

基于水资源空间均衡评价的“荆楚安澜”现代水网 优化布局与组网方案研究

刘为锋^{1,2}, 郭旭宁^{1,2}, 李云玲^{1,2}, 唱彤^{1,2}, 闫佳铭³, 刘奇³, 王冬⁴, 吴永妍⁵

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 水利部水利规划与战略研究中心, 北京 100120;
3. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021; 4. 长江科学院, 湖北 武汉 430010;
5. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为科学构建“荆楚安澜”现代水网,基于湖北省水资源量、供用水量以及经济社会指标等数据,采用水资源空间均衡度评价法,以 2019 年为现状情景、2035 年为水网优化布局情景,分别进行湖北省水资源空间均衡评价。结果表明:现状情景下湖北全省水资源空间均衡处于不均衡状态,其中鄂东南、鄂西北、鄂西南 3 个片区为高质量均衡状态,鄂中南、鄂东北、鄂北 3 个片区为不均衡状态;水网优化布局情景下湖北全省水资源空间均衡均处于高质量均衡状态;“荆楚安澜”现代水网建成后,湖北省节水水平进一步提高,水资源调配工程建设逐步推进,湖北省水资源空间均衡状态得到较大改善,中部、北部缺水问题得以解决,有效改善了湖北省水资源空间均衡状态。

关键词:水资源空间均衡评价;水网优化布局;水资源调配工程;“荆楚安澜”现代水网;湖北省
中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0027-06

Study on optimized layout and networking scheme of “Jingchu Anlan” modern water network based on spatial equilibrium evaluation of water resources//LIU Weifeng^{1,2}, GUO Xuning^{1,2}, LI Yunling^{1,2}, CHANG Tong^{1,2}, YAN Jiaming³, LIU Qi³, WANG Dong⁴, WU Yongyan⁵ (1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. Water Resources Planning and Strategic Research Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 3. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China; 4. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 5. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to scientifically construct the “Jingchu Anlan” modern water network, based on data such as water resources, water supply and consumption, and economic and social indicators in Hubei Province, the water resources spatial equilibrium evaluation method was adopted. Taking 2019 as the current situation scenario and 2035 as the water network optimization layout scenario, the spatial equilibrium evaluation of water resources in Hubei Province was carried out separately. The results indicate that under the current situation scenario, the spatial equilibrium of water resources in Hubei Province is in an unbalanced state. Among them, the three regions in southeastern, northwestern, and southwestern Hubei are in a high-quality balanced state, while the three regions in central southern, northeastern, and northern Hubei are in an unbalanced state. Under the water network optimizing layout scenario, the spatial equilibrium of water resources in Hubei Province is in a high-quality equilibrium state. After the completion of the “Jingchu Anlan” modern water network, the water-saving level in Hubei Province has been further improved, and the construction of water resource allocation projects has gradually advanced. The spatial equilibrium of water resources in Hubei Province will be greatly improved, and the water shortage problem in the central and northern regions will be solved, effectively improving the spatial equilibrium of water resources in Hubei Province.

Key words: spatial equilibrium evaluation of water resources; water network optimized layout; water resource allocation project; “Jingchu Anlan” modern water network; Hubei Province

水资源时空分布不均衡是我国的基本水情,也是制约经济社会高质量发展的关键因素^[1-2]。“节

水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路^[3]是保障国家水安全的根本遵循和行动

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);水利部水利水电规划设计总院“揭榜挂帅”项目

作者简介:刘为锋(1993—),男,高级工程师,博士,主要从事水网规划及调度研究。E-mail:815118706@qq.com

通信作者:郭旭宁(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事水网规划及调度研究。E-mail:guoxuning@giwp.org.cn

