

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2026.02.013

济南市大汶河流域水资源空间均衡评价与调控研究

李一阳¹, 刘璇^{1,2}, 杨荣雪^{1,2}, 王红瑞¹, 张力¹, 李晓军³

(1 北京师范大学水科学研究院; 2. 中国南水北调集团有限公司; 3 济南市水利工程服务中心)

摘要:针对济南市大汶河流域水资源配置效率低、水资源利用与产业结构不匹配等问题,以空间均衡为准则,从水资源与产业匹配、时空分布均衡性两个维度,构建了投入产出模型与系统动力学模型相耦合的分析框架,定量识别部门间虚拟水流动格局,综合评价了多目标下的空间均衡状况,通过多情景仿真揭示了水资源空间均衡发展路径。结果表明:2012—2017 年济南市大汶河流域各产业的直接用水系数、完全用水系数均呈下降趋势,农林牧渔业、采矿业、食品烟草业等产业直接用水和间接用水效率存在提升空间,流域产业结构由以农业和传统工业为主向第三产业主导转变;除 2014 年、2015 年水资源均衡等级为一般失衡外,流域整体处于相对均衡等级;水源开发方案可显著降低水资源负载系数和提升水土资源匹配系数,绿色节水方案则能有效改善用水效益;大汶河流域应优先压减高耗水低附加值产业,提升服务业与高技术产业比重,协同实现流域尺度生态保护与绿色发展。

关键词:产业匹配;空间均衡;投入产出;虚拟水;系统动力学;大汶河流域

Research on spatial balance assessment and regulation of water resources in the Dawen River Basin of Jinan City// Li Yiyang¹, Liu Xuan^{1,2}, Yang Rongxue^{1,2}, WANG Hongrui¹, Zhang Li¹, Li Xiaojun³ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University; 2. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited; 3. Jinan Water Conservancy Engineering Service Center)

Abstract: In response to the problems of low water resources allocation efficiency and mismatching between water resources utilization and industrial structure in the Dawen River Basin, based on the principle of spatial balance, an analytical framework coupling the input-output model with the system dynamics model was constructed from two dimensions, i. e., the matching between water resources and industrial sectors and the balance of spatiotemporal distribution. The intersectoral virtual water flow patterns were quantitatively identified, and the spatial balance level under multiple objectives was comprehensively evaluated. Through multi-scenario simulation, the water resources spatial balanced development path was revealed. The research shows that from 2012 to 2017, the direct water consumption coefficient and complete water consumption coefficient of all industries in the Dawen River Basin of Jinan City exhibited downward trends. There is room for improvement in the direct and indirect water use efficiencies of industries, including agriculture, forestry, animal husbandry and fishery, mining, and food and tobacco industries. The industrial structure of the basin has shifted from being dominated by agriculture and traditional industries to being led by the tertiary industry. Except for 2014 and 2015 when the water resources balance level was at a generally unbalanced state, the basin as a whole was in a relatively balanced state. The development scheme for new water sources can significantly reduce the water load coefficient and improve the water-soil matching coefficient, and the water-saving level improvement scheme can effectively improve the water use efficiency. The Dawen River Basin should prioritize the reduction of high-water-consuming and low-value-added industries, increase the proportion of services and high-tech industries, jointly achieving ecological protection and green development at the basin scale.

Key words: industrial matching; spatial equilibrium; input-output; virtual water; system dynamics; the Dawen River Basin

空间均衡是经济生产要素在自由流动前提条件下,由市场自发调节实现配置效率最大化,从而使要素从低效率地区流向高效率地区,最终达到经济发展的绝对均衡。空间均衡作为分析经济发展空间结

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3205600);国家自然科学基金项目(52279005);济南市财政水务科技创新专项资金项目(JNSWKJ202001)

作者简介:李一阳(1996—),男,博士研究生,主要从事水资源系统分析研究。E-mail:202231470016@mail.bnu.edu.cn

通信作者:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析及环境规划与评价研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

构及其影响因素的重要工具,已广泛应用于人口分布、土地利用、环境污染等领域的资源优化配置研究^[1]。基于此,国内外学者也逐步将空间均衡理论引入水资源领域,围绕水资源空间均衡分布评价^[2-3]、理论框架构建^[4]、度量方法完善^[5]和调控模型开发^[6-7]等方面开展了深入研究。金菊良等^[8]构建了基于基尼系数与联系系数相结合的水资源空间均衡评价模型,识别出安徽省水资源空间均衡状况从南向北逐渐变差,合肥、淮北、亳州、宿州等地级市为典型的水资源空间均衡脆弱性区域;魏豪杉等^[9]基于空间均衡理论,构建了包含“四水四定”理念的动态调控模型体系,并在山东省临沂市 12 区(县)开展应用研究;杨亚锋等^[10]从水资源与建设用地、耕地、人口和第二产业增加值之间的 4 组匹配关系出发,揭示出京津冀地区水资源空间均衡基本处在临界均衡状态;王红瑞等^[11]从历史演进、现实需求和系统耦合的多维视角探讨了水资源空间均衡的内涵与基本特征,在此基础上构建了水资源空间均衡调控机制框架,为水资源空间均衡调控方法和技术的开发提供理论支撑。上述研究丰富并完善了水资源空间均衡理论与方法体系,为提升区域水资源管理水平、缓解资源配置矛盾提供了坚实的理论与实践基础。然而,多维度水资源空间均衡的研究还较为薄弱,在流域尺度上分析产业部门间虚拟水在产业间流通格局的研究仍相对匮乏;同时,水资源空间均衡分析往往局限于静态均衡假设^[12],静态均衡评价与动态演化调控之间缺乏有机衔接,难以支撑情景驱动的策略优选。针对以上问题,需要定量识别部门间虚拟水流动格局,综合评价多目标下的空间均衡状况,并通过多情景仿真揭示水资源空间均衡演化路径。

