

中国水资源节约集约安全利用能力的时空分异特征与影响因素研究

吴 丹^{1,2},王浩宇¹

(1. 北方工业大学经济管理学院; 2. 北方工业大学资源与环境管理研究中心)

摘要:为明晰中国水资源节约集约安全利用能力的时空分异特征与影响因素,基于社会-经济-自然复合生态系统理论和社会-生态系统理论,构建了社会-经济-生态-水资源复合系统视角下的水资源节约集约安全利用能力评估指标体系,集成建立了“理想解模型-层次等权法-变异系数法-障碍度模型-面板 Tobit 模型”综合评估模型,开展了中国水资源节约集约安全利用能力评估。结果表明:中国各省份水资源节约集约安全利用能力波动上升,至 2023 年,21 个省份超过 0.8,北京、天津、河北、山东和河南相对最优;内部影响因素方面,社会系统的障碍度最小,经济、生态系统的障碍度缓慢下降,水资源系统的障碍度最大,排名前 5 的障碍度因子依次为再生水利用率、生态用水比例、万元服务业增加值用水量、供水管网漏损率、地下水占总供水量比例;外部影响因素方面,经济发展水平、产业结构、政府干预程度和科技创新能力的正向作用显著,水资源禀赋和外商投资水平具有一定抑制作用,科技创新能力对水资源节约集约安全利用能力提升的影响效应最显著。

关键词:社会-经济-生态-水资源复合系统;水资源节约集约安全利用能力;理想解模型;障碍度模型;Tobit 模型;中国

Research on spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China//Wu Dan^{1,2}, Wang Haoyu¹ (1. School of Economics & Management, North China University of Technology; 2. Research Center for Resource and Environmental Management, North China University of Technology)

Abstract: In order to clarify spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of the capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China, the evaluation system of the capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources has been established based on socio-economic-natural complex ecosystem theory and socio-ecological system theory, from the perspective of the complex system of “socio-economic-ecological-water resources”. The integrated evaluation model combining “the ideal solution model, the hierarchical equal-weight method, the coefficient of variation approach, barrier model, and panel Tobit model” is established, to evaluate the capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China. The research indicates that the capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources among China’s provinces exhibits a fluctuating upward trend. By 2023, 21 provinces had a value exceeding 0.8, with Beijing, Tianjin, Hebei, Shandong, and Henan being relatively optimal. Regarding internal influencing factors, social system presents the lowest obstacle degree, while economic and ecological systems demonstrate a gradual decrease in their obstacle degree. Water resources system exhibits the highest obstacle degree. And the top five obstacle factors are ranked as follows: reclaimed water utilization efficiency, the proportion of ecological water resources to water consumption, water consumption per 10000 yuan of service sector value-added, water leakage rate in supply networks, the proportion of groundwater to total water supply. Regarding external influencing factors, the positive effects of economic development levels, industrial structure, degree of government intervention, and technological innovation capacity are significant, while water resource endowment and foreign investment levels exert a certain degree of restraint. The impact of technological innovation capability on enhancing the capacity for the conservation, intensive and safe utilization of water resources is the most significant.

Key words: comprehensive system of socio-economic-ecological-water resources; capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources; ideal solution model; obstacle degree model; Tobit model; China

基金项目:国家社会科学基金项目(22FGLB016);北方工业大学北京城市治理研究基地项目(2025CSZL06);2025 年秦创原“揭榜挂帅”课题项目(JSHT20250540);北京市自然科学基金(QG26043)

作者简介:吴丹(1986—),男,教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:wu_daniel@163.com

• 36 •

《“十四五”水安全保障规划》《国家水网建设规划纲要》《关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》《加快构建水旱灾害防御工作体系的实施意见》《关于全面推进江河保护治理的意见》等政策文件明确以全面提升水安全保障能力为主线,以强化水资源总量管理、科学配置、全面节约、循环利用为理念,大力推动工农业和城镇等重点领域节水、加强非常规水源利用为手段,全面推进江河保护治理,进一步提升水资源节约集约安全利用能力。在此背景下,形成一套系统科学的水资源节约集约安全利用能力评估工具,全面衡量和识别中国水资源节约集约安全利用能力的时空分异特征与影响因素意义重大。为此,基于社会-经济-自然复合生态系统(social-economic-natural complex ecosystem, SENCE)理论和社会-生态系统(social-ecological systems, SES)理论,开展社会-经济-生态-水资源复合系统视角下中国水资源节约集约安全利用能力评估,剖析水资源节约集约安全利用能力的时空差异、关键障碍因子和影响因素,为中国水行政主管部门和学界深化水治理实践、提升水资源节约集约安全利用能力提供决策参考。

