

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.005

基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置

栾清华^{1,2,3}, 高昊悦¹, 刘红亮⁴, 何立新¹, 马 静¹, 王传生¹

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 211100; 4. 邯郸市水资源管理中心, 河北 邯郸 056005)

摘要:为缓解河北武安市水资源供需不平衡的突出矛盾,立足水资源精细化管理的需求,构建了武安市 GWAS (general water allocation and simulation) 模型,并开展规划年(2025 年与 2030 年)不同情景下武安市各乡镇水资源优化配置研究。结果表明:2025 年和 2030 年,平水情景($P=50\%$)下模型优化配置水量基本可以满足各乡镇水量需求,枯水情景($P=75\%$)下各乡镇存在不同程度的缺水情况;全市普遍农业缺水,2025 年平枯情景农业缺水率分别为 6.45% 和 44.11%,2030 年平枯情景农业缺水率分别为 5.05% 和 42.47%;优化后的供水结构改善效果显著,地下水供水量占比在各规划年平枯情景下均有所下降。

关键词:水资源优化配置;GWAS 模型;供需平衡;用水结构;武安市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0032-11

Optimal allocation of water resources in Wu'an City based on GWAS model// LUAN Qinghua^{1,2,3}, GAO Haoyue¹, LIU Hongliang⁴, HE Lixin¹, MA Jing¹, WANG Chuansheng¹ (1. Hebei Province Key Laboratory of Wisdom Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology and Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4. Handan Water Resources Management Center, Handan 056005, China)

Abstract: To alleviate the prominent contradiction between water resource supply and demand imbalance of water resources in Wu'an City, Hebei Province, based on the demand for refined water resource management, a regional GWAS (general water allocation and simulation) model of Wu'an was constructed, and the optimal allocation of water resources in various townships of Wu'an City under different scenarios in the planning years (2025 and 2030) was carried out. The results show that in 2025 and 2030, the optimized allocation of water in the model can basically meet the water demand of various townships in the city in the normal scenario ($P=50\%$), while in the dry scenario ($P=75\%$), there are varying degrees of water shortages in each town. There is a widespread agricultural water shortage in the whole city. In 2025, the agricultural water shortage rates in the normal and dry scenarios are 6.45% and 44.11%, respectively, and which are 5.05% and 42.47%, respectively, in 2030. The optimized water supply structure has significantly improved, and the proportion of groundwater supply has decreased in all planning years under normal and dry scenarios.

Key words: optimal allocation of water resources; GWAS model; co-ordination of supply and demand; water utilization structure; Wu'an City

京津冀地区是北方经济发展的核心区,工业分工与协作是京津冀协同发展的重要内容,也是拉动区域经济增长的动力所在。然而,京津冀地区又是水资源自然禀赋差的区域,各行业水资源需求竞争

激烈、生态用水难以保障等问题日益突出,进而影响区域社会经济高质量健康发展^[1]。因此,针对有限的水资源,开展区域优化配置工作尤为必要。

区域水资源配置问题具有显著的复杂性、动态

基金项目:国家自然科学基金(51879066)

作者简介:栾清华(1978—),女,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:carol97011202@163.com

通信作者:何立新(1966—),男,教授,博士,主要从事水文水资源、水环境生态和农业水利研究。E-mail:helixin@hebeu.edu.cn

性及多目标性。近年来,许多学者应用智能仿生算法求解区域内水资源的配置方案,如遗传算法^[2]、粒子群算法^[3-4]、鱼群算法^[5]、鲸鱼算法^[6]以及基于这些算法的改进或融合方法等^[7-9]。其中 NSGA-II (第二代非支配排序遗传算法)是当前应用较为广泛的多目标遗传算法之一,具有运行速度快、解集收敛性好的优点^[10]。沙金霞等^[11-14]将该算法分别应用在河北省邢台市、山西省“大水网”建设、晋中市和宝鸡峡五泉灌区等不同尺度、不同类型区域的水资源优化配置方案计算中,得到了较好的研究成果,证实了该算法的普适性。

随着计算机科学的不断成熟,在优化改进求解算法的基础上,越来越多的模型工具被广泛开发与应用,一些学者分别使用 MIKE BASIN、DTVGM-WEAR、CVaR-TSP、IFMOP 模型在流域、灌区、市域及县域等不同空间尺度上开展水资源优化配置研究^[15-18]。随着水资源管理的需求日趋精细化和水资源系统的日益复杂化,桑学锋等^[19]开发了水资源综合模拟与调配模型——GWAS (general water allocation and simulation) 模型,可在兼顾生态用水的前提下,将有限的水资源发挥最大的社会效益。因 GWAS 模型操作简便、流程设置清晰被广泛应用,如曹永强等^[20]、杜丽娟等^[21]分别将该模型应用于北京市和淠史杭灌区的水资源配置研究中,均得到较合理的配置结果。随着不同路径的外调水工程的先后通水以及非常规水资源使用率的不断增加,京津冀全域水资源系统网络和供水水源呈现了复杂化、多样化的特性,仅到县域一级的水资源管理将难以满足水资源精细化配置和管理的需求。乡镇作为行政管理的基本单元,开展县域乡镇尺度的水资源优化配置尤为必要。

基于上述背景,选取工业产业突出和经济实力较为雄厚,但水资源本底条件有限且无外调水源的山区型县级市——河北武安市作为研究区域。2019 年作为决胜全面建成小康社会第一个百年奋斗目标的关键之年,对未来武安市规划发展有着坚实的基石作用,故选取 2019 年为现状年;规划年分别设定在我国“十四五”与“十五五”发展规划的收官之年,即 2025 年与 2030 年,对这两个重点节点的水资源做好统筹规划既能显露出区域发展问题,更便于应对发展态势及时做出战略调整。以现状年为基础,构建武安市 GWAS 模型,采用带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA II-S) 求解,得出 2025 年与 2030 年两个规划年平枯情景下的水资源优化配置方案,以期支持区域水资源精细化管理及区域可持续发展。

1 研究区概况及数据来源

武安市是河北省属县级市,全国百强县,地处 $113^{\circ}44'52''\text{E} \sim 114^{\circ}22'30''\text{E}$ 、 $36^{\circ}26'51''\text{N} \sim 37^{\circ}00'54''\text{N}$,位于邯郸城区西及西北部的太行山东麓,境内水系发达,建有车谷、口上、四里岩、大洛远 4 座中型水库及众多小型水库(图 1),全域都在山区,受地形影响,全境暂无外调水工程。2019 年,武安市人均水资源量和人均综合用水量分别为 197 m^3 和 143 m^3 ,均低于全国平均水平。磁山镇、武安镇、康二城镇、活水乡等供需不匹配现象较明显(图 2)。