大汶河作为黄河下游重要支流,承载着济南市都市圈行洪安全、工农业供水和生态涵养等复合功能^[13],但流域内水资源配置效率低下、水资源利用与产业结构不匹配等问题制约了区域经济发展^[14]。流域内经济发展与水资源利用不平衡,水资源配置与经济发展、生态环境的需求不匹配^[15],难以有效支撑流域城镇化建设^[16]。本文以空间均衡为准则,从水资源与产业匹配、时空分布的均衡性两个维度开展济南市大汶河流域水资源空间均衡评价与调控研究。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大汶河流域发源于济南市莱芜地区东南部旋崮山东麓,是莱芜地区最大的流域,全长 208.2 km,流域面积 8 536.5 km²(图 1)。该流域在济南市境内主要为原莱芜市辖区,2019 年撤市设区后,行政区划调

整为莱芜区与钢城区。大汶河流域年均水资源总量为 4.48 亿 m³,其中,地表水资源量为 3.51 亿 m³,年均地下水资源量为 2.37 亿 m³。从多年平均值来看,农业用水量、工业用水量、生活用水量和生态用水量分别占总用水量的 44.8%、35.7%、14.9%和 1.6%。目前,流域存在水资源配置效率低^[15]、水资源利用与产业结构不匹配^[17]等问题。

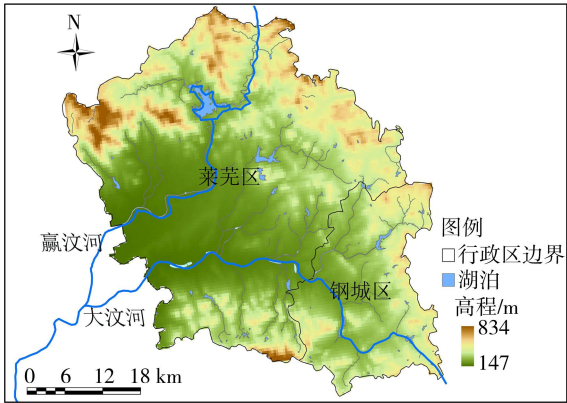


图 1 大汶河流域概况

Fig. 1 Overview of the Dawen River Basin

1.2 数据来源

水资源、水环境数据来自《莱芜市水资源公报》(2010—2020 年)、《济南市水资源公报》(2010—2020 年)、《济南市莱芜区、钢城区水资源调查评价》(2019 年)、《济南市水资源综合利用中长期规划》(2021 年)、《济南市水土保持公报》(2020 年)等;经济社会数据包括人口、GDP 总量、三产结构及三产增加值、万元 GDP 增加值及其用水量。投入产出数据来源于中国碳核算数据库发布的 2012 年和 2017 年《中国城市尺度多区域投入产出表》《莱芜市统计年鉴》(2010—2017 年)和《济南市统计年鉴》(2010—2020 年)。

2 研究方法

以空间均衡为准则,从水资源与产业匹配、时空分布均衡性两个维度,构建投入产出模型与系统动力学(system dynamics, SD)模型相耦合的分析框架,旨在定量识别部门间虚拟水流动格局,综合评价多目标下水资源空间均衡状况与分异机制,并通过多情景仿真揭示水资源空间均衡演化路径,分析框架如图 2 所示。

2.1 投入产出模型

投入产出模型可以反映一定时期内各部门间相互联系和平衡的关系,目前已广泛应用于金融、电力、环境保护等领域的研究^[18]。通过投入产出模型可以量化产业直接与间接用水强度^[19-20],从而了解水资源与产业结构匹配关系,因而模型在水足迹测