指南。“空间均衡”是水资源空间均衡研究所遵循的基本原则,也是国内外诸多学者关注的热点问题^[4-10]。杨荣雪等^[11]在国土空间规划体系下结合供给侧和需求侧的关系构建了水资源空间均衡评价模型,对乌兰察布市水资源空间均衡水平进行了评价。吴成国等^[12]提出基于有序联系度熵的水资源空间均衡综合评价方法,对安徽省水资源空间均衡进行了综合评价。黄锋华等^[13]通过泰尔指数、基尼系数构建了水资源负载指数模型,对粤港澳大湾区人口、GDP 与水资源空间分布的均衡性进行了评价。张玉祥等^[14]构建了联系数和洛伦兹曲线的耦合模型,结合基尼系数法与五元减法集对势分析了新疆水资源空间均衡状态及其变化趋势。李家乐等^[15]构建了水资源配置空间均衡度综合评价指标体系,提出了基于熵权-TOPSIS 法的水资源配置空间均衡度评价方法,对昌邑市水资源配置方案进行了水资源空间均衡度评价。叶继业等^[16]构建了具有鲁棒特性的水资源空间均衡评价模型,对河南省进行了水资源空间均衡评价。吴凤平等^[17]通过构建黄河流域水资源空间均衡诊断及优化耦合模型,诊断了黄河流域的水资源空间均衡水平,并依据诊断结果提出了相应的优化方案。魏豪杉等^[18-19]构建了基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型,在临沂市进行了应用,可实现未来不同时间尺度下的水资源空间均衡与动态调控。

湖北省水资源时空分布不均,经济发展迅速,人口众多,水资源问题突出^[20]。田培等^[21]从水资源负载指数、用水效益、农业水土匹配指标方面出发,研究了湖北省水资源空间均衡性,发现湖北省水资

源空间均衡性逐渐失衡,提出了推广节水技术、积极推进引调水工程等对策。总体来说,目前对湖北省水资源空间均衡研究还较少。鉴于此,本文基于湖北省水资源空间均衡评价,研究全省水资源优化调配应对方案、现代水网优化布局与组网方案,以期科学构建“荆楚安澜”现代水网^[22]提供技术指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖北省是国家重大战略核心区和促进中部地区崛起的战略支点,是国家水网主骨架、大动脉的重要组成部分,是国家重要商品粮棉油生产基地和最大的淡水产品生产基地,是全国重要工业基地、能源原材料基地、现代装备制造及高新技术产业基地。湖北省辖 12 个地级市、1 个自治州、3 个县级市、1 个林区,总面积 18.59 万 km²,山地、丘陵和岗地、平原分别占总面积的 52.4%、26.0%、21.6%,主要涉及长江、汉江、清江三大流域。2019 年湖北省常住人口为 5 927 万人,城镇化率为 61%,国内生产总值 4.58 万亿元,农田灌溉面积 287.8 万 hm²。2019 年湖北省主要经济社会指标如表 1 所示。根据湖北省气候、地形地貌、水系、社会经济发展水平等特点,将全省划分为 6 个片区:鄂中南片区、鄂东南片区、鄂东北片区、鄂北片区、鄂西北片区和鄂西南片区,如图 1 所示。

1.2 数据来源

水资源量及供用水量数据来源于湖北省水资源调查评价、水资源公报;经济社会指标数据来源于湖

表 1 2019 年湖北省主要经济社会指标

Table 1 Main economic and social indexes of Hubei Province in 2019

行政区	总人口/万人	城镇人口/万人	GDP/亿元	工业增加值/亿元	耕地面积/万 hm ²	农田灌溉面积/万 hm ²
武汉市	1 121	902	16 223	4 657	29	21
黄石市	247	158	1 767	794	12	7
十堰市	340	192	2 013	757	24	7
宜昌市	414	256	4 461	1 763	35	16
襄阳市	568	350	4 813	2 077	70	35
鄂州市	106	70	1 140	481	6	4
荆门市	290	174	2 034	890	50	28
孝感市	492	287	2 301	896	44	29
荆州市	557	314	2 516	844	68	46
黄冈市	633	303	2 323	703	53	32
咸宁市	255	138	1 595	544	20	12
随州市	222	117	1 162	406	25	12
恩施州	339	153	1 159	234	45	10
仙桃市	114	68	869	363	12	10
天门市	125	68	651	278	17	13
潜江市	97	56	813	391	12	7
神农架林区	8	4	33	7	1	0
湖北省	5 927	3 611	45 873	16 085	524	288