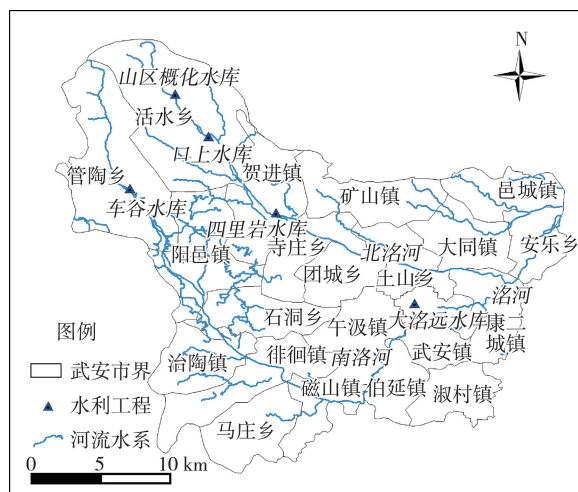
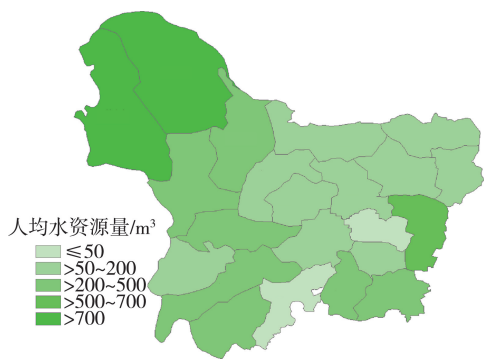


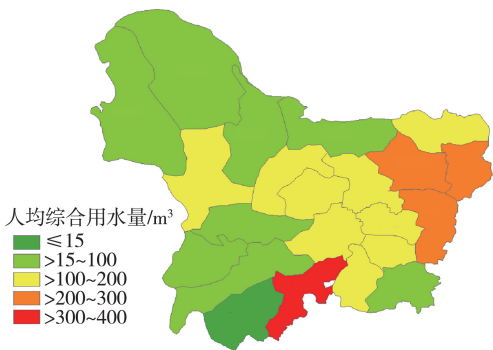
图 1 研究区水系及水利工程分布

Fig. 1 Water system and water conservancy projects in study area

武安市是以钢、煤、电、建等高耗水产业为主要经济支撑的重工业城市,其工业用水量占行业用水总量比例达 62.2%,农业和生态用水量占比分别为 17.9% 和 1.3%,经济建设与工业用水挤占生态环境和农业用水的问题较突出。工业作为用水大户,其用水量的 62% 来自地下水。耕地大部分旱作雨养,农业灌溉工程有限,且 75% 由地表水提供,灌溉用水占总用水量不到 18%,农业受降水丰枯影响显著。从供水侧来看,现状年地表水与地下水联合调配供给全域生活及各产业用水,其中地表水、地下水供水总量分别占县域供水总量的 44.7% 和 55.3%。分析 2014—2019 年武安市供水结构变化,尽管地表水供水比逐渐升高,地下水供水比相应降低,然而受水文地质条件限制,地下水工程分布失衡现象依旧存在,造成域内东南部地下水过量开发利用,存在一定的地下水环境破坏现象^[22]。可见,武安市是京津冀地区工业突出的经济强县,又是本底水资源量值有限且无外调水工程的县,是一个资源型、工程型和产业转嫁型缺水并存的县,供用水矛盾异常突出。未来,须细化区域配置尺度、优化供水组成,实现水



(a) 人均水资源量



(b) 人均综合用水量

图2 武安市现状年人均水资源量及人均综合用水量分布

Fig.2 Per capita water resources and comprehensive water consumption in Wu'an City in current year

资源精细化管理并完善产业结构,从而支撑区域的绿色高质量发展。

本文采用的数据来源于《2019年邯郸市统计年鉴》、2014—2019年《邯郸市水资源公报》、2014—2019年《武安市水资源公报》。

2 规划年供需水预测

对武安市所辖22个乡镇单元进行平枯情境下的供需水预测。定额法能根据各种因素变化及政策动态调整,适用广泛,因此本文选择该方法进行需水预测。分别参照河北省DB13 5450.1—2021《生活与服务业用水定额》、DB13 5449.1—2021《农业用水定额》(种植业)和DB13 5449.2—2021《农业用水定额》(养殖业)的相关指标预测规划年生活、农业的需水量;由于资料收集有限,生态需水量采用人均生态需水定额进行核算^[23]。考虑河北省用水总量控制和取水许可审批的严格性以及未来“以水定产”的推进,并依据企业取水许可具有一定年限的特点,以现状年武安市审批的企业取水许可的水量作为2025年规划水平年工业需水量的上限,在此基础上,预测2030年工业需水量。经上述各业需求综合分析,武安市2025年平水情景和枯水情景需水总量分别为20398.54万m³和23679.17万m³,各乡镇单元不同行业需水量见图3(a)(b);2030年平水

情景和枯水情景需水总量分别为19766.29万m³和22387.85万m³,各乡镇单元不同行业需水量见图3(c)(d)。由于农业旱作雨养现象突出,农业缺水基本为常态,而现状年又属于偏枯年份,使得不同规划年平枯情景下预测出的需水总量高于现状供水量。

在解析武安市现状年供用水结构的基础上,以河北省最新水资源评价结果(1956—2016年系列),结合武安市地下水用水总量的红线指标作为地表水可供水量和浅层地下水可开采量的依据;在《河北省节约用水条例》的实施背景下,考虑企业实行中水回用等节水措施,将再生水、矿排水所供水量并入可供水量的计算,其中再生水可供水量根据城镇生活用水量和工业用水量的污水回收利用进行预测,矿排水根据武安市地下非常规水许可量进行核算。经计算,2025年平枯情景下可供水量分别为25370.15万m³、21287.10万m³;2030年平枯情景下可供水量分别为25399.26万m³和21316.21万m³,且不同规划年与情景下,浅层地下水可供水量相较于总可供水量占比最高。

3 水资源优化配置

3.1 模型构建

3.1.1 目标函数

a. 公平性最优目标函数。以各乡镇之间缺水率的差异程度来表征,差异程度越小,该目标函数值越小,配置公平性越好;反之,乡镇间配置的公平性越差。表达式为

$$\min F(x) = \sum_{y=1}^{m_1} \sum_{n=1}^{12} \sum_{h=1}^{m_2} q_h G_p(x_h) \quad (1)$$

$$\text{其中 } G_p(x_h) = \sqrt{\frac{1}{m_3 - 1} \sum_{u=1}^{m_3} (x_{hu} - \bar{x}_h)^2}$$