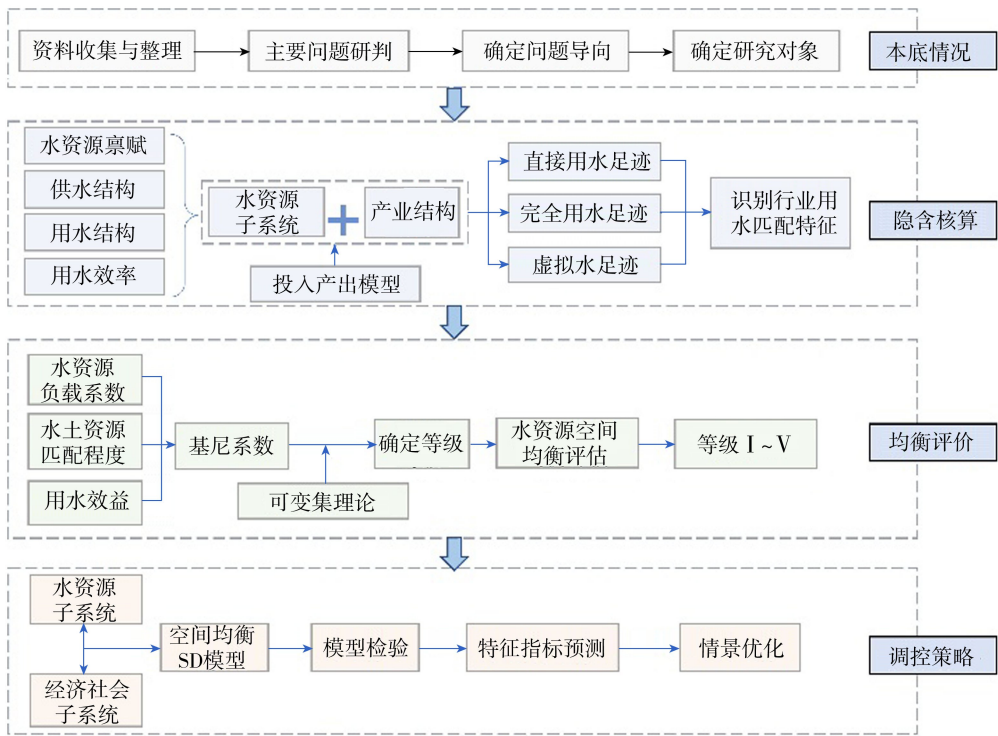


图2 分析框架

Fig. 2 Analysis framework

算过程中应用广泛^[21]。本文从2012年和2017年中国城市尺度多区域投入产出表中摘取了莱芜市数据,并通过《莱芜市统计年鉴》(2010—2017年)和《济南市统计年鉴》(2010—2020年)进行校正,参考已有研究^[22-26],构建了大汶河流域水足迹投入产出模型。

在投入产出模型中,每个地区、部门的总投入与其总产出相平衡:

$$X_i = \sum_{j=1}^c x_{ij} + y_i + e_i \quad (1)$$

式中: X_i 为产业 i 的总产出; x_{ij} 为产业 i 提供给产业 j 的中间投入; y_i 为产业 i 在国内的需求量; e_i 为产业 i 的出口量; c 为产业总数。

引入直接消耗系数 a_{ij} 表示产业 j 生产产业 i 单位产品需要消耗的经济价值:

$$a_{ij} = q_{ij}/W_j \quad (2)$$

式中: q_{ij} 为产业 j 生产产业 i 产品需要消耗的水资源量; W_j 为产业 j 的经济总产出。

引入直接用水系数 r_i 表示产业 i 单位产出消耗的水资源量:

$$r_i = q_i/W_i \quad (3)$$

式中: q_i 为产业 i 在生产过程中直接消耗的水资源量; W_i 为产业 i 的经济总支出。

利用直接用水系数矩阵 $A=(a_{ij})$ 和直接消耗系数矩阵 $R=(r_i)$,可计算完全用水系数矩阵:

$$Q = RL = R(I - A)^{-1} \quad (4)$$

式中: Q 为完全用水系数矩阵; L 为列昂捷夫逆矩阵; I 为单位矩阵。

虚拟水资源在各产业间的流通量计算公式为:

$$V = Q\hat{Y} = R(I - A)^{-1}\hat{Y} \quad (5)$$

式中: V 为虚拟水资源在各产业间的流通量矩阵; $\hat{Y}$ 为最终需求对角矩阵。

2.2 水资源空间均衡评价指标与方法

为系统评价大汶河流域水资源空间均衡状况,从用水公平、用水压力、用水效率等方面选取水资源负载系数、水土资源匹配系数、用水效益作为评价指标。水资源负载系数常被用于水资源时空分布及开发利用均衡评价分析^[27],其值越大说明地区水资源开发利用程度越高。水土资源匹配系数指区域内平均每公顷耕地占有的水资源量,其值越大说明该区域的水资源越丰富,越有利于农业生产活动^[28]。用水效益则反映了单方水的经济产出能力,其值越高说明水资源利用效率越好^[29-31]。在构建上述评价指标体系的基础上,引入可变集理论对大汶河流域水资源空间均衡状况进行综合量化评估。可变集理论能够有效处理评价对象在不同等级边界处的模糊性与动态变化特征^[32-33]。

将水资源空间均衡状况划分为5个等级, I ~ V级的标准值区间依次设定为 0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1.0。设大汶河流域

内第 n 个评价单元中指标 m 的观测值为 z_{mn} , 为描述该观测值归属于某一特定均衡等级 h ($h=1, 2, \dots, 5$) 的倾向程度, 通过构建相对差异函数, 计算其对应的相对隶属度 μ_{mnh} 。

结合由层次分析法确定的指标权重, 对所有评价指标进行加权求和, 得到第 n 个评价单元在等级 h 上的综合支持度 H_{nh} :

$$H_{nh} = \sum_{m=1}^k w_{mn} \mu_{mnh} \tag{6}$$

式中: w_{mn} 为第 n 个评价单元中评价指标 m 的权重; k 为指标总数。

2.3 水资源空间均衡 SD 模型

在对大汶河流域水资源空间均衡状况进行综合评价的基础上, 根据评价指标的选取原则和流域绿色发展目标, 参考前人研究^[34-37], 利用 Vensim 软件构建包含社会经济子系统和水资源子系统的空间均衡 SD 模型。模型的主要调控目标是实现流域内人口规模、产业结构、增长速度与水资源承载力相适应。水资源空间均衡 SD 模型流图如图 3 所示。

采用水资源空间均衡 SD 模型预测了不同情景下水资源空间均衡变化态势。模型空间边界为济南市莱芜区及钢城区, 模拟时间为 2011—2035 年, 时间步长为 1 a, 分别将 2011—2020 年和 2021—2035 年作为模型验证期和预测期, 将 2020 年作为现状年。采用历史数据检验模型精度, 对比验证表明, 大汶河流域水资源空间均衡 SD 模型模拟值与历史实际值的误差在 10% 以内, 模型模拟结果与实际相吻合, 模型可用于该流域水资源空间均衡相关研究。

