

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.01.016

多水源多用户水资源时空动态适配方法研究

刘攀^{1,2}, 桑学锋³, 张思琦³, 王浩³, 郑阳³

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北武汉 430010; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对区域多水源多用户水资源配置难点, 提出了基于实际供、用水特征与行业用水动态需求的取用水时空适配改进算法(WISAA), 用于改进水资源全过程模拟(WAS)模型的供水过程计算模块, 并应用于湖北省鄂州市, 验证WISAA的改进效果。结果表明: 改进的WAS模型对不同水源、不同行业的供水量模拟相对误差均小于2%, WISAA可有效应对多水源时段来水变化和配水计算过程不稳定的难点, 使年内供水过程愈加稳健; 在行业分(配)水比系数小于0.6时, 改进的WAS模型年内供水模拟结果平均绝对百分比误差小于5%, WISAA优化效果更为显著。

关键词: 水资源配置; 多水源多用户; 取用水时空适配改进算法; 水资源全过程模拟模型; 鄂州市
中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)01-0123-08

Research on spatiotemporal dynamic adaptation method for multi-source and multi-user water resources//LIU Pan^{1,2}, SANG Xuefeng³, ZHANG Siqi³, WANG Hao³, ZHENG Yang³ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of regional multi-source and multi-user water resource allocation, the water intake space-time adaptation algorithm (WISAA) was proposed based on actual water supply and usage characteristics and dynamic industry water demand. The water supply process calculation module of the water allocation and simulation (WAS) model was improved and applied to Ezhou City, Hubei Province to verify the improvement effect of WISAA. The results show that the relative error of the modified WAS model for water supply of different water sources and different industries is less than 2%, and WISAA can effectively address the difficulties of water supply changes and unstable water distribution calculation processes during multi-source periods, making the water supply process more robust throughout the year. When the water distribution ratio coefficient in the industry is less than 0.6, the average absolute percentage error of the annual water supply simulation results of modified WAS model is less than 5%, and the optimization effect of WISAA is more significant.

Key words: water resource allocation; multi-source and multi-user; water intake space-time adaptation algorithm; water allocation and simulation model; Ezhou City

在全球气候变化影响日益明显及工业化进程不断加快的背景下, 水资源已经成为全球众多区域生存环境和经济发展的制约瓶颈。我国近2/3的城市存在不同程度的缺水, 社会经济的快速发展与水资源短缺的矛盾不断加大^[1-2]。水资源配置系统是一个面向未来决策的、多目标多主体的复杂系统, 基于区域地形条件、水系的拓扑结构, 根据水资源状况、水利工程供水能力、用户用水需求, 采取一定供水优

先级顺序和供水保证度, 实现水资源的最合理分配过程, 是连接社会水循环与自然水循环的纽带^[3]。经过多年发展, 水资源配置在理论方法上历经了单一水量的合理配置、水与经济协调配置^[4-5]、水-经济-生态协调配置^[6]、广义的水资源配置^[7]、跨流域的大系统配置^[8]、量质一体化配置^[9]等阶段。随着流域水系统与社会系统、生态系统的矛盾加大, 为满足多个用水主体之间不同的水量、水质要求, 在多维

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200200); 水利部重大科技项目(SKS-2022118); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103044)

作者简介: 刘攀(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文与水资源、水环境综合调控研究。E-mail: pande72@163.com

通信作者: 桑学锋(1978—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文与水资源、水环境综合调控研究。E-mail: sangxf@iwhr.com

协调目标下需进一步优化供水策略以适应生活、生产和生态领域的用水需求。为提高计算的准确性和可靠性,结合现代信息技术,面向多目标、多层次的水资源优化配置算法被广泛提出。例如:王世新等^[10]利用相关性分析方法和层次分析法开展了流域水资源空间分配研究;涂燕等^[11]综合考虑水资源与社会、经济、环境之间的决策冲突关系,构建混合不确定性环境下的区域水资源优化配置双层多目标规划模型,以实现多层次、多主体、多目标的协同优化。这些研究总体上都是将需水作为约束条件,目标函数为供水量最大、缺水量最小,建立水资源配置模型并提出水资源配置方案^[12]。变化环境下的水资源演变与科学调控一直是国际研究的热点问题^[13],在自然条件与人类活动的双重影响下,区域供需水均呈现随机性的特征,在水资源禀赋条件无法改变状况下,供水水源不匹配性突显^[14-16],需对配水方案优化调整以提高对环境的适应性。进一步调整水资源利用结构、实施水资源科学配置、提高水资源利用效率成为缺水区域解决水安全问题的重点。

