, 67(4): 303-313.

(责任编辑 周 蓓)