3 结果与分析

3.1 水资源与产业结构匹配特征

3.1.1 产业水足迹

利用投入产出模型分别计算了济南市大汶河流域各产业直接用水系数、完全用水系数、间接用水系数, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 2012—2017 年大汶河流域各产业用水系数整体呈现明显下降趋势。13 个主要产业中有 10 个产业完全用水系数下降, 仅矿物制造业、水电气生产制造业、其他服务业 3 个产业上升; 而所有产业直接用水系数均有所下降。总体而言, 2017 年单位产出用水量比 2012 年大幅下降, 水资源集约利用水平大幅提高。从各产业看, 传统高耗水产业和服务业用水效率均有提升。其中, 农林牧渔业作为用水大户, 其完全用水系数由 2012 年的 264.15 降至 2017 年的 96.57, 降幅为 63.5%; 建筑业从 49.76 降至 25.66, 降幅近 50%。整体趋势表明, 5 年间区域各产业耗水强度显著降低, 水资源利用效率稳步提升, 减轻了流域生态环境压力。

3.1.2 产业虚拟水流通特征

利用式(5)计算大汶河流域产业间虚拟水流量, 结果见表 2 和图 4。研究发现, 流域内虚拟水流入总量和流出总量均由 2012 年的 1.39 亿 m^3 减少至 2017 年的 1.18 亿 m^3 , 总体呈下降趋势。表明流域整体产业间水足迹关联程度有所减弱, 区域水资源利用效率或产业结构发生了变化。

从产业层面看, 2012 年农林牧渔业是虚拟水流出量最大的产业, 流出量达 5387.11 万 m^3 , 2017 年

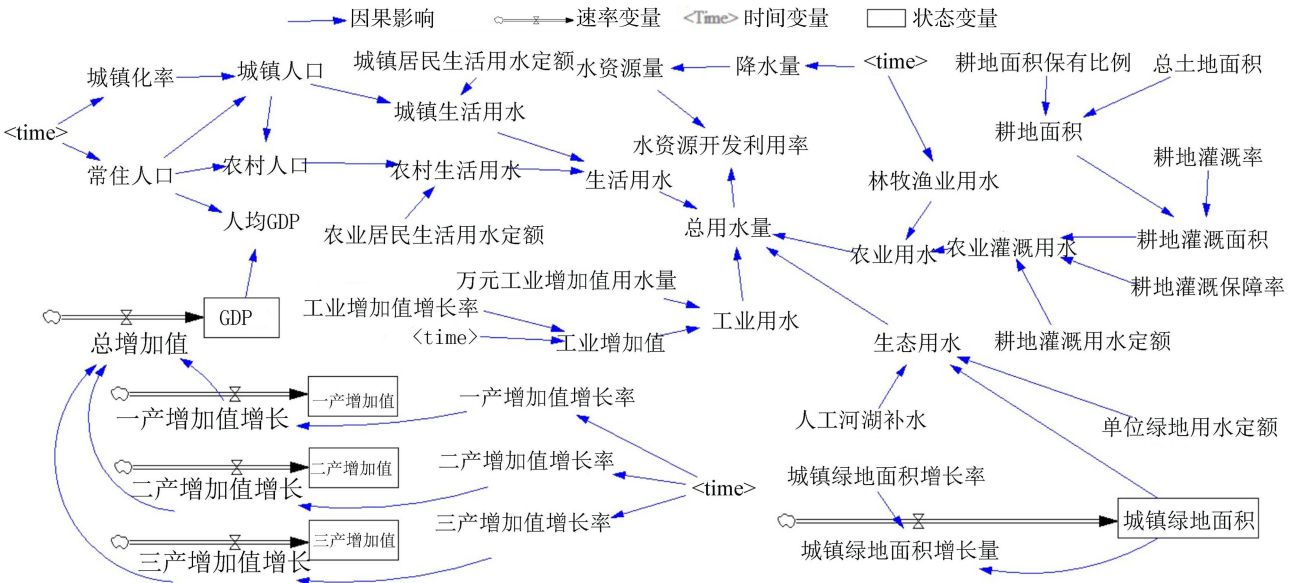


图 3 水资源空间均衡 SD 模型流图

Fig. 3 SD model flow diagram of water resources spatial equilibrium

表 1 2012—2017 年各产业用水系数

Table 1 Water use coefficients for various industries from 2012 to 2017

产业	直接用水系数			完全用水系数			间接用水系数		
	2012 年	2017 年	变化量	2012 年	2017 年	变化量	2012 年	2017 年	变化量
农林牧渔业	202.16	83.12	-119.04	264.15	96.57	-167.57	61.99	13.45	-48.53
采矿业	11.03	9.98	-1.05	21.47	14.47	-7.00	10.44	4.49	-5.95
食品烟草业	1.46	1.22	-0.23	99.23	53.22	-46.01	97.77	52.00	-45.77
纺织及木材制造业	2.19	1.96	-0.23	42.82	17.90	-24.92	40.63	15.94	-24.69
石油和化学制品制造业	3.11	2.43	-0.69	13.89	10.84	-3.05	10.78	8.41	-2.37
矿物制造业	6.26	3.83	-2.43	495.42	588.54	93.12	489.16	584.71	95.55
机械和电子设备制造业	0.62	0.47	-0.14	52.73	47.32	-5.41	52.12	46.85	-5.27
其他制造业	7.43	3.94	-3.49	7.59	4.06	-3.53	0.16	0.12	-0.04
水电气生产制造业	30.42	29.49	-0.93	55.88	65.29	9.41	25.46	35.80	10.33
建筑业	4.60	3.97	-0.63	49.76	25.66	-24.10	45.16	21.68	-23.47
批发零售住宿餐饮业	2.31	1.09	-1.22	13.84	5.37	-8.47	11.53	4.28	-7.25
交通运输、仓储和邮政业	1.31	0.47	-0.84	14.55	4.35	-10.20	13.24	3.88	-9.36
其他服务业	2.40	0.50	-1.90	16.63	22.72	6.10	14.23	22.22	7.99