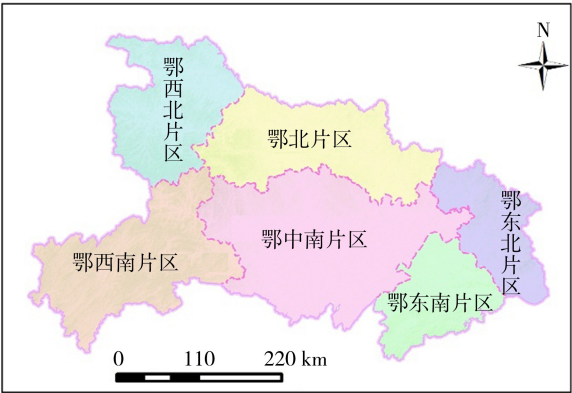


图1 湖北省片区划分

Fig. 1 Region division of Hubei Province

北省及各地市国民经济和社会发展统计公报、统计年鉴以及农村统计年鉴。

2 研究方法

2.1 评价方法

水资源空间均衡度是通过综合缺水率反映水资源空间均衡状态的指标。综合缺水率为综合缺水量与总用水量的比值,综合缺水量包括超采的地下水、被挤占的河道内生态环境用水等现状的不合理用水以及河道外的供需平衡差值^[23]。本文利用水资源空间均衡度表征水资源空间均衡状态,计算公式为

$$\beta = 1 - \alpha / \alpha_{\max} \tag{1}$$

式中: α 为综合缺水率; $\alpha_{\max}$ 为最大综合缺水率; β 为水资源空间均衡度,取值范围为 0~1,根据 β 值对水资源空间均衡状态进行划分, β 值为 0~<0.4、0.4~<0.7、0.7~<0.9、0.9~1 分别对应严重不均衡、不均衡、基本均衡、高质量均衡 4 个等级。

2.2 情景设置

为准确分析“荆楚安澜”现代水网建设对湖北省水资源空间均衡状态的影响,本文设置两种不同情景:①以 2019 年为现状情景,即“荆楚安澜”现代水网还未建设;②以 2035 年为水网优化布局情景,即“荆楚安澜”现代水网已经完成建设。

3 结果与分析

3.1 现状情景下水资源空间均衡评价

现状情景下湖北省综合缺水主要表现为供水不足、挤占河道生态环境用水和不合理开发用水,农业灌溉缺水最严重。根据现状情景下湖北省水资源供需平衡计算,需水量为 349.10 亿 m³,供水量为 320.01 亿 m³,缺水量为 29.09 亿 m³,综合缺水率为 8.3%。表 2 为现状情景下湖北省水资源空间均衡评价结果。由表 2 可见,现状情景下湖北省整体水资源空间均衡度为 0.69,处于不均衡状态。以 6 个

分区为分析单元进行水资源空间均衡评价,鄂中南片区、鄂东北片区、鄂北片区 3 个单元处于不均衡状态,鄂东南片区、鄂西北片区、鄂西南片区 3 个单元处于高质量均衡状态。鄂中南片区处于不均衡状态的主要原因是生活、工业供水挤占农业用水、水库泄放生态流量以及部分河流来水不足;鄂东北片区处于不均衡状态的主要原因是水资源集中在偏北山区,而人口、GDP、耕地集中在西南沿江经济走廊,水资源分布与生产力布局不相匹配;鄂北片区处于不均衡状态的主要原因是农业灌溉缺水严重。进一步以 17 个行政区为分析单元进行水资源空间均衡评价,荆门市、仙桃市 2 个单元处于严重不均衡状态,宜昌市、孝感市、荆州市、黄冈市、随州市 5 个单元处于不均衡状态,武汉市、黄石市、襄阳市、咸宁市、天门市、潜江市、神农架林区 7 个单元处于基本均衡状态,十堰市、鄂州市、恩施州 3 个单元处于高质量均衡状态。

表 2 现状情景下湖北省水资源空间均衡评价结果

Table 2 Evaluation results of water resources spatial equilibrium under current scenario in Hubei Province