水资源的优化配置包括需水管理与供水管理两个方面,即需水方面通过调整产业结构和生产布局,利用节水措施抑制需求增长势头,以适应不利的水资源条件^[17];供水方面则是协调管理用水单位竞争性用水,并通过工程措施协调天然水资源的时空分布与生产布局不匹配的被动局面^[18]。供需分析是水资源配置的核心与基础^[19],本文针对变化环境下水源来水不均与用水户稳定需水过程不匹配的

问题,结合水资源系统多水源多用户特点,提出一种仿真实际供用水过程的取用水动态适配算法(water intake space-time adaptation algorithm, WISAA),克服不同水源由于时段水量变化和行业分水比系数带来的配水量不稳定难点,以提升模型配置稳健性。将 WISAA 与水资源全过程模拟模型(water allocation and simulation, WAS)模型耦合,改进 WAS 模型的供用水过程计算模块和水资源配置模块。并将改进的 WAS 模型应用于湖北省鄂州市的水资源配置研究,以公平性最优、缺水率最小为目标函数,将区域可供水资源量和河道生态基流作为约束条件,提出优化水资源配置方案,以期实现区域水资源系统与经济社会的可持续发展。

1 研究方法

1.1 研究框架

多水源联合供水主要决定于天然来水条件、用户需求状态和供水工程的调节能力。本文基于传统水资源配置方法,面向区域复杂水源水质条件和多用户的用水需求,研究在结合用水户需水比例与水源供水能力的基础上,融合时段多维供用水特征,利用 WISAA 提升配置精度。研究框架见图 1,图中行业分水比系数是供用水过程中的关键参数,代表各水源与各行业之间的供水比例。

1.2 行业取水算法

1.2.1 传统算法

传统行业用水配置方法中以供水量为导向,生

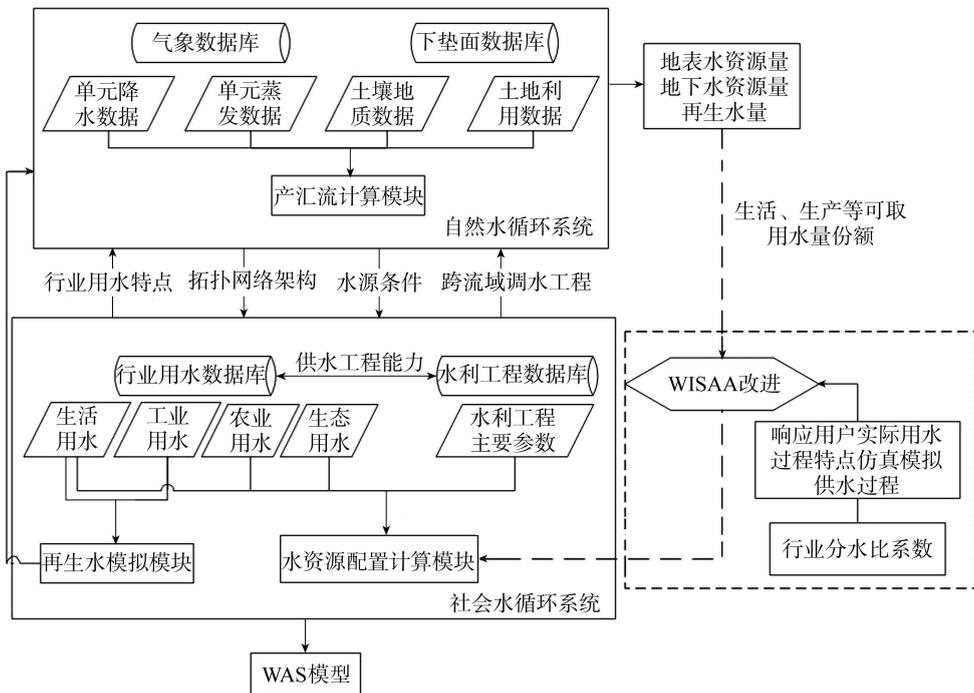


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

态、工业、农业等行业取水量的计算公式为

$$S_{i,l,t} = \min(\alpha_{i,l} Q_{i,t}, W_{i,l,t} - S_{i,l,t-1})$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

其中

$$\sum_{l=1}^m \alpha_{i,l} = 1$$

式中: $S_{i,l,t}$ 为第 i 种水源第 l 种行业在 t 时段的取水量; $Q_{i,t}$ 为第 i 种水源在 t 时段的可供水量; $\alpha_{i,l}$ 为第 i 种水源第 l 种行业的分水比系数; $W_{i,l,t}$ 为第 i 种水源第 l 种行业在 t 时段的行业需水量; n 为区域水源数量; m 为用水行业数量; T 为研究总时段。