表 2 2012—2017 年各产业虚拟水流入与流出量

Table 2 Virtual water inflow and outflow of various industries from 2012 to 2017

产业	虚拟水流入量/万 m ³			虚拟水流出量/万 m ³		
	2012 年	2017 年	变化量	2012 年	2017 年	变化量
农林牧渔业	71.49	45.49	-26.00	5387.11	3892.09	-1495.02
采矿业	4.38	8.77	4.39	1985.04	1036.78	-948.26
食品烟草业	3184.59	954.61	-2229.98	31.15	76.96	45.81
纺织及木材制造业	140.76	144.91	4.15	81.45	65.06	-16.39
石油和化学制品制造业	33.47	38.16	4.69	288.08	192.26	-95.82
矿物制造业	5180.19	6269.97	1089.78	2203.08	1475.8	-727.28
机械和电子设备制造业	0.13	0.39	0.26	151.75	78.58	-73.17
其他制造业	27.41	83.72	56.31	16.68	10.2	-6.48
水电气生产制造业	2436.77	1355.33	-1081.44	3387.76	4803.23	1415.47
建筑业	1190.94	626.62	-564.32	34.31	0.88	-33.43
批发零售住宿餐饮业	307.05	28.11	-278.94	128.76	129.44	0.68
交通运输、仓储和邮政	385.75	66.76	-318.99	136.55	35.92	-100.63
其他服务业	1024.12	2203.85	1179.73	155.35	29.52	-125.83

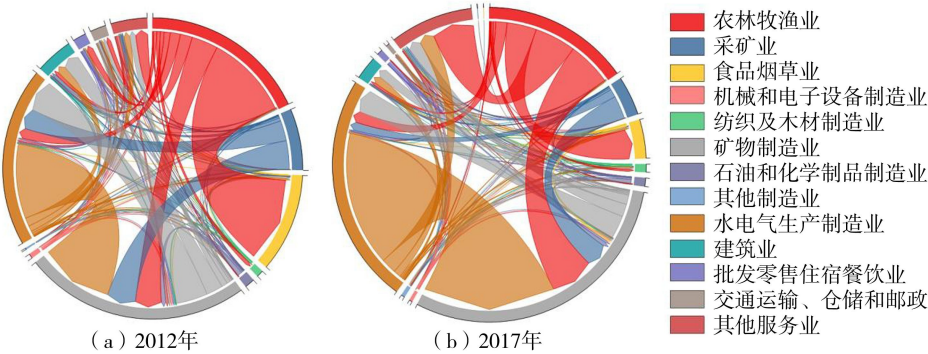


图 4 产业间虚拟水流通图

Fig. 4 Inter-industry virtual water flow chart

流出量下降约 28%。2017 年水电气生产制造业虚拟水流出量较 2012 年增长了约 42%，为 4803.23 万 m³，这一转变反映出，随着产业结构调整，水电气等公用事业部门替代农林牧渔业，成为产业链中支柱产业，并在流域经济社会中承担了更重要的基础性角色。此外，2017 年其他服务业虚拟水流入量较 2012 年增长近 1 倍，同时其流出量显著减少，说明该产业由中间供给向终端消费角色转变。

大部分工业部门 2012—2017 年虚拟水流出量均有所下降，其中机械和电子设备制造业降幅最大，反映出产业结构调整下该产业对外供应能力的收缩。总体上，2012—2017 年济南市大汶河流域产业间虚拟水流通格局呈现由传统农业主导逐步向水电气生产制造业主导转变；服务业对流域内其他产业需求显著上升，流域产业结构由以农业和传统工业为主导向第三产业主导型经济转型。

3.2 水资源空间均衡评价与调控

3.2.1 水资源空间均衡变化趋势

参考前人研究^[9-10,38],选取水资源负载系数、水土资源匹配系数和用水效益作为评价指标。大汶河流域 2011—2020 年各指标计算结果如图 5 所示。

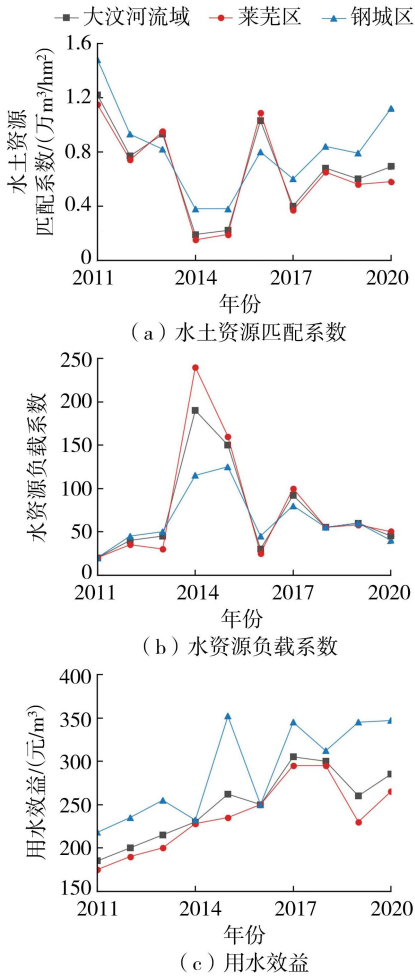


图 5 2011—2020 年水资源空间均衡指标变化
Fig.5 Variation of water resources spatial balance indicators from 2011 to 2020