水利事业是人民群众福祉、国家长治久安、民族长远发展的重要保障,科学评估水资源节约集约安全利用能力是缓解人水矛盾的重要任务之一^[1-2]。目前,国际社会重点聚焦于中亚五国^[3]、D-8 国家^[4]、伊朗流域^[5]、湄公河流域^[6]等地区的水资源安全利用评估,以及中亚咸海盆地的用水效率评估^[7]和中东国家的水资源政策成效评估^[8]。相较于国外,中国水资源利用评估从早期的水资源节约^[9]、集约^[10-13]或安全利用^[14-15]等单一视角,拓展到水资源节约集约利用^[16-20]和集约安全利用^[21-22]等集成视角,并深化为水利高质量发展^[1,23]和水治理效能^[24]等综合视角。单一视角聚焦水资源节约、集约或安全利用评估,强调水资源投入产出效率、利用强度等要素^[10],涵盖农业、工业、服务业、生活及综合用水等行业利用效率指标^[9,25],形成了较为成熟的水资源节约、集约利用评估框架。在效率测度上,通常以人力、资本与水资源为投入,以经济产出、污染排放分别作为期望、非期望产出,运用投入产出模型揭示区域水资源利用效率的差异化表现^[11-13]。并采用“稳定性-协调性-弹性”综合框架反映水资源系统与社会经济、生态环境的耦合状态^[15],评估水资源安全利用能力。集成视角聚焦水资源节约集约利用和集约安全利用评估,强调从整体上衡量区域水资源节约集约利用能力与安全利用水平^[16-22],涵盖“生活-工业-农业-生态-管理”集成指标,形成了

“水资源-社会经济-生态环境”集成性评估框架。综合视角聚焦水利高质量发展和水治理评估,强调统筹水资源、水环境、水生态和水灾害治理,涵盖“水资源节约集约安全-水生态环境保护”综合性指标^[23-25],形成了“灾害防御-节约集约利用-优化配置-保护治理”综合性评估框架。评估方法主要包括模糊评价法^[6,19]、综合评估法^[14,25]、熵权法^[15-16]、主成分分析法^[17-18]、理想解法^[20,26]等定性定量相结合的模型方法。此外,政策制度研究聚焦流域水资源管理立法、管理体系优化、流域治理机制完善等方面,重点探索未来优化水资源管理制度的实现路径,凸显制度建设对提升水资源节约集约安全利用能力的关键作用^[27-29]。

梳理文献可知,学界聚焦水资源节约、集约、安全利用评估研究取得了一定成果,但仍有待深化探索。一是学界围绕水资源节约集约或集约安全利用等视角构建评估指标体系,对水资源节约集约安全利用评估指标体系构建的理论性支撑和综合性研究不足。二是学界主要围绕水资源节约集约或集约安全利用的时空差异展开对比评估,对制约水资源节约集约安全利用能力提升的关键障碍因子和影响因素探究有待深化。鉴于此,综合考虑水资源供给、社会节约利用、经济集约利用以及生态安全保障等水资源供需变化,依据 SENCE 理论和 SES 理论,从“社会-经济-生态-水资源”复合系统视角,构建水资源节约集约安全利用能力评估的综合性指标体系。并采用层次等权法和变异系数法确定指标组合权重,应用理想解模型评估中国水资源节约集约安全利用能力的时空差异,剖析“社会-经济-生态-水资源”四大系统对水资源节约集约安全利用能力的驱动力。同时,综合运用障碍度模型和 Tobit 模型,深入探究水资源节约集约安全利用能力的影响因素,以期提升水资源节约集约安全利用能力提供决策参考。

1 评估框架

水资源节约集约安全利用能力受到水资源供给、社会人口、经济产业和生态环境的共同作用影响^[30-31]。SENCE 理论提出,当代若干重大社会问题都直接或间接关系到社会、经济和自然环境^[32],是一个复杂的社会-经济-自然复合生态系统^[33-34]。SENCE 理论的核心是实现多元互动关系的简化与整合,为人类可持续发展提供理论支撑^[35]。SES 理论提出人类活动离不开社会生态系统,并提供了一个全面的科学框架,明晰水资源供给、社会人口、经济产业和生态环境之间的相互作用关系^[36-37]。