式中: $F(x)$ 为公平目标函数; $G_p(x_h)$ 为公平性函数; q_h 为行业用户 h 的惩罚函数; x_{hu} 为研究区内乡镇单元 u 中行业用户 h 的缺水率; $\bar{x}_h$ 为行业用户 h 的缺水率均值; m_1 为计算时段的年数; n 为年内月值; m_2 为行业用水类型的数量; m_3 为研究区单元数量。

b. 缺水率最小目标函数。以整个研究区配置的供水量满足需水量的程度来表征,缺水率小说明需水越能得到保障;反之则说明需水不易得到满足。表达式为

$$\min Y(x) = \sum_{y=1}^{m_1} \sum_{n=1}^{12} \sum_{h=1}^{m_2} q_h S_w(x_h) \quad (2)$$

$$\text{其中 } S_w(x_h) = \frac{1}{m_3} \sum_{u=1}^{m_3} |x_{hu} - S_{obhu}|$$

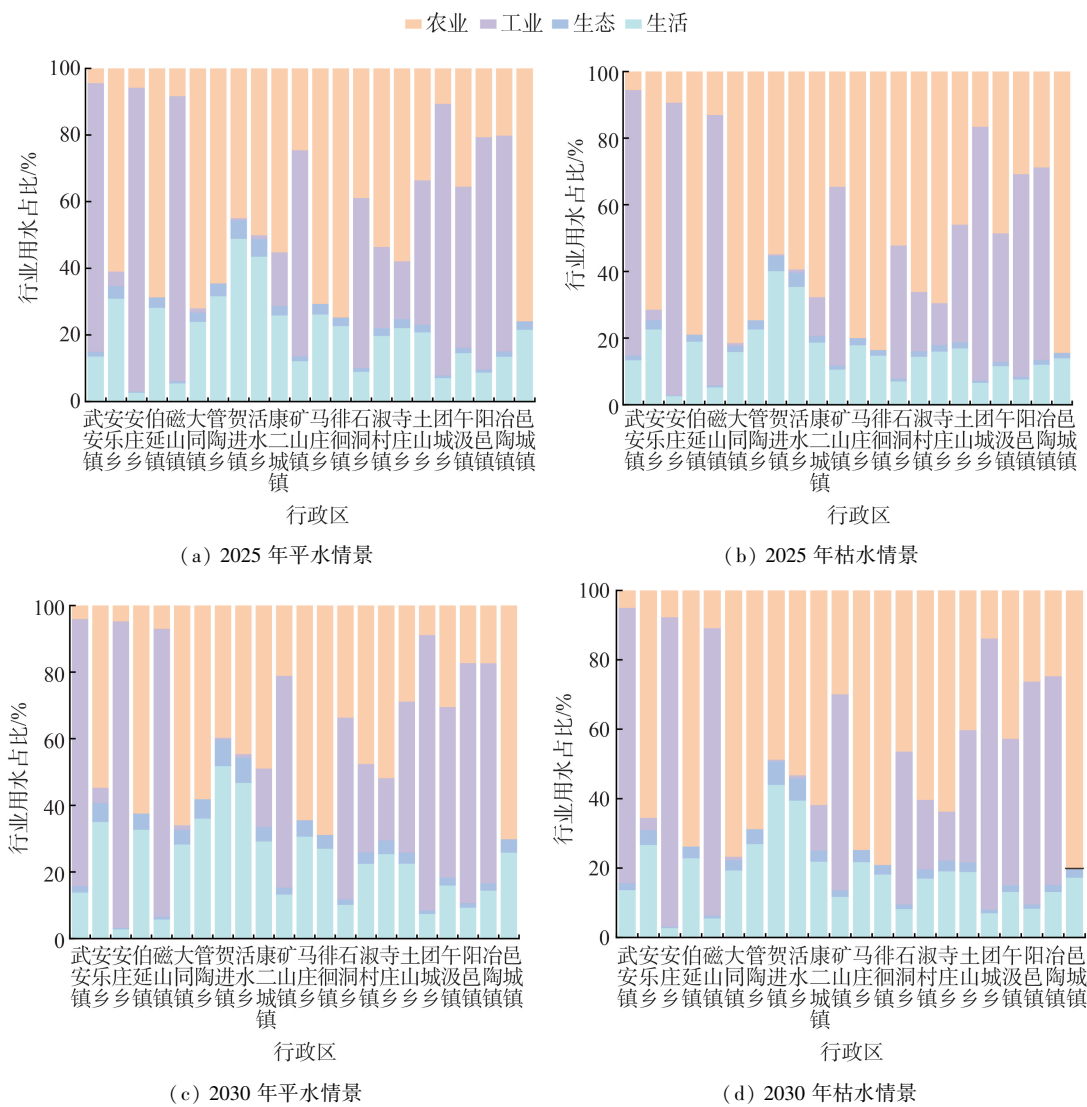


图3 2025年与2030年平枯情景下需水预测

Fig. 3 Water demand forecast under normal and dry scenarios in 2025 and 2030

式中: $Y(x)$ 为供水胁迫目标; $S_w(x_h)$ 为供水胁迫函数; S_{obhu} 为研究区内乡镇单元 u 中行业用户 h 的各月供水胁迫目标理想值。

c. 总目标函数。总目标函数为公平性目标和缺水率目标的加权和,函数值越小说明水资源的全局配置结果越优。表达式为

$$T = w_f F + w_y Y \quad (3)$$

式中: T 为总目标函数值; F 为公平性目标函数值; w_f 为公平性目标函数的权重; Y 为缺水率目标函数值; w_y 为缺水率目标函数的权重。

3.1.2 约束条件

约束条件包括:①水资源承载力约束,即各水源对各乡镇单元不同行业的总供水量不超过该水源的可供水总量;②需水量约束,即输入各乡镇、各行业需水量应在相应的最大、最小需水量之间;③输水能力约束,即各水源的总供水量不超过该水源的输水能力上限;④决策变量非负约束,即供水量非负。

3.2 供用水网络构建

基于武安市水利工程规模及分布、不同乡镇的产业结构以及其他供水水源的数量和时空分布等情况,构建了武安市水资源系统网络如图4所示。充分考虑各行业的用水特点及水质需求并结合水源的供水能力,确定了武安供用水方案的优先次序如下:①优化利用地表水,优化口上水库、车谷水库、四里岩水库、大洛远水库4库联合调度,按照优先保障城乡生活用水,遵循生态环境用水、工业生产用水和农业灌溉用水的顺序进行水资源配置;②充分利用研究区内再生水及矿排水等非常规水源,以补充工业用水;③合理开采地下水,根据《河北省地下水管理条例》中对地下水开采的严控规定,深层地下水的开采利用在规划年配置中不予考虑,浅层地下水用于城乡生活,补充工业生产及农业灌溉用水。在此基础上,进一步明晰乡镇各供水水源与用水行业之间的供用水关系,确定不同乡镇的供用水拓扑关系,以便模型准确解析水源-单元-行业之间的供用水联系。