行政区	需水量/亿 m ³	供水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	水资源空间均衡度
武汉市	45.34	43.15	2.19	0.81
黄石市	18.15	17.55	0.60	0.88
十堰市	9.75	9.56	0.19	0.92
宜昌市	17.85	16.04	1.81	0.62
襄阳市	40.73	38.88	1.85	0.81
鄂州市	16.76	16.60	0.16	0.96
荆门市	25.58	19.93	5.65	0.15
孝感市	32.60	28.56	4.04	0.54
荆州市	41.19	37.19	4.00	0.62
黄冈市	33.46	29.74	3.72	0.58
咸宁市	15.47	14.93	0.54	0.88
随州市	13.48	12.32	1.16	0.65
恩施州	6.19	6.06	0.13	0.92
仙桃市	12.19	10.27	1.92	0.38
天门市	11.91	11.09	0.82	0.73
潜江市	8.28	7.98	0.30	0.85
神农架林区	0.17	0.16	0.01	0.77
湖北省	349.10	320.01	29.09	0.69

3.2 水网优化布局情景下水资源空间均衡评价

3.2.1 总体思路

湖北省 70%的年降水量集中在 4—8 月且年际变化较大,水资源总体上南丰北枯。鄂西南武陵山区、鄂东南幕阜山区产水较丰,鄂北岗地、鄂西北山区是旱灾易发地区,受气候变化影响干旱重灾区呈现由传统的鄂北岗地向鄂中丘陵区 and 江汉平原部分区域延伸的态势。鄂中南片区、鄂北片区水资源占比远小于其人口、GDP、耕地的占比,水资源与经济社会发展不相匹配。鄂中南片区以 24%的水资源承载了全省 41%的人口、46%的 GDP 和 43%的耕

地。为解决水资源空间不均衡的问题,需将武陵山区长江水资源、清江富余水资源调至鄂中南地区,将秦巴山区汉江富余水资源调至鄂北地区,鄂东南片区、鄂东北片区、鄂西北片区和鄂西南片区以本地蓄水工程为主,辅引水工程以及水系连通工程等,构建“四隅向心、三江统配、河库联供、北送东流”的水资源配置格局,如图 2 所示。“四隅向心”指全省水资源总体调配方向是从秦巴、武陵、幕阜、大别山等处于湖北省四角区位的水源基地向江汉平原核心区进行补水;“三江统配”指以跨流域跨区域引调水工程为纽带,实现长江、汉江、清江三大水源之间的统一调配,实现空间均衡的水资源配置;“河库联供”指结合地形地貌及供水便利条件,采用从江河直接引提水和水库调蓄供水等方式进行联合供水,提高供水保障水平,实现优水优用;“北送东流”指湖北省作为南水北调核心水源区肩负着确保“一库清水北送、一江清水东流”的重大责任,充分彰显湖北水网在全国水资源配置格局中的重要地位。

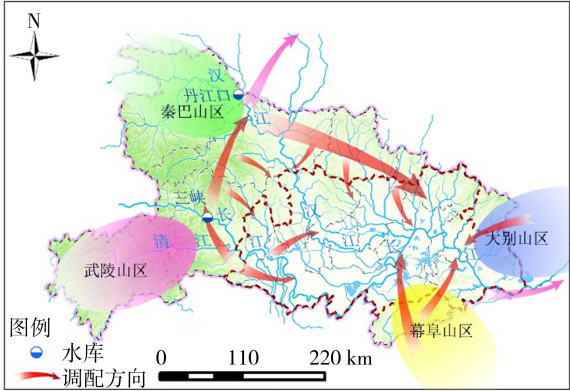


图 2 湖北省水资源配置格局

Fig. 2 Water resources allocation pattern in Hubei Province

3.2.2 水网优化布局

围绕长江经济带、中部崛起、汉江生态经济带等国家重大战略以及湖北省委、省政府提出的“一主引领、两翼驱动、全域协同”的区域发展战略布局,根据水资源承载能力和水资源刚性约束要求,坚持节水优先的首要方针,把握空间均衡的总体要求,满足优水优用的合理需求,以江汉平原为核心,以引江补汉输水线路沿线补水工程、引江济汉、鄂北水资源配置、清江引水等区域水资源配置工程为纲,以天然河湖、水系连通工程和供水渠道为目,以百库千湖等控制性调蓄工程为结,实现长江、汉江、清江水资源统筹配置,采用大江大河引水和山区水库蓄水等方式,构建河湖连通、稳定可靠、多源互补、高效调控的水资源配置网络体系,改善水资源空间均衡状态,提高湖北省供水保障水平。湖北省水资源调配工程优