依据 SENCE 理论和 SES 理论,将水资源节约集约安全利用的理论框架解构为社会系统、经济系统、生态系统和水资源系统四大系统(图 1)。①从系统内部看,社会系统强调以人为本的社会节约利用,体现节水型社会建设能力;经济系统强调以经济效益为主的集约利用,体现经济产业集约利用能力;生态系统强调以生态修复为主的环境治理和灾害防御,体现生态安全保障能力;水资源系统强调以水资源供给

结构优化为主的优化配置,体现水资源供给保障能力。②从系统之间看,社会系统通过引导经济发展方向影响经济系统,通过建设节水型社会直接影响生态环境状况;经济系统通过提供物质基础支撑社会系统优化,通过水资源集约利用间接影响生态系统状况;生态系统通过倒逼社会行为调整和经济结构优化来改善生态环境状况。同时,社会、经济、生态三大系统影响水资源系统的水资源供给结构优

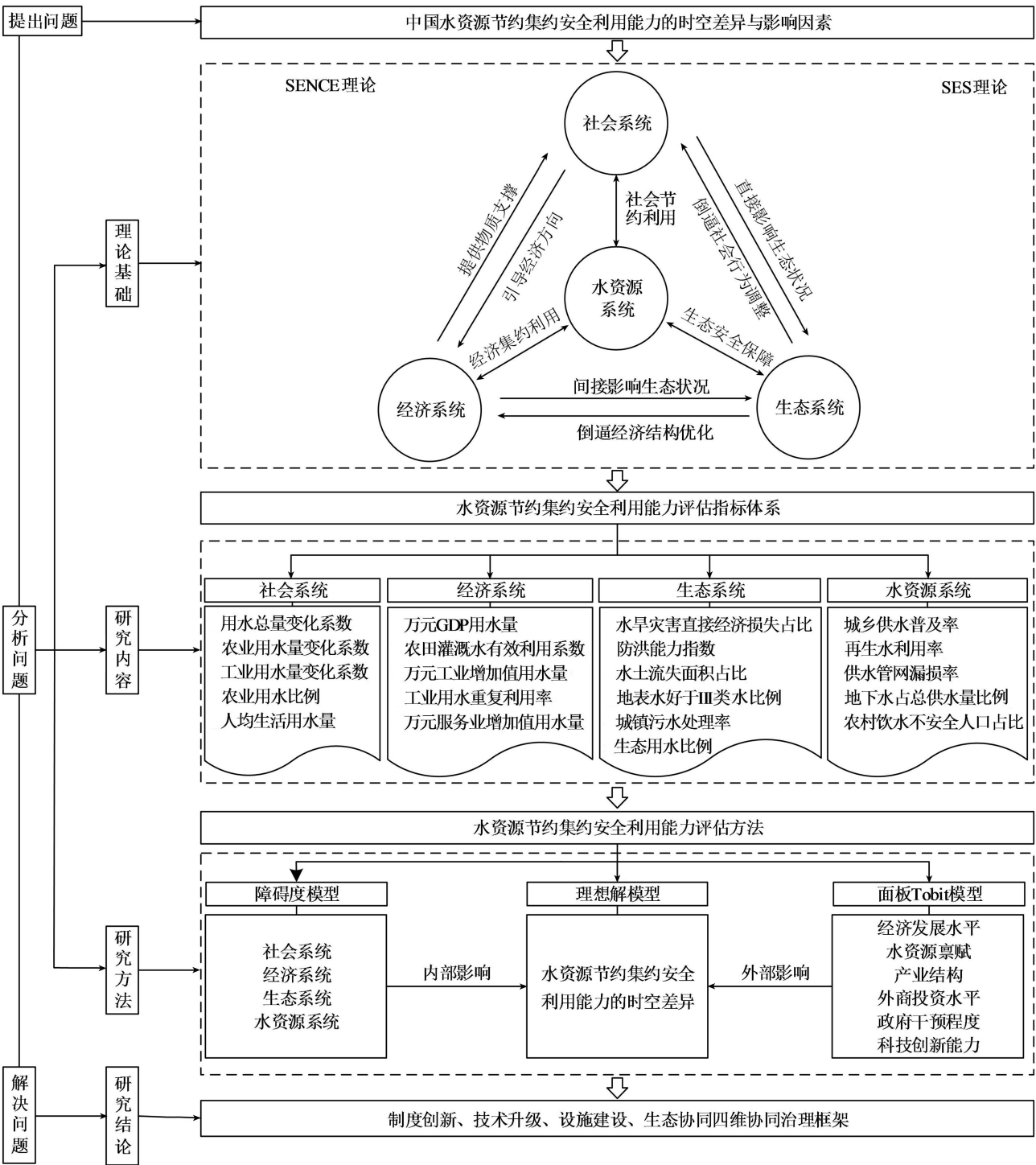


图 1 中国水资源节约集约安全利用能力评估框架

Fig. 1 Evaluation framework of capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China

化。综上,建立“社会-经济-生态-水资源”复合系统视角下中国水资源节约集约安全利用能力评估框架。

2 评估指标体系与模型

2.1 指标体系建立与外部影响因素选取

综合考虑水资源节约集约安全利用能力的社会、经济、生态、水资源四大系统,依据客观性、系统性、全面性、可获得性四大原则,构建水资源节约集约安全利用能力评估指标体系(图2)。该体系继承和发展了现有的水资源节约集约利用、水资源集约安全利用评估框架,一方面涵盖了传统的水资源利用效率、水生态安全等核心指标,与水资源节约集约利用、水资源集约安全利用保持了高度一致性;另一方面强调统筹水资源、水环境、水生态和水灾害治理,体现指标设计的系统性、科学性和动态性。基于SENCE理论和SES理论构建“社会-经济-生态-水资源”复合系统评估指标体系,凸显了以人为本的社会节约利用、经济产业集约利用、生态安全保障和水资源供给保障,突出了水资源节约集约安全利用的多维耦合特征。另外,指标选取弱化了规模和绝对值,强调变化趋势和相对值,突出水资源节约集约安全利用的动态评估和时空差异对比分析。图2括号中数据为指标权重,通过组合赋权法确定,融合了层次等权法与变异系数法的优势。层次等权法适配“社会-经济-生态-水资源”四维层级结构化的指标体系,规避数据弱差异干扰,按“维度数乘以维度内



图2 水资源节约集约安全利用能力评估指标体系