1.2.2 WISAA

基于经济社会行业常规年内相对配水稳态的特点, 各行业的总取水量计算公式为

$$S'_{i,t} = \sum_{l=1}^m \gamma_l W_{i,l,t} \quad (2)$$

式中: $S'_{i,t}$ 为改进后第 i 种水源在 t 时段的总取水量; γ_l 为第 l 种行业的配水比系数。水量约束遵循总量控制原则, 水源的总供水量应不大于其可供水量, 供水总量应满足用户用水要求。

WISAA 以实际供水特征为导向, 通过长系列水文资料, 考虑区域供用水结构, 得到行业配水比系数, 则改进后的行业取水量计算公式为

$$S'_{i,l,t} = \min[Q_{i,t}, \gamma_l (W_{i,l,t} - S'_{i,l,t-1})] \quad (3)$$

式中 $S'_{i,l,t}$ 为改进后第 i 种水源第 l 种行业在 t 时段的取水量。

水源供水优先次序由水源水质和供水能力因素共同决定, 用水行业优先次序由用水需求重要性因素决定。本文用水行业重要性从大到小依次为: 生活、生态、工业、农业。

1.3 WAS 模型的改进

随着经济社会的发展, 自然水循环系统与社会水循环系统的实时联动性、动态互馈性特点愈加突出, 时段的来水会影响单元用户用水, 上一时段工程调蓄与行业用水过程会影响下一个时段的用水, 上游用户的用水与退水会影响下游用户的用水, 重复用水、外调水量会影响下游河网的径流。WAS 模型可实现天然产汇流与用水户取、排水以及上下游取用水之间的动态联动^[20-23], 将 WISAA 与 WAS 模型相耦合, 可实现区域多水源多用户水资源配置的时空动态适配。WAS 模型架构及改进部分的示意图如图 2 所示。

2 实例验证

2.1 研究区概况

选取湖北省鄂州市作为实例应用研究区, 其位于鄂东南, 地处北纬 $30^{\circ}00' \sim 30^{\circ}06'$ 、东经 $114^{\circ}32' \sim$