化布局如图 3 所示。

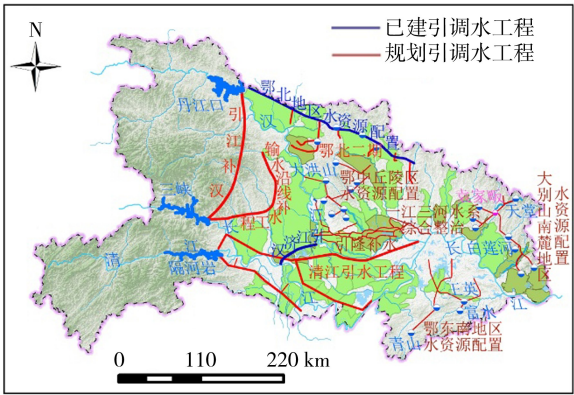


图 3 湖北省水资源调配工程优化布局

Fig. 3 Optimization layout of water resources allocation project in Hubei Province

3.2.3 水资源调配工程优化组网方案

a. 水资源调配工程建设。根据水资源空间均衡评价结果,以不同区域的水资源禀赋条件、供水缺口为基础,结合水资源配置总体布局及各分区特点,按照“确有需要、生态安全、可以持续”的原则,推进跨区域水资源配置工程建设,提升缺水区域水资源承载能力,促进水资源配置与经济社会发展和生态文明建设相适应,使水资源空间均衡状态达到高质量均衡。处于不均衡状态的鄂中南片区依托长江、汉江和清江等骨干河流,以三峡水库、隔河岩水库等调蓄枢纽为重要水源,完善江汉平原水资源配置体系,增强水资源调配能力,重点推进引江补汉输水沿线补水工程、鄂中丘陵区水资源配置工程、一江三河水系综合整治工程等,研究推进清江引水工程等。依托鄂东北片区现有水库群和沿江湖泊群,推进大别山南麓地区水资源配置工程,分别构建以保障城镇供水、农村安全饮水及灌溉用水的供水中通道,以生态引水为主的生态低通道布局。鄂北片区在鄂北水资源配置工程基础上,进一步完善配套连接工程建设,满足鄂北原受水区供水要求的前提下,通过进一步优化水量调度,推动鄂北片区水资源配置二期工程建设。

b. 供水水源工程建设。充分挖掘现有水源工程供水能力,最大能力发挥和提高工程的使用效率和效益,实现存量提质升级。在此基础上,进一步拓展稳定水源,推进水源工程建设。推进鄂中南片区荆州市老虎沟水库、荆门市太乙湖水库、琵琶山水库、仙女山水库、梭墩水库(扩建)等工程建设;加快鄂东北片区新建罗田县邮亭寺水库、红安县深沟水库、麻城市风箴山水库以及扩建英山县松山铺水库;鄂北片区供水水源工程主要为新建中小型水库及相关水库水源地保护等。

c. 城乡供水工程建设。全面加强城乡供水基础设施建设,强化城市供水多源保障,构建高品质、有韧性的供水保障体系。大力推进城乡供水一体化,因地制宜推进规模化供水,结合区域水资源条件合理确定城乡供水保障方案。①城市供水保障。鄂中南片区推进汉江干流碾盘山、新集枢纽工程建设,提升汉江流域梯级水库联合调度及供水能力,统筹跨区域调水、沿江提水和大中型水库供水,按照“优水优用”的原则,将水质较好、稳定性高的大型水库优先供给城镇生活和工业用水;鄂东北片区以白莲河水库为龙头水源,通过黄团滢一体化水资源配置,将骨干水库进行连通,充分利用本地水,适度增引长江水,提升城市供水多水源联调保障;鄂北片区重点保障城镇生活用水和高保证率要求工业用水,考虑未来汉江干流水质面临的风险,远期适时开展从丹江口水库引水保障襄阳城市供水的研究工作。②农村供水保障。鄂中南片区在有条件的地区加快推进城乡供水一体化建设,增强城乡供水公共服务均等化,实现“同源、同质、同网、同服务”;鄂东北片区加快农村供水设施升级改造和稳定水源建设,农村供水水源置换为蓄水工程,提升革命老区供水保障水平;鄂北片区以本地蓄水工程为主要水源,因地制宜完善分区农村集中供水保障方案。