Fig.2 Evaluation index system of capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources

指标数”的倒数赋权;变异系数法消除指标量纲和数量级差异的影响,依据指标变异程度赋权;最终对两权重取均值,既遵循层级结构的主观逻辑,又体现数据变异特征的客观逻辑,保障权重确定的科学性与全面性。

本文指标数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》《中国水资源公报》《中国水土保持公报》《中国水旱灾害公报》等权威统计年鉴以及国家统计局官网,时间跨度2012—2023年。鉴于港澳台地区数据严重缺失,为保证研究的可靠性,选取中国除港澳台外的31个省份的数据作为样本。指标参考值主要参考文献^[3,24],并依据《加快推进新时代水利现代化的指导意见》《“十四五”节水型社会建设规划》《“十四五”水安全保障规划》《关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》等政策报告的发展规划值予以确定。其中,指标参考值分别设定为:社会系统中,用水总量、农业用水量和工业用水量的变化系数小于或等于1,农业用水比例小于或等于50%,人均生活用水量的参考值依据人均可支配收入的范围进行设定,即年人均可支配收入处于 ≤ 2 万、 >2 万~3万、 >3 万~4万、 >4 万~5万、 >5 万~6万、 >6 万~7万、 >7 万~8万、 >8 万元,年人均生活用水量分别对应为 ≤ 30 、 $>30\sim 35$ 、 $>35\sim 40$ 、 $>40\sim 45$ 、 $>45\sim 60$ 、 $>60\sim 70$ 、 $>70\sim 80$ 、 $>80\sim 90\text{ m}^3$ ^[38]。经济系统中,万元GDP用水量小于或等于 50 m^3 、万元工业增加值用水量小于或等于 50 m^3 、农田灌溉水有效利用系数大于或等于0.8,工业用水重复利用率为100%,万元服务业增加值用水量小于或等于 2 m^3 。生态系统中,水旱灾害直接经济损失占比小于或等于0.5%,防洪能力指数大于或等于80%,水土流失面积占比小于或等于15%,地表水好于Ⅲ类比例为100%、城镇污水处理率为100%,生态用水比例大于或等于10%。水资源系统中,城乡供水普及率为100%,再生水利用率大于或等于50%,供水管网漏损率小于或等于8%,地下水占总供水量比例小于或等于15%,农村饮水不安全人口占比为0。