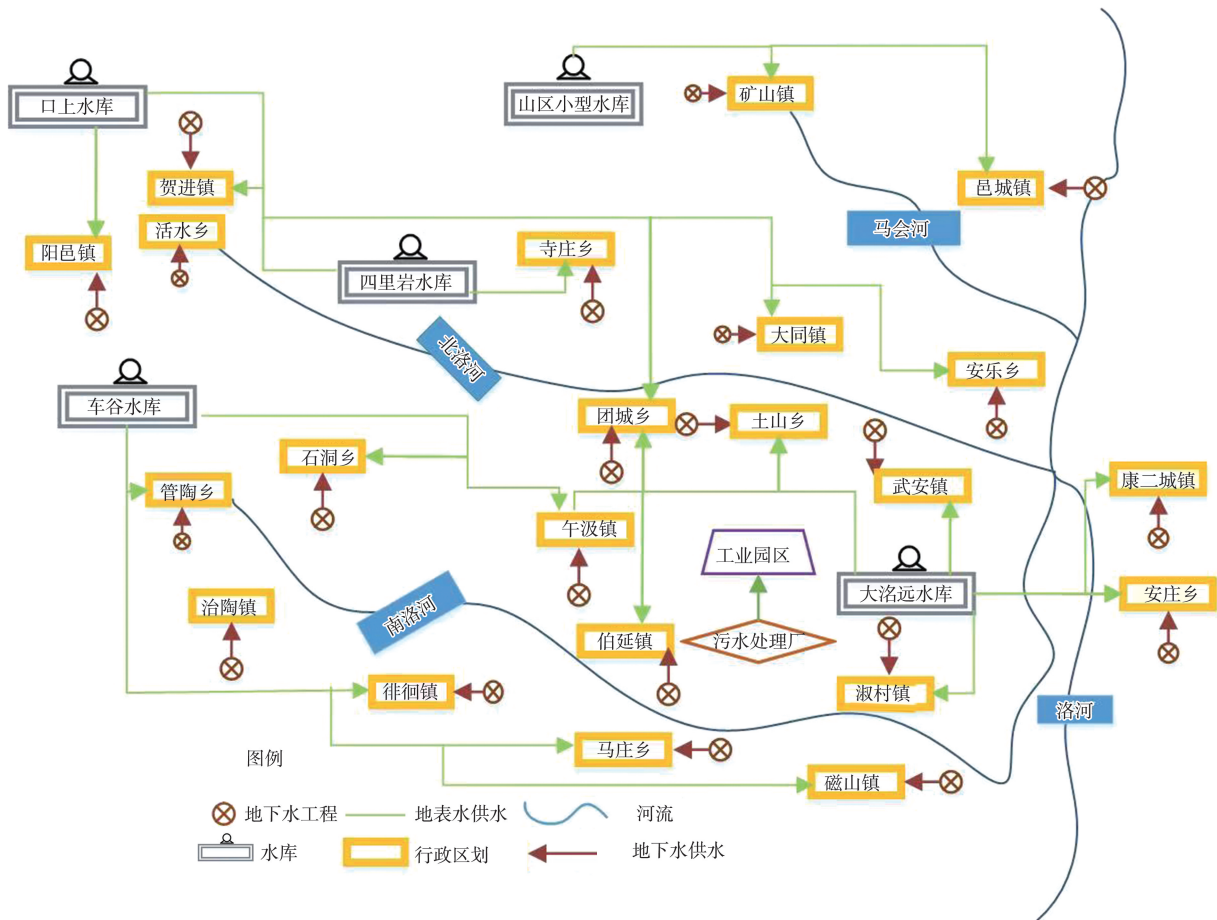


图4 武安市水资源系统网络

Fig.4 Network of water resources system in Wu'an City

3.3 参数设置与模型验证

3.3.1 参数设置

模型参数包括供水参数、需水参数、综合参数及优化调配参数。其中,供水参数在解析武安市水资源系统网络基础上,设置水库供水特性等参数,形成水库→乡镇供用水拓扑网络,以及供水侧各水源时段来水量数据;需水参数主要是各乡镇不同行业需水量。在设置上述供需水参数的基础上,依据乡镇情况,参考文献[24]进一步设置水源行业分水比作为不同水源供水权重参数,进而得出各行业供水权重。特别指出,为避免出现经济建设用水挤占生态环境用水,结合“绿色”和“高质量发展”的前提与底色的时代背景,将生态权重提高仅次于生活并略高于工业权重,生活、生态、工业、农业权重的比例为10:9:8:7。

根据武安市实际情况,认为公平性最优和缺水率最小这两个目标同等重要,因此设置了总目标函数的权重系数 w_f 与 w_y 均为10。在优化算法上,采用NSGA II-S算法,以各水源分给各用水户的水量作为决策变量,设置优化模拟参数为:种群大小为50,基因长度为0,交叉概率为0.30,变异概率为0.05,最大运行次数为1000。

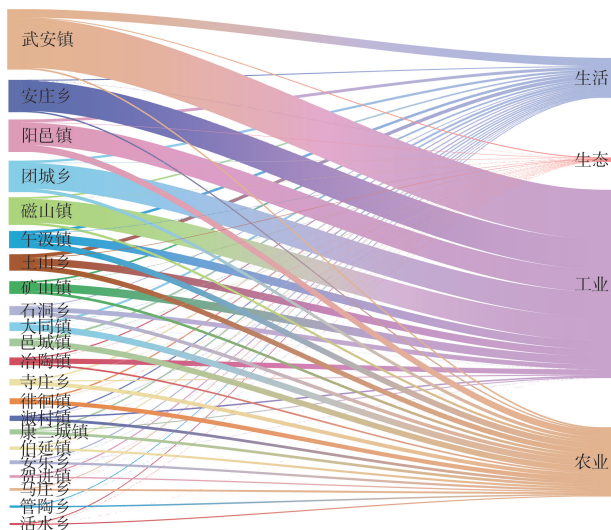
3.3.2 模型验证

为验证上述模型参数设置的合理性以及模拟的精度,以武安市现状年各乡镇及行业的用水量为基础,对比实际水量与模型模拟水量之间的误差。模拟结果表明,除马庄乡实际与模拟间误差略高(11.93%)外,其他乡镇的误差均在10%以下;行业模拟的误差均控制在0.5%以内;进一步计算实际数据与模拟数据的相关系数,两种模拟方式下相关系数均大于0.999,两组数据的相关性较高。误差及相关性均在可接受范围内,说明上述模型参数设置合理,模拟的水资源配置结果较准确。

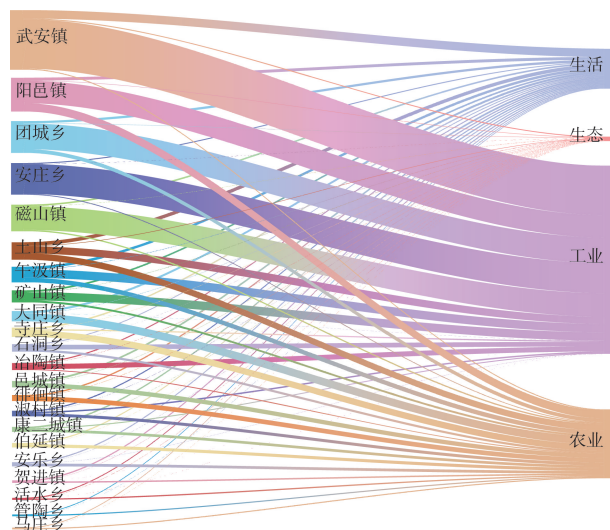
4 结果与分析

4.1 水资源配置优化

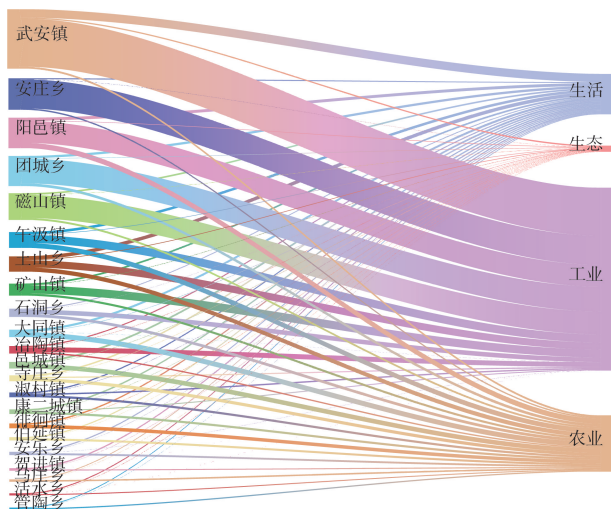
在供需水预测的基础上,基于配置目标与约束条件,采用构建的GWAS模型对武安市2025年和2030年开展水资源配置,得出不同规划年平枯情景下水资源优化配置结果。为直观反映各乡镇单元及用水行业的配置水量及其对应关系,绘制不同配置结果的桑基图(图5)。可见,尽管不同规划年平枯情景下各乡镇配置的结果不尽相同,但依据配置水量 W ,各乡镇大致均可分为3个梯队。第一梯队