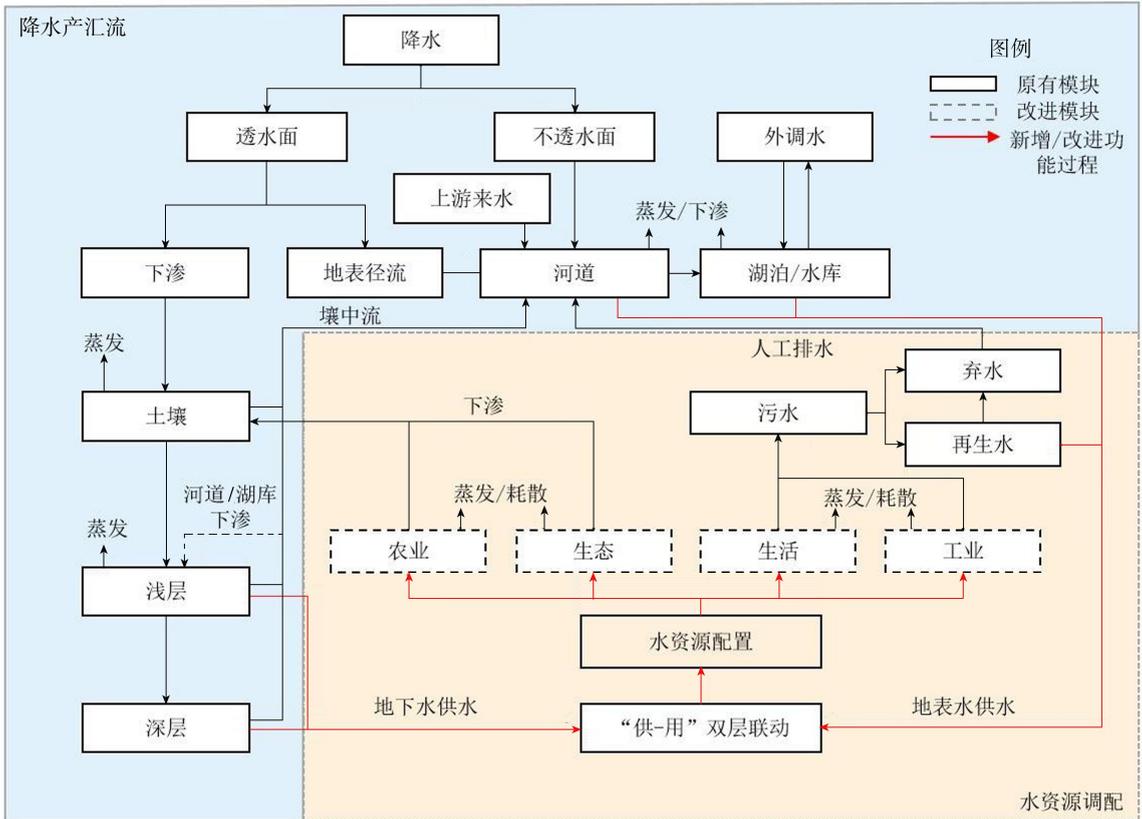


图 2 WAS 模型架构及改进部分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of WAS model architecture and improvement

115°05′,辖鄂城区、华容区和梁子湖3个区,常住人口107.12万人。研究区位于长江中游南岸,辖区总面积1596 km²,其中山区面积200 km²、丘陵面积600 km²、平原湖区面积794 km²、耕地面积409 km²。研究区概况如图3所示。

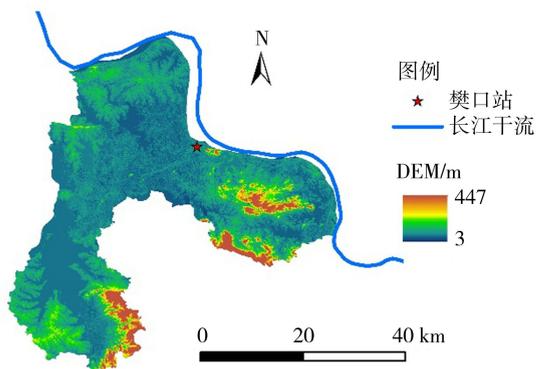


图3 研究区概况

Fig. 3 Overview of study area

2.2 数据来源

模型基础资料数据库包括:降水、蒸发数据为1956—2020年逐月数据,来源于鄂州市域5个站点和黄冈、大冶2个相邻县市站点;鄂州市土地利用数据,来源于市统计年鉴、湖北省统计年鉴、相邻省统计年鉴以及1985年以来的5期遥感土地利用图反演数据(1985年、1990年、1995年、2000年、2014年);水利工程数据(水库基本信息、兴利水位和水库供水特性等参数),数据来源于水利普查、鄂州市防汛手册统计;工业、农业、生活用水数据,来源于鄂州市水资源公报、统计年鉴。

2.3 鄂州市 WAS 模型构建与校验

鄂州市根据以人为本的原则,按用户的重要性确定供水次序,优先满足生活用水,其次满足最小生态用水,剩余水量在工业与农业之间按比例配置;对于连续枯水年和特枯年的应急用水方案,应重点保障人民生活用水,兼顾重点行业用水。

2.3.1 模型构建

采用 WAS 模型“基本单元-计算单元-水文单元”的单元划分方法,将研究区划分为17个水文单元,根据区域水网结构,构建拓扑网络架构,如图4所示。

2.3.2 模型校验

以月为基本调节计算时段,以主要河流重要控制站点为控制节点,在水源与用户之间建立单水源单用户、单水源多用户、多水源单用户供需关系,利用改进的 WAS 模型对鄂州市1959—2020年逐月二元水循环进行模拟。通过水资源配置计算,依据各水源、各行业的分(配)水比系数,得到经济社会用

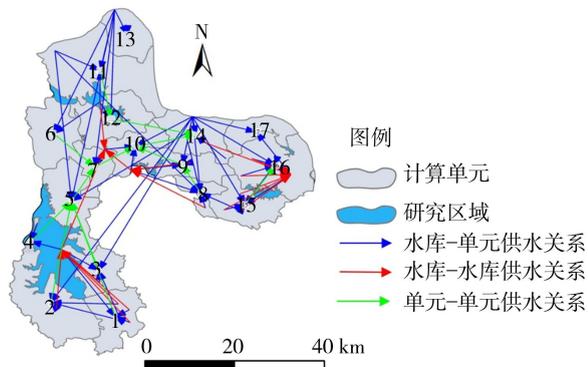


图4 计算单元划分与拓扑网络构建

Fig. 4 Partition of computing units and construction of topological networks

水模块供水单元及各行业供水量。鄂州市域内多年平均总供水量模拟结果为7.992亿 m³,实际总供水量为8.038亿 m³,相对误差为0.6%;同时,不同水源、不同行业的供水量模拟相对误差均小于2%。研究表明耦合 WISAA 的 WAS 模型模拟效果较好,可以用于鄂州市水资源配置研究。