鉴于指标的关联性和数据可获得性,选取经济发展水平^[39]、水资源禀赋^[40]、产业结构^[41]、外商投资水平^[42]、政府干预程度^[43]、科技创新能力^[44-45]作为水资源节约集约安全利用能力的外部影响因素,分别以人均GDP、人均供水量、第三产业产值占GDP比例、外商投资企业投资总额、政府财政支出占GDP比例、人均发明专利申请授权量来表征。

2.2 评估模型

2.2.1 水资源节约集约安全利用能力测算模型

依据水资源节约集约安全利用能力评估指标体系,将层次等权法^[45]、变异系数法^[3]、目标一致法^[46]、理想解模型^[24]相结合,构建水资源节约集约安全利用能力综合评价方法,衡量中国水资源节约集约安全利用能力的时空差异。具体而言:①指标赋权。按照图2中的层次等级,运用层次等权法和变异系数法对指标进行组合赋权。②指标标准化。依据指标参考值,采用目标一致法,对图2中正向指标以实际值除以目标值、逆向指标以目标值除以实际值,进行无量纲化处理。若指标标准化后数值大于1则取值为1。③指标综合评价。采用理想解模型,构建指标的正、负理想解,分别计算指标值与正、负理想解之间的距离,测算指标与理想解的相对贴近度,衡量中国水资源节约集约安全利用能力的时空差异。

2.2.2 影响因素识别模型

在测算不同时期中国各省份水资源节约集约安全利用能力的基础上,采用障碍度模型^[47]和Tobit模型^[48]识别影响中国各省份水资源节约集约安全利用能力的内、外部影响因素。具体而言:①应用障碍度模型,采用因子贡献度和指标偏离度,对影响中国水资源节约集约安全利用能力时空差异的内部主要障碍因子进行识别,从而有针对性地提出水资源节约集约安全利用能力提升的对策建议。②Tobit模型即审查回归模型,属于一种因变量受限的回归模型,能够解决受限或截断因变量的模型构建问题。由于理想解模型测算的水资源节约集约安全利用能力介于0~1之间,为避免估计误差,采用受限因变量Tobit模型分析水资源节约集约安全利用能力的外部影响因素。

3 评估结果与分析

3.1 时空分异特征

基于理想解模型,衡量2012—2023年中国各省份水资源节约集约安全利用能力,结果如图3所示。由图3可见,2012—2023年中国31个省份的水资源节约集约安全利用能力波动上升。随着节水和污水处理技术的进步,以及最严格水资源管理制度、双控行动方案的实施,所有省份在水资源节约、集约和安全利用方面取得重大成效。但由于各省份的经济发展水平、科技水平、自然条件等存在显著差异,北京、天津等经济发展水平较高的省份,水资源节约集约安全利用能力普遍较高。同时,近年来受极端天气的影

响,水旱灾害经济损失占比、农村饮水不安全人口占比等指标的不确定性变大,导致中国省份的水资源节约集约安全利用能力出现波动。参考张修宇等^[49]的研究成果,对水资源节约集约安全利用能力等级进行划分,0~<0.2、0.2~<0.4、0.4~<0.6、0.6~<0.8、0.8~1.0分别对应差、较差、中等、较好、好等级。图3可知,至2023年,中国21个省份达到好等级,其中,北京、天津、河北、山东、河南超过0.9;9个省份达到较好等级,仅西藏为中等等级。2023年受“23·7”流域性洪水影响,北京、河北等省份的水资源节约集约安全利用能力有所下降。

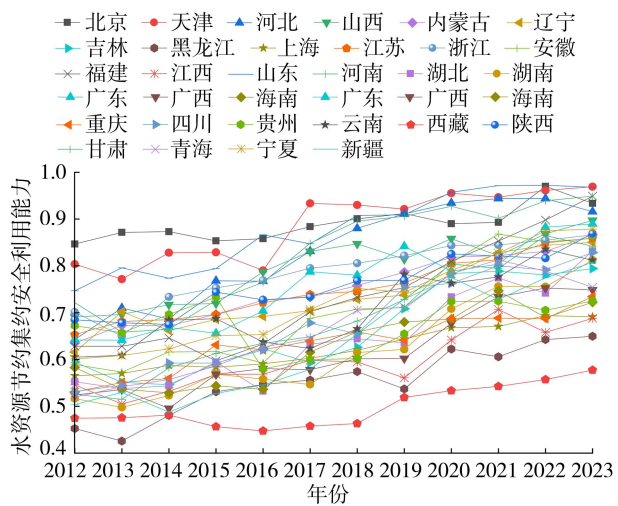


图3 2012—2023年中国水资源节约集约安全利用能力
Fig.3 Capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China from 2012 to 2023