d. 灌区现代化建设与改造。以保障粮食安全为目标,加强灌区水源工程建设,推进大中型灌区续建配套与现代化改造,中小型灌区结合自身区位条件情况,有条件进一步整合为大中型灌区,提升灌溉保障能力。鄂中南片区推进泽口、兴隆、谢湾等大中型灌区续建配套与现代化改造工程,打造现代化农业示范区。鄂东北片区有序推进蕲水、浮桥河、武穴北等大型灌区新建扩建,为巩固拓展脱贫攻坚成果和全面推进乡村振兴提供水利支撑。鄂北片区新建随南大型灌区,推进引丹、大岗坡、石台寺等大型灌区续建配套与现代化改造,推动一批中型灌区续建配套与节水改造,进一步推动高标准农田建设及高效节水灌溉试点建设,适度优化农业种植结构。

e. 应急保障与战略储备。根据湖北省水资源空间均衡评价结果,系统分析各县城周边水源情况,补齐城市应急备用水源工程短板,确保县级以上全部具备应急保障供水能力,当主水源出现供水水源水量不足或水污染事故影响供水时启动备用水源工程。清江流域开发利用较低、水量丰沛、水质较好,选取清江流域作为重要战略水源。利用清江高坝洲、隔河岩、水布垭等大型水库及引江补汉工程,协同新建清江西水东引工程及引江补汉工程等工程,联合调度解决长江及汉江中下游区域的战略储

备水源问题。

3.2.4 评价结果

根据水网优化布局及水资源调配工程优化组网方案,按照优先满足城乡居民生活用水,保障基本生态用水,统筹工农业用水等需要,充分结合并发挥江河、大中小型水库及塘堰等的供水能力,坚持优水优用原则进行水资源配置。规划到 2035 年,湖北省需水量为 369.87 亿 m³,供水量为 365.69 亿 m³,缺水量为 4.18 亿 m³,综合缺水率为 1.1%。表 3 为水网优化布局情景下湖北省水资源空间均衡评价结果。由表 3 可见,水网优化布局情景下湖北省整体水资源空间均衡度为 0.96,处于高质量均衡状态。以 6 个片区为分析单元进行水资源空间均衡评价,鄂中南片区、鄂东南片区、鄂东北片区、鄂北片区、鄂西北片区和鄂西南片区 6 个单元均处于高质量均衡状态。以 17 个行政区为分析单元进行水资源空间均衡评价,随州市 1 个单元处于基本均衡状态,武汉市、黄石市、十堰市、宜昌市、襄阳市、鄂州市、荆门市、孝感市、荆州市、黄冈市、咸宁市、恩施州、仙桃市、天门市、潜江市、神农架林区 16 个单元处于高质量均衡状态。

表 3 水网优化布局情景下湖北省水资源空间均衡评价结果

Table 3 Evaluation results of water resources spatial equilibrium under water network optimization layout scenario in Hubei Province				
行政区	需水量/亿 m ³	供水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	水资源空间均衡度
武汉市	51.06	50.74	0.32	0.96
黄石市	18.74	18.50	0.24	0.96
十堰市	13.08	12.96	0.12	0.96
宜昌市	24.80	24.41	0.39	0.92
襄阳市	40.64	40.20	0.44	0.96
鄂州市	11.36	11.31	0.05	1.00
荆门市	28.39	28.01	0.38	0.96
孝感市	34.49	34.12	0.37	0.96
荆州市	44.45	44.03	0.42	0.96
黄冈市	32.84	32.41	0.43	0.96
咸宁市	17.29	17.06	0.23	0.96
随州市	13.06	12.68	0.38	0.88
恩施州	7.14	7.09	0.05	0.96
仙桃市	11.85	11.69	0.16	0.96
天门市	11.44	11.33	0.11	0.96
潜江市	8.95	8.86	0.09	0.96
神农架林区	0.29	0.29	0.00	1.00
湖北省	369.87	365.69	4.18	0.96