2.4 结果与分析

2.4.1 鄂州市水资源供需特征

表1为2020年鄂州市水资源供需平衡情况。由表1可见,2020年鄂州市总供水量为9.36亿 m³,其中地表水供水(水厂+本地河湖+再生水)9.25亿 m³,占总供水量的99%;地下水源供水量0.11亿 m³,占总供水量的1%。地表水供水水源主要包括长江引提水(水厂)、本地自产水(本地河湖)以及生活和工业排水处理后回用的再生水。城乡供水一体化供水占全市总供水量的69%,其中长江水供水占有所有水厂供水能力的96.4%,主要用于居民生活、城镇公共和工业用水。鄂州市农业供水量为2.47亿 m³,以地表水源为主(直接从河网水系取水进行农业灌溉);生活与工业供水量为6.85亿 m³,主要供水水源为水厂供水、地下水;城市生态供水以城市供水管网为主。在多年平均来水场景下,生活用水和生态用水的缺水率较低,工业用水的缺水率中等,农业缺水率较高。

表1 2020年鄂州市水资源供需平衡情况

Table 1 Supply and demand balance situation of water resources of Ezhou City in 2020

行业	需水量/亿 m ³	供水量/亿 m ³	缺水率/%
城市生活	0.91	0.89	2.0
农村生活	0.11	0.11	1.9
工业	6.15	5.86	4.8
农业	3.05	2.47	19.1
城市生态	0.03	0.03	2.0
合计	10.25	9.36	8.7

图5为鄂州市1956—2016年降水量变化过程,

可见降水量年际差异较大,最大值与最小值相差 1 000 mm 左右,呈现连续枯水年组和连续丰水年组交替变化中不显著减少趋势。图 6 为鄂州市降水量年内分布情况,可见鄂州市年内降水分布不均,降雨集中于 3—10 月,占全年降水量的 82%~85%,主要水系降水量集中分布在 3—8 月。

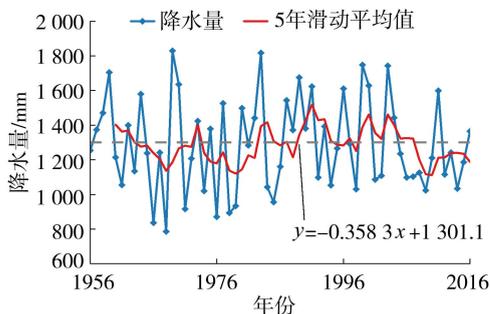


图 5 鄂州市降水量年际变化趋势

Fig. 5 Interannual variation trend of precipitation in Ezhou City

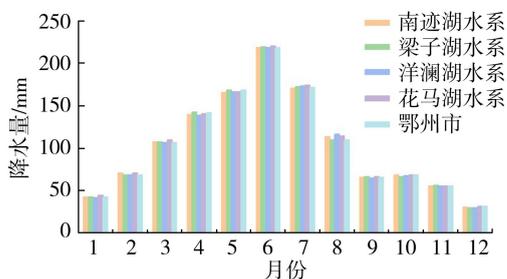


图 6 鄂州市降水量年内分布

Fig. 6 Monthly distribution of precipitation in Ezhou City

鄂州市年内时段河网来水过程主要集中于汛期,其中 4—7 月来水量占比达 55.08%;6 月达到峰值,6 月来水量占全年总来水量的近 20%,分布十分不均。经济社会人口和产业结构等驱动因素的年内变化相对稳定,其需水量受气象等不确定因素影响较小,行业实际用水量在年内基本稳定,各时段分配相对均匀。

2.4.2 WISAA 改进效果

针对鄂州市年内可用水量的变化特征与生活、农业、工业等部门用水过程的不匹配问题,利用 WAS 模型模拟鄂州市不同月份的河网可供水量与相对应的行业需水量,其中行业取水量计算分别采用改进前的传统算法和改进后的 WISAA。图 7 为算法改进前后 WAS 模型模拟结果对比,可见在相同河网来水量下,改进后算法模拟的水量分配较改进前算法模拟的水量分配更加稳定,并贴近期望供水量。