2011—2020 年大汶河流域水资源负载系数整体较高,表明区域水资源开发利用强度大,存在较大的用水压力,亟须依赖南水北调、引黄等外部调水工程缓解供需矛盾。其间,水资源负载系数整体呈增长趋势,尤其在 2014 年出现显著跃升,主要因当年流域水资源总量骤减,造成水资源承载压力骤增。区域分布上,莱芜区与钢城区水资源负载系数整体趋势较为相似,两区均在 2013—2014 年出现明显激增趋势,其中钢城区水资源负载水平优于莱芜区。

水土资源匹配系数整体呈下降趋势,2014—2015 年水土资源匹配系数出现突降,其变化趋势与水资源负载系数相反。造成该现象的主因是 2014 年和 2015 年区域降水偏少导致水资源总量骤减。

2011—2020 年用水效益整体呈稳步增长态势,

尤其在 2011—2017 年增长速度较快。其提升得益于节水技术推广、科技进步及公众节水意识增强,但 2017 年后增长趋于平缓。

3.2.2 水资源空间均衡评价

采用层次分析法确定水资源负载系数、水土资源匹配系数及用水效益的指标权重,分别为 0.18、0.69、0.13,并采用可变集理论评价大汶河流域水资源空间均衡状况,结果如表 3 所示。2011—2020 年济南市大汶河流域对于水资源空间均衡等级为Ⅰ级和Ⅱ级的支持度均为零,反映出流域内水资源均衡状况无法达到Ⅰ和Ⅱ级的要求。流域水资源空间均衡等级整体上为相对均衡(Ⅲ级),2014 年、2015 年为一般失衡(Ⅳ级)等级,引起失衡的主要原因是这两年流域内水资源量处于多年来的最小值。

表 3 水资源空间均衡等级

Table 3 Water resources spatial equilibrium ranking						
年份	等级支持度					判定等级
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	
2011	0	0	0.860	0.511	0.115	III
2012	0	0	0.857	0.514	0.117	III
2013	0	0	0.827	0.534	0.158	III
2014	0	0	0.431	0.917	0.185	IV
2015	0	0	0.032	0.972	0.302	IV
2016	0	0	0.738	0.685	0.174	III
2017	0	0	0.707	0.633	0.276	III
2018	0	0	0.788	0.477	0.244	III
2019	0	0	0.778	0.596	0.196	III
2020	0	0	0.609	0.809	0.201	IV

3.2.3 水资源空间均衡调控方案

水资源空间均衡 SD 模型中重点纳入了水资源子系统的参数,包括万元工业增加值用水量、城市居民生活用水定额、农村居民生活用水定额、耕地实际灌溉用水定额、耕地面积保有比例、耕地灌溉保证率、单位绿地用水定额以及城市绿化覆盖面积增长率等指标,围绕这些指标设置不同调控情景,形成如下方案:

a. 现状延续方案(方案 1)。不对模型中万元工业增加值用水量、城市居民生活用水定额等调控指标进行调整,保持现有节水及水资源利用水平,所有调控指标参数维持在 2020 年现状水平,该方案作为基准情景,用于与其他方案对比分析。

b. 绿色节水方案(方案 2)。在充分考虑流域水资源禀赋的基础上,依托工艺和农业技术的持续进步,深入挖掘流域内部节水潜力。分阶段提升节水水平,减少生活、工业、农业及生态用水量,建设节水型社会。该方案将节水水平提升与经济发展水平相协调。

c. 水源开发方案(方案 3)。在维持现有节水

水平和各用水指标不变的前提下,通过引入外调水、中水回用、集雨工程等措施开发新水源,以缓解流域水资源供需矛盾,保障水资源的可持续利用。

d. 综合协调方案(方案4)。综合方案2与方案3,通过节流与开源协同调控。一方面推动节水技术应用,降低水资源需求;另一方面开发新水源,提高可利用水资源总量,以多元化手段应对流域水资源矛盾。

计算得到未来情景不同方案下水资源空间均衡指数变化,如图6所示。相较于方案1,方案2对区域水资源负载系数的改善并不理想,而方案3与方案4增加了流域内可利用水资源量,显著降低了水资源负载系数,有效缓解了区域用水压力。水土资源匹配系数的变化趋势与水资源负载系数基本一致,即开发新水源对其改善作用远大于单纯提高节水水平的作用。用水效益方面,方案2和方案4均表现出显著提升,节水水平的提高对用水效益贡献较大,而方案3尽管开发了新水源,但对用水效益的提升作用相对较弱。