4 结 语

为全面提升湖北省水资源空间均衡水平和水安全保障能力,对湖北省现状情景及水网优化布局情景下水资源空间均衡状态进行了评价。评价结果表

明,现状情景下湖北全省水资源空间均衡处于不均
衡状态,水网优化布局情景下湖北全省水资源空间
均衡均处于高质量均衡状态;构建“荆楚安澜”现代
水网能够有效改善湖北省水资源空间均衡状态,可为
湖北省经济社会高质量发展提供坚实水安全保障。
研究提出了全省水资源优化调配应对方案、现代水网
优化布局与组网方案,能够为科学构建“荆楚安澜”现
代水网提供技术指导。本文是基于“荆楚安澜”现代
水网规划的水资源配置工程全面完工情境下进行分
析计算的,未来可根据水网建设情况对湖北省水资源
空间均衡状态进行动态分析和探讨。

参考文献:

[1] 刘为锋,郭旭宁,李昕阳,等. 南水北调东线工程调水潜力分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 42-48. (LIU Weifeng, GUO Xuning, LI Xinyang, et al. Analysis of water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North Water diversion project [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1): 42-48. (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] 何凡,路培艺,尹婧,等. 中国水资源空间均衡评价与空间关联性分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 148-155. (HE Fan, LU Peiyi, YIN Jing, et al. Spatial equilibrium evaluation and spatial correlation analysis of water resources in China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 148-155. (in Chinese))

[4] ZHANG Yu, ZUO Qiting, WU Qingsong, et al. An integrated diagnostic framework for water resource spatial equilibrium considering water-economy-ecology nexus [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137592.

[5] LU Yu, YANG Xiaohua, BIAN Dehui, et al. A novel approach for quantifying water resource spatial equilibrium based on the regional evaluation, spatiotemporal heterogeneity and geodetector analysis integrated model [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 424: 138791.

[6] CHEN Hui, YANG Xiaohua, BIAN Dehui, et al. A novel composite cloud model-based three-stage evaluation for the spatial equilibrium of water resources in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 456: 142356.

[7] LUO Zhiwei, JI Ling, XIE Yulei. Multi-dimensional equilibrium optimal allocation of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region through spatial association

network analysis [J]. Journal of Hydrology, 2024, 642: 131826.

[8] 郦建强,王平,郭旭宁,等. 水资源空间均衡要义及基本特征研究 [J]. 水利规划与设计, 2019 (10): 1-5. (LI Jianqiang, WANG Ping, GUO Xuning, et al. Research on the essentials of spatial equilibrium of water resources and its basic feature [J]. Water Resources Planning and Design, 2019 (10): 1-5. (in Chinese))

[9] 金菊良,郦建强,吴成国,等. 水资源空间均衡研究进展 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (6): 47-60. (JIN Juliang, LI Jianqiang, WU Chengguo, et al. Research progress on spatial equilibrium of water resources [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40 (6): 47-60. (in Chinese))

[10] 郦建强,王平,何君,等. 水资源空间均衡理论方法与对策措施研究 [J]. 中国水利, 2019 (23): 23-25. (LI Jianqiang, WANG Ping, HE Jun, et al. Study on theory methodology and countermeasures about water resources spatial equilibrium [J]. China Water Resources, 2019 (23): 23-25. (in Chinese))

[11] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 130-136. (in Chinese))

[12] 吴成国,王晓宇,金菊良,等. 基于有序联系度熵的水资源空间均衡综合评价方法 [J]. 水利学报, 2022, 53 (11): 1304-1316. (WU Chengguo, WANG Xiaoyu, JIN Juliang, et al. Ordered correlation degree entropy based approach for comprehensive evaluation analysis of water resource spatial equilibrium system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (11): 1304-1316. (in Chinese))

[13] 黄锋华,黄本胜,洪昌红,等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 65-71. (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 65-71. (in Chinese))