图 8 为算法改进前后 WAS 模型模拟的各计算单元供水过程对比。采用传统算法的条件下,各单

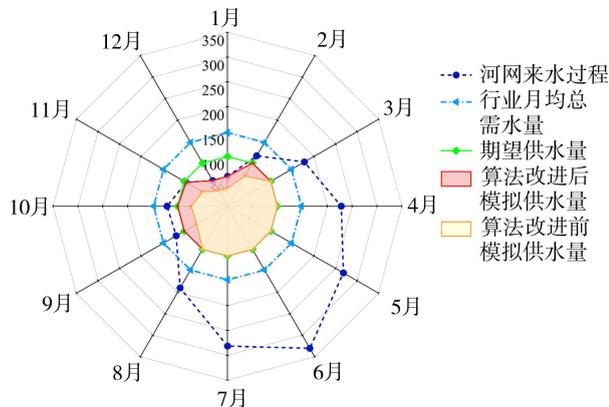


图 7 算法改进前后 WAS 模型模拟结果对比(单位:万 m³)

Fig. 7 Comparison of WAS model simulation results before and after algorithm improvement (unit: 10⁴ m³)

元的供水量变化幅度较大,尤其在行业需水量远大于水源可供水量时,各单元河网水供水过程均具有较大幅度的波动,可见采用传统算法模拟的供水过程受来水不确定性因素的影响偏大;采用 WISAA 的条件下,相同的供需过程中各单元供水过程均呈现较为稳健的特征,降低了年内来水不确定性对供水过程的影响,具有更好的效果。

2.4.3 参数适用性讨论

行业分(配)水比系数是利用 WAS 模型对研究区进行水资源配置过程中最为重要的参数,选取平均绝对百分比误差作为评价指标,对行业分(配)水比系数进行敏感性分析。为量化行业分(配)水比系数变化对模拟结果影响,维持 17 个计算单元的河网来水量和行业需水量不变,设置行业分(配)水比系数的范围为 0.1~1.0,调整步长为 0.05,样本数 9 600,分析结果见图 9。由图 9 可见,行业分(配)水比系数大于 0.6 的情况下,WAS 模型模拟年内供水量的平均绝对百分比误差小于 5%,并且随着行业分(配)水比系数增大,WAS 模型供水量模拟结果平均绝对百分比误差呈下降趋势。因此,在供水水源的行业取水量小于行业总用水量的 60%时,WAS 模型适用性更优。

3 结论

a. 针对河网水源来水不均与用水户年内稳定需水过程不匹配的问题,利用 WISAA 改进 WAS 模型的供用水计算模块,构建了改进的 WAS 模型。克服了不同水源由于时段水量变化和行业分(配)水比系数带来的配水量不稳定难点,提升了模型配置精度。