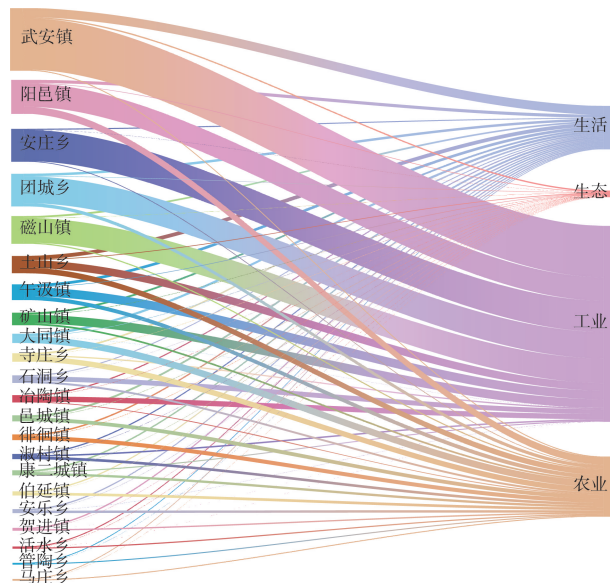
(a) 2025 年平水情景



(b) 2025 年枯水情景



(c) 2030 年平水情景



(d) 2030 年枯水情景

图5 2025 年与 2030 年平枯情景下水资源配置结果桑基图

Fig.5 Sankey chart of allocation results under normal and dry scenarios in 2025 and 2030

($1700 \text{ 万 m}^3 < W \leq 4100 \text{ 万 m}^3$): 武安镇、安庄乡、阳邑镇、团城乡和磁山镇, 其中, 武安镇配置水量在各结果中均处于最高; 第二梯队 ($400 \text{ 万 m}^3 < W \leq 1200 \text{ 万 m}^3$): 午汲镇、土山乡、矿山镇、石洞乡、大同镇、冶陶镇、寺庄镇和徘徊镇; 第三梯队 ($110 \text{ 万 m}^3 < W \leq 400 \text{ 万 m}^3$): 徘徊镇、淑村镇、康二城镇、伯延镇、安乐乡、贺进镇、马庄乡、管陶乡和活水平乡。可见, 武安市水资源配置具有较为显著的空间差异性, 且不同规划年平枯情景下, 空间分布的差异性较为相似。

针对上述水资源配置结果空间差异的相似性, 结合武安市产业结构分布及水资源空间特征进一步深入分析。由于武安市工业园区及全域 5 处供水水厂分布在武安镇、安庄乡、团城乡和阳邑镇, 加之磁山镇冶金、煤炭、建材、化工等高耗水企业较多, 故第

一梯队的配置水量处于较高水平, 且绝大部分水量供给工业生产。第二梯队既是境内主要的铁矿、煤矿等资源储存地, 也是种植业和林果业积极发展的区域, 因此在工农业权重均衡的基础上, 第二梯队的配置水量处于中等。第三梯队各乡镇大部分位于武安市西部山区, 这些地区受地质条件的影响, 形成了地下无资源、地上少企业的局面, 各行业发展相对薄弱, 故该梯队的配置水量处于较低水平。配置的不同结果实现了水资源配置与区域产业结构的空间耦合, 为进一步优化产业空间布局、更深一步践行“以水定产”发展理念提供依据。

4.2 缺水率

4.2.1 研究区缺水率

表 1 为不同规划年各情景下的武安市水资源优

化配置结果,可见 2030 年在平枯两种情景下的缺水率分别为 1.04% 和 12.67%,较 2025 年的 1.56% 和 15.28% 均有所改善,表明武安市贯彻落实《河北省节约用水条例》的实施效果显著,区域内水资源可得到合理统筹规划,水资源利用效率与质量更上一个台阶。

表 1 水资源优化配置结果

Table 1 Optimal allocation of water resources				
规划年	情景	需水量/万 m ³	配置水量/万 m ³	缺水率/%
2025 年	平水	20 398.54	20 081.14	1.56
	枯水	23 679.17	20 061.44	15.28
2030 年	平水	19 766.29	19 561.38	1.04
	枯水	22 387.85	19 551.44	12.67

进一步解析乡镇尺度水量配置,由图 6(a)(c)可见,平水情景下,2025 年与 2030 年优化配置后均可以满足大部分乡镇的用水需求,不能满足的乡镇缺水率也较低,分别不超过 20% 和 10%,整体上可以维持健康可持续发展。其中,缺水的乡镇主要包括:第一梯队的武安镇、安庄乡,第二梯队的矿山镇、土山乡、邑城镇及第三梯队的淑村镇、康二城镇和伯延镇共 8 个乡镇,水资源配置处于略失衡状态。武安市全域水资源量分布为西多东少,用水量却呈现反向态势,优化方案协调了市内水资源的禀赋与消耗之间的关系,进而体现了公平性目标函数在均衡

乡镇间水量效果的显著性,这与武安市实行“北水南调”,将四里岩水库的水引入大洺远水库,使沿线的寺庄乡、团城乡、午汲镇等乡镇受到水量惠及的工程手段相适应。今后可进一步规划工程规模,修整运行能力下降的老旧水利工程,以高效利用工程水段实现水资源的调蓄与分配,进一步确保水资源配置和产业结构的空间耦合。

由图 6(b)(d)可见,在枯水情景下,仅第二梯队的寺庄乡不缺水,这是由于该乡镇工业占比极少,整体需水量不大,供水容易满足;其他各乡镇存在不同程度的缺水情况,特别是农业为主的马庄乡、邑城镇缺水率在 50% 左右。且在枯水情景下,缺水率较高的乡镇分布由武安镇向西南和东北发散,即地表水工程分布较广泛的乡镇,而区域地表水工程的可供水量受平枯情景影响明显,枯水情景蓄水受限;从需水侧来看,县域内农作物种植以小麦、玉米为主,枯水年用水定额是平水年的一倍,在其他用水行业水量不变的情况下,整体需水量加大,需增供减的矛盾在枯水情景时更加突出。