图4为2012—2023年中国水资源节约集约安全利用能力四大系统驱动力。由图4可见,从四大系统对水资源节约集约安全利用能力提升的驱动作用看,社会系统的箱体最短且高位稳定,说明中国各省份在水资源的社会节约利用方面均取得较好的成效且差异较小。经济系统的箱体越来越短,说明经济系统的驱动作用在中国省份趋于集中;归因于最严格水资源管理制度、双控行动方案以及水资源刚性约束制度在全国范围的实施,经济结构向低耗水、高附加值的方向转型,逐步减少了省份的差异化 and 随机性。水资源系统的箱体范围略大且存在明显的波动,原因在于各省份的再生水利用率、地下水占总供水量比例、农村饮水不安全人口占比存在较大差异。一方面,北方缺水地区人均水资源占有量不足,倒逼再生水利用和地下水开发利用,而南方丰水区地表水丰富,对再生水和地下水的需求低;另一方面,发达省份的经济发展与水资源供给矛盾突出,迫使发达省份采用先进的再生水处理技术、通过地表水、地下水、外调水和再生水等多水源调配方式推动经济高质量

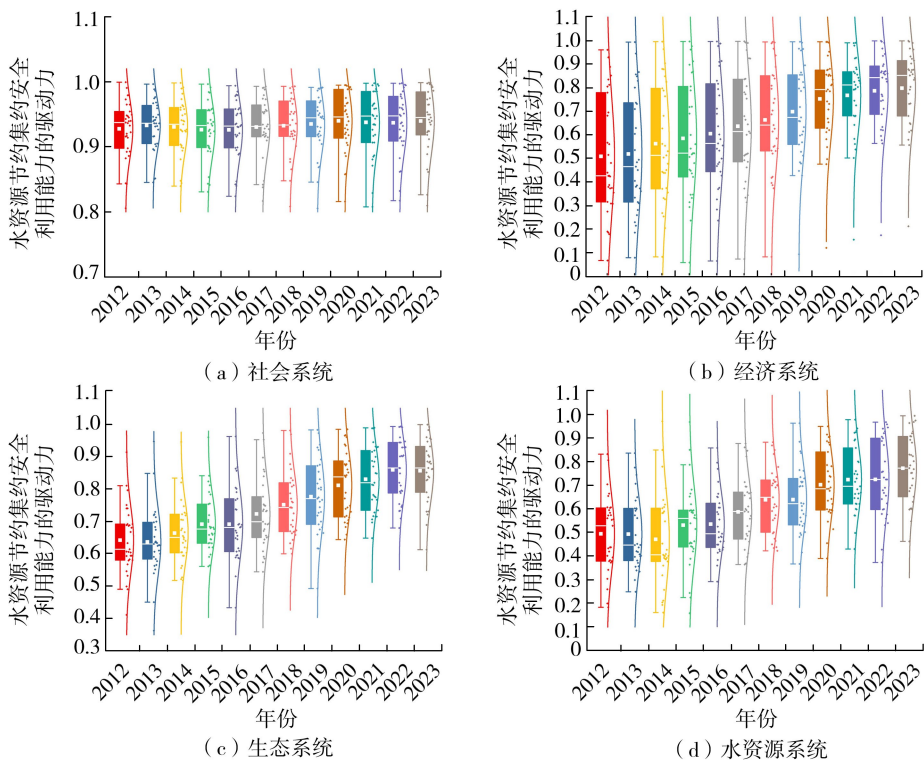


图 4 2012—2023 年中国水资源节约集约安全利用能力四大系统驱动力

Fig. 4 Driving forces of four major systems of capacity for conservation, intensive and safe utilization of water resources in China from 2012 to 2023

发展。此外,东部发达省份经济实力雄厚、城镇化水平高,农村供水工程完善;而西部经济欠发达省份依赖中央财政转移,水利基础设施建设成本高难度大,致使农村饮水不安全人口占比的省份差异大。