b. 将改进的 WAS 模型在鄂州市进行实例应用,结果表明水资源配置误差为 0.6%,各水源、各

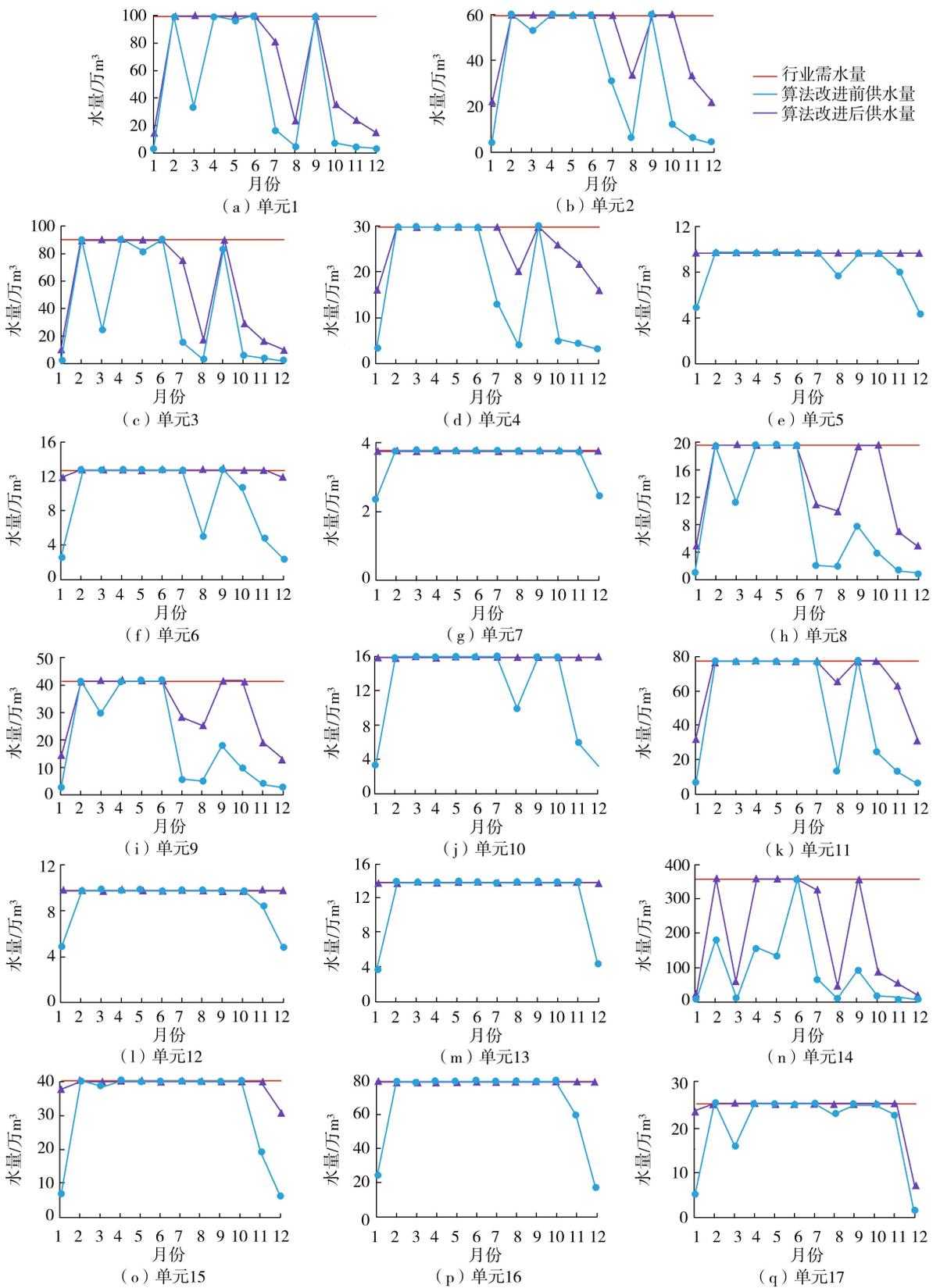


图8 算法改进前后 WAS 模型模拟的各计算单元供水过程

Fig. 8 Water supply and demand process of different computing units simulated by WAS model before and after algorithm improvement

行业供水模拟相对误差均小于 2%。对比了 WISAA 改进前后的水资源配置效果,发现 WISAA 可以使相同的供需过程中各单元供水过程均呈现较为稳健的

特征,降低了年内来水不确定性对供水过程的影响,具有更好的效果。

c. 行业分(配)水比系数的敏感性分析结果表

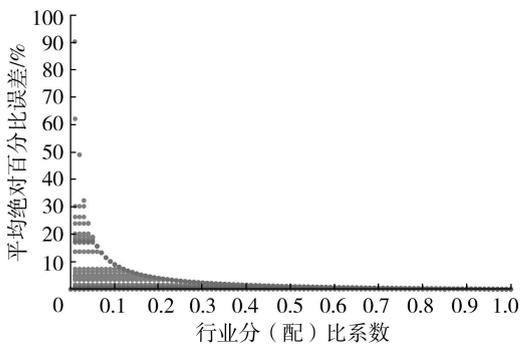


图9 行业分(配)水比系数敏感性分析结果

Fig.9 Sensitivity analysis of industry water separation ratio parameters

明,行业分(配)水比系数大于0.6的情况下,WAS模型模拟年内供水量的平均绝对百分比误差小于5%,并且随着行业分(配)水比系数增大,WAS模型供水量模拟结果平均绝对百分比误差呈下降趋势。

参考文献:

[1] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等.“四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 111-117. (in Chinese))

[2] 李轶,万芬芬,张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 1-9. (in Chinese))

[3] 许凯,何子杰,赵树辰,等. 国内外水资源配置方法对比浅析[C]//中国水利学会2018学术年会论文集第五分册. 南昌:中国水利学会,2018.

[4] DAVIJANI M H, BANIHABIB M E, ANVAR A N, et al. Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency [J]. Water Resources Management, 2016, 30(3): 927-946.

[5] HU Zhineng, WEI Changting, YAO Liming, et al. A multi-objective optimization model with conditional value-at-risk constraints for water allocation equality [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 330-342.

[6] XU Zhongwen, YAO Liming, CHEN Xudong. Urban water supply system optimization and planning: bi-objective optimization and system dynamics methods [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106373.