4.2.2 行业缺水率

2025 年和 2030 年平枯情景下各乡镇的生活、生态、工业均可达到水量需求,未出现城市建设用水挤占生态用水的现象,符合《京津冀工业节水行动

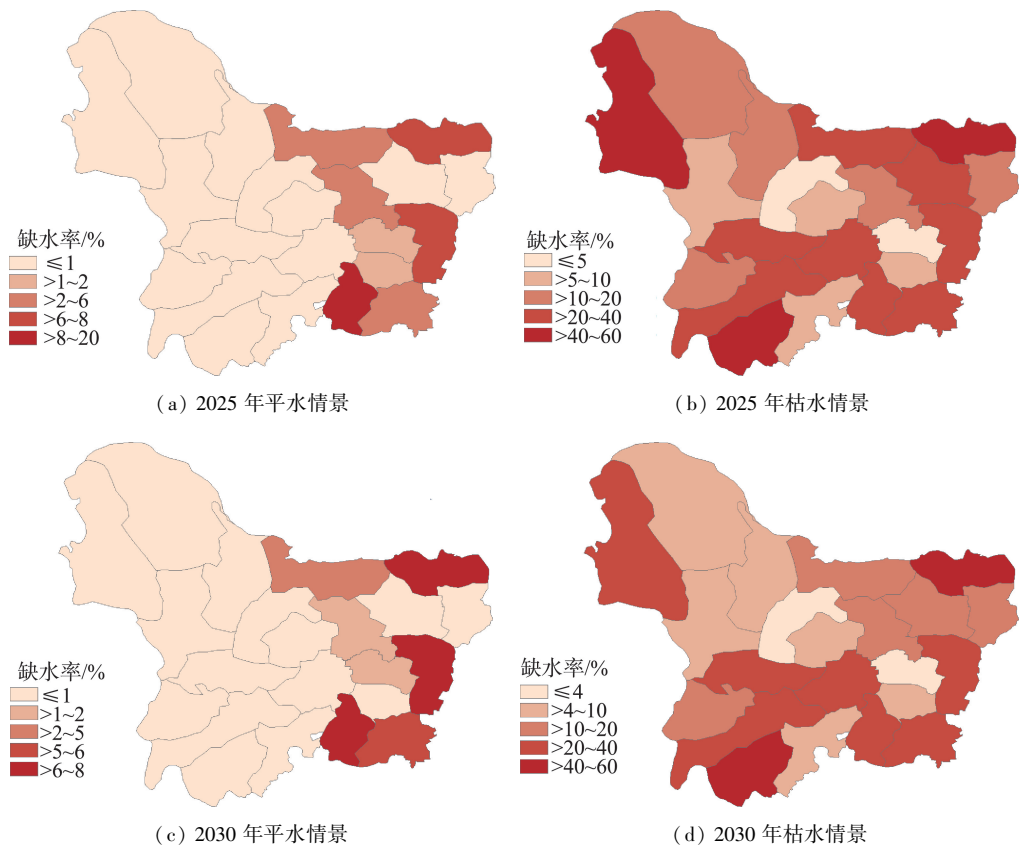


图 6 2025 年与 2030 年平枯情景下缺水率

Fig. 6 Water shortage rate under normal and dry scenarios in 2025 and 2030

计划》等政策要求,为武安市打造生态型经济强市提供决策参考。由于不同情景下的缺水行业都集中在农业上,因此重点针对农业缺水情况展开分析。

平水情景下,2025 年和 2030 年的农业缺水率分别为 6.45% 和 5.05%,缺水的乡镇即武安镇、安庄乡、矿山镇、土山乡、邑城镇、淑村镇、康二城镇和伯延镇 8 个乡镇,深入分析原因各有不同。其中,第一梯队的武安镇、安庄乡和第二梯队的矿山镇、土山镇均是以工业发展为特色的乡镇,因此在资源有限的情况下,工业需水优先满足,农业需水易被忽略,属于行业竞争造成的“转嫁型缺水”。其他地处武安市东缘的邑城镇、淑村镇、康二城镇和伯延镇,距水利工程分布较远,故难以满足农业需水的愿景,兼有“转嫁型缺水”和“工程性缺水”的原因。与之形成鲜明对比的是,实施地下水高效节水灌溉项目以改善地下水超采局面的阳邑镇、午汲镇、冶陶镇等乡镇均未出现农业缺水情况,为今后实施“以水定地”、水资源管理侧重开展农业高效节水提供了依据。

枯水情景下,2025 年和 2030 年农业依然是水资源缺口较大的行业,整体农业缺水率分别为 44.11%、42.47%,所有乡镇分配至农业的水量都未达到该乡镇在枯水情景下农业的所需水量,其中武安镇、安庄乡农业缺水率均高于 70%,且近半数乡镇的农业缺水率超过 50%。结合现状年武安市农业灌溉的供水结构分析,农业上超 50% 的水量由地表水提供,表明在不突破浅层地下水用水总量的红线控制的情况下,枯水情景自产地表水的不充分利用使得农业用水难以保证。

横向对比相同规划年不同情景农业缺水率,可以发现两者百分位相差较大,一方面印证了武安市“望天收”的农业生产方式,另一方面揭示了地下水保护政策背景下,受山区地形约束,地表水资源与农业之间的供需矛盾更加突出的痛点;纵向比较不同规划年相同情景下的农业缺水率,显示 2030 年的农业缺水率较 2025 年略小,因前者更加充分地考虑了节水灌溉方式的推行效率,体现出绿色高效生产技术在缓解水量供需矛盾上的贡献。因此尽管农业仍是域内缺水较为严重的行业,依然可以从矛盾出发,采取相应对策化解,未来可适当调整农业结构,增加雨养农业,因地制宜地扩大高标准管道灌溉的规模。

上述行政区与行业缺水率的分析为武安市产业结构完善提供优化基础。未来,应发挥乡镇发展的主观能动性,进一步提高社会经济的适水性。其中,第一梯队抓住工业龙头带动经济发展的势

头,以寻找引入新兴低耗能产业为突破口,倒逼现有产业的改造升级,以提高工业节水效率和效益,为工业的增长扩容留足家底;第二梯队要协调好产业间矛盾,做好统筹兼顾,在开采矿产资源发展二产时,因地制宜跳出传统农业的圈子,在有条件的地方加快开展绿色种养循环农业项目,增强产业与地域空间和水利工程分布的适应性,加大灌区渠系防渗节水工程建设,灌溉方式向高效节水灌溉方式转型,促进形成不同产业交互融合、互相带动的新组合;第三梯队以蓄积和高效利用自然降水为核心,推广集雨补灌技术,并优化作物种植结构,推广开展旱作农业新品种等。充分发挥先天地质资源优势、规模化旅游产业,逐步形成低碳节水生态产业为龙头的新格局。

4.3 供水结构优化

从供给侧来看,近远期规划水平年的地表水、地下水 and 非常规水的三水源供水类型依旧没有改变,但结构优化较明显。主要体现在地表水和非常规水供水比例有所提升,地下水供给占比相应减小,其中 2025 年平水情景下地表水、浅层地下水、非常规水的比例为 50:32:18,枯水情景下该比例为 49:33:18;2030 年平水情景下该比例分别为 47:34:19 和 46:35:19。可见,较现状年比例(7:49:14)而言,不同规划年的地表水占比均超过了 45%,非常规水占比提高了近 5% 左右,地下水则降低至 35% 以下。深入解析各乡镇供用水结构(图 7),除了伯延镇、活水乡、马庄乡、徘徊镇邑城镇无非常规水供给外,大部分乡镇为三水源供水结构。其中,伯延镇、磁山镇等地下水供给处于较高水平,安庄乡和团城乡地下水供给处于较低水平,其他各乡镇地下水供给较均衡。