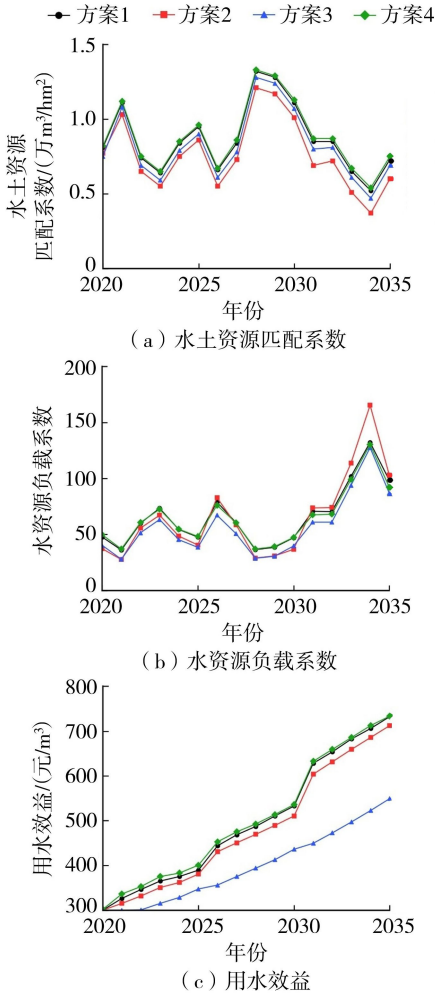


图6 不同方案下水资源空间均衡指数变化
Fig.6 Variation of water resources spatial balance indicators under different schemes

在改善大汶河流域水资源空间均衡状况、缓解水资源供需矛盾方面,开源措施(如外调水、中水回用等)在短期内成效更显著。然而,从长远发展及可持续利用角度来看,节水措施对于提升用水效益、推动绿色高效发展同样不可或缺。仅依赖开源措施难以从根本上解决流域水资源可持续发展问题。未来应坚持开源与节流并重的发展战略,通过多维度协同调控,实现流域水资源空间均衡和社会经济绿色高效协调发展的目标。

4 结 论

a. 2012—2017年济南市大汶河流域各产业的直接用水系数、完全用水系数均呈下降趋势,农林牧渔业、采矿业、食品烟草业等产业直接用水和间接用水效率存在提升空间。大汶河流域产业间虚拟水流通格局发生显著变化,其产业需求呈现出由传统农业主导逐步向水电气生产制造业主导转变的趋势。

b. 流域内水资源开发利用程度较高,2011—2020年空间均衡等级总体为相对均衡,空间失衡阶段受水资源禀赋影响。

c. 水源开发方案和综合协调方案在降低水资源负载系数和提升水土资源匹配系数方面明显优于绿色节水方案,但对于用水效益指标,绿色节水方案和综合协调方案优于水源开发方案。流域应坚持开源与节流并重,优先推进精准节水和产业结构优化,压减高耗水低附加值部门,提升服务业与高技术产业比重,实现流域水资源空间均衡、社会经济绿色高效的发展目标。

参考文献:

[1] 陈艳萍,蒋倩倩,刘晶婕. 黄河流域“水资源生态保护高质量发展”空间均衡性诊断[J]. 水利经济,2024,42(1):14-20. (Chen Yanping, Jiang Qianqian, Liu Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(1):14-20. (in Chinese))

[2] 李倩文,左其亨,李东林. 新疆水资源开发利用的空间均衡分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):28-33. (Li Qianwen, Zuo Qiting, Li Donglin. Spatial equilibrium analysis of water resources development and utilization in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):28-33. (in Chinese))

[3] 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.

[4] 左其亨,韩春辉,马军霞,等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河,2019,41(10):113-

118. (Zuo Qiting, Han Chunhui, Ma Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium [J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [5] 金菊良,徐新光,崔毅,等. 基于联系数和洛伦兹曲线的水资源空间均衡评价方法[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 387-395. (Jin Juliang, Xu Xinguang, Cui Yi, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation method based on connection number and Lorenz curve [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 387-395. (in Chinese))
- [6] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 33-44. (Yang Yafeng, Gong Shuxin, Wang Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese))
- [7] Niu Chen, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. A water resource equilibrium regulation model under water resource utilization conflict: a case study in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2022, 58(6): e2021WR030779.
- [8] 金菊良,苏维,周戎星,等. 基于基尼系数和联系数的区域水资源空间均衡评价模型[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 73-78. (Jin Juliang, Su Wei, Zhou Rongxing, et al. Evaluation model of regional water resources spatial equilibrium based on Gini coefficient and connection number [J]. Yellow River, 2021, 43(9): 73-78. (in Chinese))
- [9] 魏豪杉,王红瑞,郝鹏鑫,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))
- [10] 杨亚锋,李欣瑞,王红瑞,等. 基于“四水四定”的京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 107-113. (Yang Yafeng, Li Xinrui, Wang Hongrui, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium and dynamic evolution of water resources distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on “Basing Four Aspects on Water Resources” [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 107-113. (in Chinese))
- [11] 王红瑞,杜新龙,王煜,等. 水资源空间均衡调控理论框架与平衡机制[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 1-12. (Wang Hongrui, Du Xinlong, Wang Yu, et al. Theoretical framework and balance mechanism of spatial equilibrium regulation of water resources [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(1): 1-12. (in Chinese))
- [12] Sun Yan, Chen Zhuo, Wu Guangxue, et al. Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: implications for resources utilization and management [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 1-9.
- [13] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. (Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [14] 马丽. 牟汶河莱芜城区段综合治理工程影响后评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [15] 张芳源. 基于景观格局演变的大汶河流域生态安全格局构建研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [16] 侯恩光,张升第,王如岩,等. 大汶河流域泰安段水质变化及其与水量响应关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 137-144. (Hou Enguang, Zhang Shengdi, Wang Ruyan, et al. Change in water quality and its relationship to water quantity in Tai'an section of the Dawen River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 137-144. (in Chinese))
- [17] 王琦琨. 大汶河生态流量计算及价值评估[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- [18] 许和连,成丽红,孙天阳. 制造业投入服务化对企业出口国内增加值的提升效应: 基于中国制造业微观企业的经验研究[J]. 中国工业经济, 2017(10): 62-80. (Xu Helian, Cheng Lihong, Sun Tianyang. The effect of the input servitization of manufacturing on upgrading export domestic value added of enterprises: empirical evidence from Chinese micro-enterprise [J]. China Industrial Economics, 2017(10): 62-80. (in Chinese))
- [19] 梁铭聪,陈晓宏. 供需视角下广东虚拟水-能-碳演变、耦合与驱动[J]. 人民长江, 2025, 56(11): 171-180. Evolution, coupling, and driving of virtual water-energy-carbon in Guangdong Province from a supply-demand perspective [J]. Yangtze River, 2025, 56(11): 171-180. (in Chinese))
- [20] 鲁仕宝,张樊,裴亮,等. 能源-粮食关联视角下的我国五大典型区水资源安全[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 219-230. (Evaluation of water resource security in China's five typical regions from the perspective of energy-food nexus [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 219-230. (in Chinese))
- [21] 洪思扬,王红瑞,程涛,等. 国际及省际贸易视角下的中国虚拟水和隐含能源流通规律分析[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1735-1746. (Hong Siyang, Wang Hongrui, Cheng Tao, et al. Circulation characteristics of virtual water and embodied energy in China from the perspective of international and inter-provincial trade [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1735-1746. (in Chinese))
- [22] 王红瑞,王洪冲,赵伟静,等. 长江经济带水-能-粮流通及