[7] 裴源生,赵勇,张金萍. 广义水资源合理配置研究(I): 理论[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 1-7. (PEI Yuansheng, ZHAO Yong, ZHANG Jinping. Study on rational deployment of generalized water resources I: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 1-7. (in Chinese))

[8] 游进军,林鹏飞,王静,等. 跨流域调水工程水量配置与调度耦合方法研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 16-22. (YOU Jinjun, LIN Pengfei, WANG Jing, et al. Study on method for coupling water allocation with project operation for inter-basin water transfer project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(1): 16-22. (in Chinese))

[9] 高黎明,陈华伟,李福林. 基于水量水质双控的缺水地区水资源优化配置[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 70-78. (GAO Liming, CHEN Huawei, LI Fulin. Optimal allocation of water resources in water-scarce areas based on dual control of water quantity and quality [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 70-78. (in Chinese))

[10] 王世新,王利双,周艺,等. 长江流域水资源空间分配[J]. 测绘科学, 2017, 42(8): 33-39. (WANG Shixin, WANG Lishuang, ZHOU Yi, et al. Spatial allocation of water resources in the Yangtze River basin [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(8): 33-39. (in Chinese))

[11] 涂燕,石宏伟,秦晋栋,等. 混合不确定环境下双层多目标区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(8): 2428-2446. (TU Yan, SHI Hongwei, QIN Jindong, et al. Bi-level multi-objective regional water resources optimal allocation under hybrid uncertainty [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2023, 43(8): 2428-2446. (in Chinese))

[12] 彭少明,黄强,张新海,等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-158. (PENG Shaoming, HUANG Qiang, ZHANG Xinhai, et al. Multi-objective planning model for water resources sustainable utilization of Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 153-158. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 李牧翰,赵喜萍,张志卓,等. 面向高质量发展的缺水地区水资源优化配置模型及应用[J]. 人民黄河, 2024, 46(2): 73-79. (LI Muhan, ZHAO Xiping, ZHANG Zhizhuo,

- et al. Model and application of optimal allocation of water resources in water-deficient areas for high-quality development[J]. Yellow River, 2024, 46(2): 73-79. (in Chinese))
- [15] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [16] 徐晋轩, 李一阳, 潘兴瑶, 等. 多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 19-25. (XU Jinxuan, LI Yiyang, PAN Xingyao, et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 19-25. (in Chinese))
- [17] 石碧清, 刘湘, 全玉莲, 等. 需求侧管理技术在秦皇岛市水资源管理中的应用[J]. 水资源保护, 2008, 24(5): 73-75. (SHI Biqing, LIU Xiang, QUAN Yulian, et al. Application of demand-side management technology in water resources management in Qinhuangdao City[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(5): 73-75. (in Chinese))
- [18] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究, 2002, 2(9): 9-11. (WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Progress and prospect for study on water resources optimal allocation in China[J]. Water Resources Development Research, 2002, 2(9): 9-11. (in Chinese))
- [19] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 1-5. (YOU Jinjun, GAN Hong, WANG Hao. Advance in water allocation model and prospect[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(3): 1-5. (in Chinese))
- [20] 常奂宇. WAS 模型研发改进与京津冀水资源配置应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [21] 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))
- [22] 桑学锋, 赵勇, 翟正丽, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(II): 应用[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 201-208. (SANG Xuefeng, ZHAO Yong, ZHAI Zhengli, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part II: application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 201-208. (in Chinese))
- [23] 栾清华, 高昊悦, 刘红亮, 等. 基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an City based on GWAS model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 32-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 04 - 12 编辑: 王芳)

(上接第 113 页)

- [19] 杨明海, 卢晓杨, 孙亚男. 三大经济支撑带创新能力地区差距及分布动态演进: 利用 Dagum 基尼系数和非参数估计方法的实证研究[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(7): 34-42. (YANG Minghai, LU Xiaoyang, SUN Yanan. Regional disparity and distribution dynamics evolution of innovation capability in three major economic support zone: an empirical study based on the Dagum's Gini coefficient and non-parameter estimation method [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2017, 34(7): 34-42. (in Chinese))
- [20] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515-531.
- [21] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进: 基于 Dagum 基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. 农业技术经济, 2013(3): 72-81. (LIU Huajun, BAO Zhen, YANG Qian. Regional disparities and dynamic evolution of carbon emissions from agriculture in China: an empirical study based on Dagum Gini coefficient decomposition and non-parametric estimation methods [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013(3): 72-81. (in Chinese))
- [22] 郝铭, 段琳琼, 陈常优, 等. 黄河流域与长江经济带农业水资源利用效率与影响因素的差异性研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 267-277. (HAO Ming, DUAN Linqiong, CHEN Changyou, et al. Differences in agricultural water use efficiency and its influencing factors between Yellow River basin and Yangtze River economic belt[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 267-277. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 06 - 24 编辑: 王芳)