未来,随着南水北调入武安工程的开展,加之污水处理工程的建设及对矿水利用的重视,地表水及非常规水的供给会逐渐加大,可逐步完成水源置换工作,这也有利于武安市地下水综合治理的深入开展。通过采取工程与非工程措施相统一的手段,如确保已实施工程的效益最大化,有效减少地下水的可开采量;从审批源头上严格控制新增地下水项目申报审批,对不符合规定、不适应背景的新增地下水项目不予审批;强化保护地下水资源的宣传力度,加大地下水水费、水资源税征收力度等,推进建设和完善地下水管理制度,供水结构进一步优化。

综合不同规划年各情景的水资源配置方案可知,武安市工业为用水量最大的行业;而农业是缺水情况最严峻的行业。且由于武安市地处山区,地下

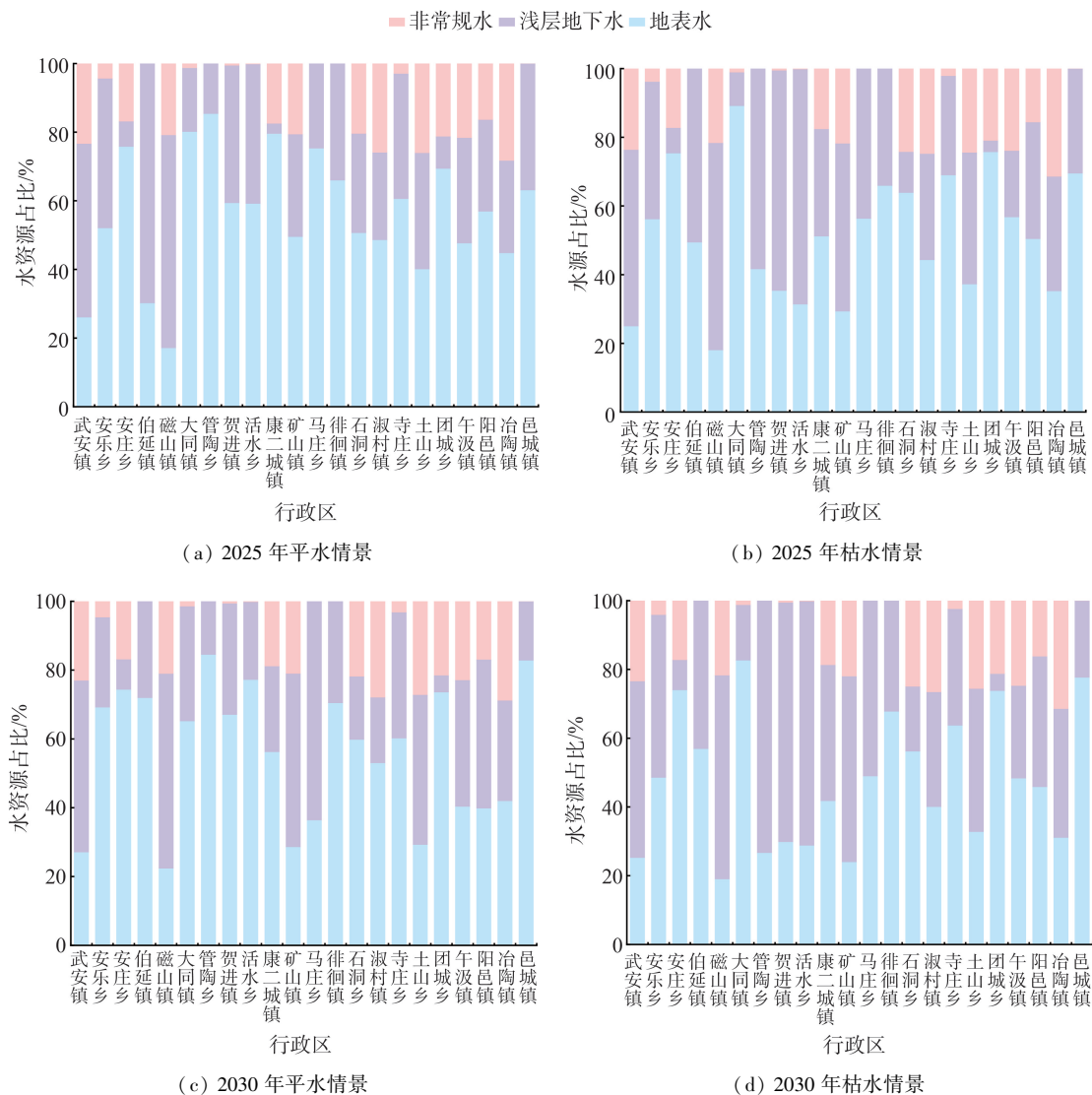


图7 2025年与2030年平枯情景下供水结构

Fig.7 Water supply structure under normal and dry scenarios in 2025 and 2030

水开采及其他水源运移等工程的开展易受水文地质等因素的影响。针对鲜明的地域特征,今后尽可能地发挥现有水资源的利用效率尤为必要。就武安市作为工业发展突出的县域而言,未来应加快节水改造工作的进程,以节水为重点抓手,园区和企业同发力开展产业的降能提效,积极推广先进的节水和污水处理回用技术,提高水的重复利用率。对于农业缺水严峻的情况,应以巩固提升旱区农业综合生产能力为目标,在提高自然降水利用效率的同时,一方面加大节水灌溉示范项目建设与农业节水种植技术力度,提高农田灌溉水有效利用系数,另一方面因地制宜推广耐旱作物,扩大需水与降水适配度高的作物品种;针对武安市为山区的地形条件,未来需加快建设有质量的供水系统,实施计划用水,从而缓解山区人民用水需求与用水短缺之间的矛盾。上述成果为武安市今后开展水资源精细化管理和节水型社会

建设提供思路,为武安市落实“以水四定”举措,强化水资源刚性约束制度提供技术支撑。

5 结 论

a. 2025 年平水情景优化配置水资源量为 20081.14 万 m^3 ,整体缺水率为 1.56%,枯水情景下优化配置水资源量为 20061.44 万 m^3 ,整体缺水率为 15.28%;2030 年平水情景优化配置水资源量为 19561.38 万 m^3 ,整体缺水率为 1.04%,枯水情景优化配置水资源量为 19551.44 万 m^3 ,整体缺水率为 12.67%。

b. 不同规划年平枯情景下的水资源量配置均可满足生活、生态和工业的水量需求,缺水行业主要为农业。优化配置后 2025 年平枯情景下农业缺水率分别为 6.45%、44.11%,2030 年分别为 5.05%、42.47%。对不同乡镇的配置结果对比分析,揭示了