3.2 影响因素

3.2.1 内部影响因素

a. 四大系统障碍度变化。为明晰四大系统对水资源节约集约安全利用能力的影响,采用障碍度模型计算四大系统的障碍度(图 5)。2012—2023 年,社会系统的障碍度最小,原因在于社会系统重在加快节水型社会建设和实施双控行动,中国各省份的用水总量得到有效控制。经济系统的障碍度较大但缓慢下降。究其原因,一方面,服务业涵盖的餐饮、住宿、洗车等行业用水强度高,而服务业节水技术渗透率不足,使得大部分省份万元服务业增加值用水量未达到国家的目标值。另一方面,农业滴灌、喷灌等节水技术得到广泛应用,农业用水由粗放转向集约,农田灌溉水有效利用系数不断提高;工业企业再生水等非常规水提取技术和工业废水循环利用设备的更新,使得中国各省份万元工业增加值用水量显著减少,水资源集约利用水平持续提升;随着生活节水意识的不断增强和数字技术快速发展,智慧水务系统实现对城市供水、排水和节水的智能化管理,人均生活用水量得到有效控制。生态系统

的障碍度呈下降态势,2023 年略有反弹。原因在于国家高度重视水生态安全,在加强防洪能力、提高地表水质和污水处理率方面取得成效。但大部分省份的水旱灾害经济损失和水土流失面积仍较大,导致生态系统对水资源节约集约安全利用能力的提高存在一定阻力。2023 年受“23·7”流域性洪水影响,华北地区的安全利用能力有所下降。水资源系统的障碍度最大且缓慢波动上升。实践表明,中国城市供水管网平均服役年限已超 20 a,年久失修导致供水管网漏损率难以得到有效控制,与目标值 8%存在较大差异。同时西部地区的农村饮水不安全人口占比较大,致使水资源系统的障碍度最大。

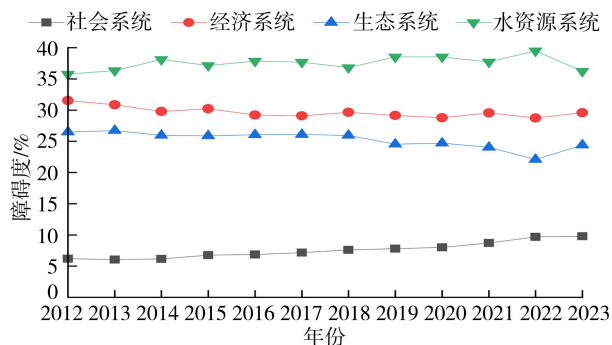


图 5 2012—2023 年四大系统的障碍度

Fig. 5 Obstacle degree of four major systems from 2012 to 2023

b. 主要障碍因子分析。测算 2023 年中国省份

水资源节约集约安全利用能力各因子的障碍度,排名前五的障碍因子为:再生水利用率、生态用水比例、万元服务业增加值用水量、供水管网漏损率、地下水占总供水量比例,分析其对各省份水资源节约集约安全利用能力的阻碍度,结果如图 6 所示。

①再生水利用率方面,2023 年,北京、河北、山东和宁夏的障碍度为 0,障碍度超 30%的省份分别为浙江(37%)、上海(31.35%)、福建(30.9%)、重庆(30.46%)。实践表明,典型缺水地区地表水供给严重不足,倒逼多水源协同体系形成,在地方政策和跨区合作机制的驱动下,再生水逐渐成为第二水源。

②生态用水比例方面,2023 年障碍度较高的地区主要集中在南部和西部的省份,其中江苏和广东的障碍度超过 30%。核心原因在于水资源禀赋约束与城市社会经济发展需求的极端矛盾,有限的水资源优先保障生产需求,生态用水被大幅挤压。

③万元服务业增加值用水量方面,2023 年北京的障碍度为 0,其他省份的障碍度均在 5%以上。归因于北京的服务业以信息传输、金融、科技服务等高附加值、低耗水行业为核心,而大部分省份服务业以餐饮、住宿、批发零售等传统业态为主。

④供水管网漏损率方面,2023 年西藏和甘肃的障碍度为 0,其余省份的

水资源节约集约安全利用能力均受到供水管网漏损率阻碍。归因于大部分省份城市供水管网建设普遍年代久远,管道长期运行后出现腐蚀、破裂等问题,管网更新改造资金投入有限,漏损检测技术应用范围较窄,难以实时定位漏损点。