- 压力变化特征分析[J]. 人民长江, 2023, 54(5): 1-11. (Wang Hongrui, Wang Hongchong, Zhao Weijing, et al. Analysis on characteristics of water-energy-food circulation and pressure changes in the Changjiang River economic belt[J]. Yangtze River, 2023, 54(5): 1-11. (in Chinese))
- [23] Wang Xuechao, Klemeš J J, Wang Yutao, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: an environmental input-output model-based approach [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114431.
- [24] Aviso K B, Tan R R, Culaba A B, et al. Fuzzy input-output model for optimizing eco-industrial supply chains under water footprint constraints [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(2/3): 187-196.
- [25] Zhang Wen, Fan Xing, Liu Yating, et al. Spillover risk analysis of virtual water trade based on multi-regional input-output model-a case study [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 275: 111242.
- [26] 洪思扬, 方伟, 王佳友, 等. 广东省水资源-能源-粮食的省际流动与风险传递[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 18-27. (Hong Siyang, Fang Wei, Wang Jiayou, et al. Inter-provincial water, energy, and food flow and risk transfer in Guangdong Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4): 18-27. (in Chinese))
- [27] 黄锋华, 黄本胜, 邱静. 基于均衡系数的广东省水资源空间均衡研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(5): 86-93. (Huang Fenghua, Huang Bensheng, Qiu Jing. The spatial equilibrium of water resources of Guangdong based on equilibrium coefficient [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(5): 86-93. (in Chinese))
- [28] 张雯, 刘倩倩, 王慧, 等. 基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4943-4953. (Zhang Wen, Liu Qianqian, Wang Hui, et al. Analysis of matching characteristics and scarcity of agricultural water and land resources in Shandong Province based on water footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4943-4953. (in Chinese))
- [29] 姜秋香, 孙宇祥, 王子龙, 等. 基于突变理论和因子分析的黑龙江水资源利用效率评价及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 19-26. (Jiang Qiuxiang, Sun Yuxiang, Wang Zilong, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency and analysis of driving factors in Heilongjiang Province based on mutation theory and factor analysis[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 19-26. (in Chinese))
- [30] 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))
- [31] Dai C, Qin X S, Chen Y, et al. Dealing with equality and benefit for water allocation in a lake watershed: a Gini-coefficient based stochastic optimization approach [J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 322-334.
- [32] 贾玉博, 杨宏伟, 栗晓玲, 等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 86-94. (Jia Yubo, Yang Hongwei, Su Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 86-94. ((in Chinese))
- [33] 杨亚锋, 王红瑞, 巩书鑫, 等. 可变勾股模糊 VIKOR 水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 633-646. (Yang Yafeng, Wang Hongrui, Gong Shuxin, et al. Variable Pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 633-646. (in Chinese))
- [34] 冯仲恺, 蒋林佚, 牛文静, 等. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(II): 演化规律[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 52-65. (Feng Zhongkai, Jiang Linyi, Niu Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (II): evolution law [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 52-65. (in Chinese))
- [35] 王菲, 陈敏, 曹永强, 等. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 31-37. (Wang Fei, Chen Min, Cao Yongqiang, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 31-37. (in Chinese))
- [36] 俞阳, 牟琴, 闵雪峰, 等. 基于熵权 TOPSIS-SD 的超大城市水资源承载力研究[J]. 人民长江, 2024, 55(12): 148-156. (Yu Yang, Mou Qin, Min Xuefeng, et al. Study on water resource carrying capacity simulation in megacities based on entropy-weighted TOPSIS-SD model [J]. Yangtze River, 2024, 55(12): 148-156. (in Chinese))
- [37] Wang Ziyao, Li Xin, Mao Yueting, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: a case study of Bortala, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108499.
- [38] 刘为锋, 郭旭宁, 李云玲, 等. 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[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 27-32. (Liu Weifeng, Guo Xuning, Li Yunling, et al. Study on optimized layout and networking scheme of “Jingchu Anlan” modern water network based on spatial equilibrium [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 27-32. (in Chinese)).