节水灌溉方式对缓解农业缺水问题的贡献,剖析了在武安市水资源有限的禀赋条件下,行业竞争转嫁和工程问题共同造成农业缺水,为未来武安市农业种植结构及规模调整提供依据,为深入开展高效节水灌溉提供决策依据。

c. 模型优化后供水结构改善较明显,重点体现为地表水利用比例的提升,2025 年地表水对全域的水量供给近 50%;非常规水的供给量可观,未来随着中水回用水平提高,企业水资源向循环利用转型发展,非常规水的利用效果更加显著;地下水供给占比较现状年明显减小,为武安市建立健全地下水管理制度及区域绿色高质量发展提供技术支撑。这一结果也反映了南水北调中线重点配套工程扩建西延至武安市的必要性和紧迫性。

参考文献:

- [1] 赵勇,王庆明,王浩,等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 8-18. (ZHAO Yong, WANG Qingming, WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei Region challenges and strategies[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 8-18. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 方国华,郭玉雪,闻昕,等. 改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))
- [4] 张倩,张建丰,李涛,等. 粒子群算法的改进及在农业水资源配置的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(6): 637-642. (ZHANG Qian, ZHANG Jianfeng, LI Tao, et al. Improvement of particle swarm optimization and its application in agricultural water resources allocation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2020, 38(6): 637-642. (in Chinese))
- [5] 刘美钰,张雷,栾清华,等. 人工鱼群算法在河间市水资源优化配置中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 74-83. (LIU Meiyu, ZHANG Lei, LUAN Qinghua, et al. Application of artificial fish swarm algorithm in optimal allocation of water resources in Hejian County, China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3): 74-83. (in Chinese))
- [6] 李新德,沙金霞,刘彬,等. 基于鲸鱼优化算法的水资源优化配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 40-45. (LI Xinde, SHA Jinxia, LIU Bin, et al. Optimal allocation of water resources based on whale optimization algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 40-45. (in Chinese))
- [7] 杜佰林,张建丰,高泽海,等. 基于模拟退火粒子群算法的水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(3): 292-299. (DU Bailin, ZHANG Jianfeng, GAO Zehai, et al. Optimal allocation of water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(3): 292-299. (in Chinese))
- [8] 冀宁远,杨侃,陈静,等. 基于 IABC-PSO 算法的区域水资源优化配置模型研究[J]. 人民长江, 2021, 52(6): 49-57. (JI Ningyuan, YANG Kan, CHEN Jing, et al. Research on optimal allocation model of regional water resources based on IABC-PSO algorithm[J]. Yangtze River, 2021, 52(6): 49-57. (in Chinese))
- [9] 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]. 水资源保护, 2022, 38(3): 58-64. (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]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [10] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] 沙金霞. 改进的 NSGA-II 法在邢台市水资源优化配置中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 21-25. (SHA Jinxia. Application of improved NSGA-II in optimal allocation of water resources in Xingtai City[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(5): 21-25. (in Chinese))
- [12] 吴云,曾超,杨侃,等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 71-75. (WU Yun, ZENG Chao, YANG Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm[J]. Yellow River, 2020, 42(5): 71-75. (in Chinese))
- [13] 朱思峰,李子胥. 基于改进型 NSGA-II 算法的晋中市水资源优化配置[J/OL]. 人民黄河. [2022-08-29]. http://ss.zhizhen.com/detail_38502727. (ZHU Sifeng,

- LI Xixu. Research on optimal allocation of water resources based on Improved NSGA-II algorithm in Jinzhong City[J/OL]. Yellow River. [2022-08-29]. http://ss.zhizhen.com/detail_38502727. (in Chinese))
- [14] 王慧,高泽海,孙超等. 基于 NSGA-II 的灌区水资源优化配置模型及应用[J]. 灌溉排水学报,2021,40(9): 118-124. (WANG Hui, GAO Zehai, SUN Chao, et al. Water resource allocation for irrigation optimized using the NSGA-II model: theory and application[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 118-124. (in Chinese))
- [15] 田进宽,郭佳航,左其亨,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. (in Chinese))
- [16] 曾思栋,夏军,黄会勇,等. 分布式水资源配置模型 DTVGM-WEAR 的开发及应用[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):1-6. (ZENG Sidong, XIA Jun, HUANG Huiyong, et al. Development and application of distributed water resources allocation model: DTVGM-WEAR[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2016,14(3):1-6. (in Chinese))
- [17] 姜秋香,曹璐,王子龙,等. 基于 CVaR-TSP 的黑龙江市水资源配置及风险管理[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):40-46. (JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, et al. Urban water resources allocation and risk management in Helongjiang Province based on CVaR-TSP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):40-46. (in Chinese))
- [18] 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. (XIANG Long, GONG Hongbo. Regional water resources allocation in Yuhuan based on IFMOP [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):49-53. (in Chinese))
- [19] 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. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part I : theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1451-1459. (in Chinese))
- [20] 曹永强,李玲慧. 基于水资源综合模拟与调配一体化模型的北京市水资源模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):25-31. (CAO Yongqiang, LI Linghui. Simulation analysis of water resources in Beijing based on water allocation and simulation model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):25-31. (in Chinese))
- [21] 杜丽娟,陈根发,柳长顺,等. 基于 GWAS 模型的灌区水资源优化配置研究:以淠史杭灌区为例[J]. 水利水电技术,2020,51(12):26-35. (DU Lijuan, CHEN Genfa, LIU Changshun, et al. GWAS model-based optimal allocation of water resources in irrigation district[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(12):26-35. (in Chinese))
- [22] 王立志. 武安市水资源综合规划管理研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2011.
- [23] 刘美钰. 海兴县水资源安全评价及优化配置研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2019.
- [24] 闫小斌. 基于 WAS 模型的陕北农牧交错带水资源配置研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- (收稿日期:2022-05-04 编辑:王芳)

(上接第 23 页)

- [24] MAI Y, LIANG Y, CHENG M, et al. Coupling oxidation of acid volatile sulfide, ferrous iron, and ammonia nitrogen from black-odorous sediment via autotrophic denitrification-anammox by nitrate addition[J]. Science of the Total Environment, 2021,790: 147972.
- [25] NA Y, WANG S, PARK S S. A mathematical model to estimate nitrate release from ocher pellets applied to anaerobic benthic sediment [J]. Ecological Modelling, 2006,199(3): 324-335.
- [26] XIA D, ZHAO H, KOBAYASHI S, et al. Effect of remediation reagents on bacterial composition and ecological function in black-odorous water sediments[J]. Archives of Microbiology, 2022,204(5):280.
- [27] YANG X, LI E, LIU F, et al. Interactions of PAH-degradation and nitrate-/sulfate-reducing assemblages in anaerobic sediment microbial community [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,388: 122068.
- [28] LI W, ZHANG S, ZHANG L, et al. In-situ remediation of sediment by calcium nitrate combined with composite microorganisms under low-DO regulation [J]. Science of the Total Environment, 2019,697: 134109.
- [29] LIU X, TAO Y, ZHOU K, et al. Effect of water quality improvement on the remediation of river sediment due to the addition of calcium nitrate [J]. Science of the Total Environment, 2017,575: 887-894.
- (收稿日期:2022-06-03 编辑:彭桃英)