[14] 张玉祥,穆振侠,田晓杰. 新疆水资源空间均衡评价 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (8): 56-60. (ZHANG Yuxiang, MU Zhenxia, TIAN Xiaojie. Spatially balanced evaluation of water resources in Xinjiang [J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (8): 56-60. (in Chinese))

(下转第 104 页)

(4): 73-81. (LU Zhonggui, KANG Zhe, LI Wei, et al. Water scarcity assessment in the Yellow River Basin from comprehensive perspective of water quantity-water quality-ecology water demand [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 73-81. (in Chinese))

[20] 金文婷,王义民,王学斌,等. 梯级水库群多目标协同均衡调控研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34 (5): 1-11. (JIN Wenting, WANG Yimin, WANG Xuebin, et al. Multi-objective synergistic and balanced regulation of cascade reservoirs [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (5): 1-11. (in Chinese))

[21] 哈燕萍,白涛,黄强,等. 梯级水库群水沙联合调度的多目标转化研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (7): 23-33. (HA Yanping, BAI Tao, HUANG Qiang, et al. Transformation of multi-objectives in water and sediment joint regulation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (7): 23-33. (in Chinese))

[22] 金文婷. 黄河梯级水库群“水-沙-电-生态”多维协同控制与均衡调控研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[23] 金文婷,王义民,畅建霞,等. 黄河中下游水资源多目标利益对古贤水库运行的响应[J]. 水利水电科技进步, 2024, 44 (1): 52-59. (JIN Wenting, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Response of water resources multi-objective interests in middle-lower Yellow River to Guxian Reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 52-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 11 - 28 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 32 页)

[15] 李家乐,林鹏飞,李彦彬,等. 基于水资源配置的空间均衡度评价方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22 (2): 215-227. (LI Jiale, LIN Pengfei, LI Yanbin, et al. Evaluation method for spatial balance based on water resource allocation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22 (2): 215-227. (in Chinese))

[16] 叶继业,尚明宇,杨欢,等. 基于具有鲁棒特性模型的河南省水资源空间均衡评价[J]. 中国农村水利水电, 2024 (11): 45-53. (YE Jiye, SHANG Mingyu, YANG Huan, et al. Spatial equilibrium evaluation of water resources in Henan Province based on robust characteristic model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024 (11): 45-53. (in Chinese))

[17] 吴凤平,王晓宇,夏天,等. 黄河流域水资源空间均衡诊断及优化[J]. 软科学, 2024, 38 (4): 118-128. (WU Fengping, WANG Xiaoyu, XIA Tian, et al. Diagnosis and optimization of water resources spatial equilibrium in the Yellow River Basin [J]. Soft Science, 2024, 38 (4): 118-128. (in Chinese))

[18] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型构建[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 71-77. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Construction of “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model based on spatial equilibrium of water resources [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 71-77. (in Chinese))

[19] 魏豪杉,王红瑞,郑鹏鑫,等. 基于水资源空间均衡的“四水四定”调控模型的应用[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 78-85. (WEI Haoshan, WANG Hongrui, JIA Pengxin, et al. Application of water resources spatial equilibrium-based “defining city, land, population, and industry based on water” regulation and control model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 78-85. (in Chinese))

[20] 陈述,汪钟铃,颜克胜,等. 湖北省水资源压力与经济发展脱钩的时空演化[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 134-141. (CHEN Shu, WANG Zhongling, YAN Kesheng, et al. Spatio temporal evolution of decoupling between water resources stress and economic development in Hubei Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 134-141. (in Chinese))

[21] 田培,赵泽群,穆雅晴,等. 湖北省水资源空间均衡性分析及对策研究[J]. 人民珠江, 2025, 46 (3): 73-81. (TIAN Pei, ZHAO Zequn, MU Yaqing, et al. Spatial equilibrium analysis of water resources in Hubei Province and countermeasures [J]. Pearl River, 2025, 46 (3): 73-81. (in Chinese))

[22] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 1-7. (GUO Xuning, LI Yunling, CHANG Tong, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu Anlan” modern water network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 1-7. (in Chinese))

[23] 郭旭宁,郦建强,李云玲,等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 62-66. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 01 - 06 编辑: 王芳)