⑤地下水占总供水比例方面,2023 年,天津、上海等 18 个省份的障碍度为 0,而山东和河南的障碍度超过 30%,北京和河北超过 20%。归因于山东、河南、北京和河北年降水量在全国排名靠后且人口集中,供水结构相对依赖地下水,地下水占比对水资源节约集约安全利用能力提升的阻碍更大。

3.2.2 外部影响因素

采用面板 Tobit 模型回归分析经济发展水平、水资源禀赋、产业结构、外商投资水平、政府干预程度、科技创新能力 6 个外部影响因素对水资源节约集约安全利用能力的影响效应,结果如表 1 所示,所有变量均通过显著性检验,但在不同分位点存在分位异质性。

a. 经济发展水平。经济发展水平对水资源节约集约安全利用能力提升的影响先促进后趋缓。低分位点,通过水利基础设施的规模效应和非农产业占比提升的结构效应,经济增长正向显著提升水资

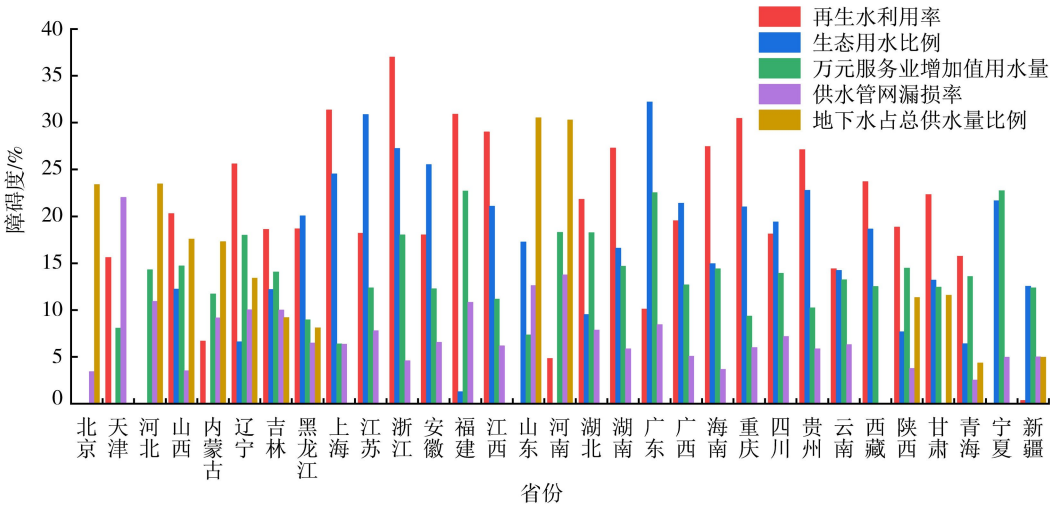


图 6 2023 年中国省份主要障碍因子的障碍度

Fig. 6 Obstacle degree of main obstacle factors in provinces of China in 2023

表 1 外部影响因素的 Tobit 回归分析结果

Table 1 Tobit regression analysis results of external influencing factors

外部影响因素	固定效应	回归系数				
		$\tau=0.10$	$\tau=0.25$	$\tau=0.50$	$\tau=0.75$	$\tau=0.90$
经济发展水平	0.163** (2.02)	0.227*** (4.16)	0.074(1.20)	-0.040(-0.39)	-0.099(-0.77)	0.127(0.80)
水资源禀赋	-0.363** (-2.48)	-0.229** (-2.32)	-0.106(-0.95)	-0.174(-0.95)	-0.292(-1.25)	-0.336(-1.17)
产业结构	0.142* (1.66)	0.049(0.85)	-0.020(-0.30)	-0.011(-0.11)	0.053(0.39)	0.239(1.43)
外商投资水平	-0.104*** (-3.19)	-0.065*** (-2.96)	-0.070*** (-2.82)	-0.065(-1.61)	-0.106** (-2.04)	-0.104(-1.64)
政府干预程度	0.261** (2.35)	0.151** (2.01)	0.114(1.33)	0.207(1.50)	0.323* (1.83)	0.235(1.08)
科技创新能力	0.269*** (4.28)	0.154*** (3.63)	0.249*** (5.17)	0.295*** (3.78)	0.740*** (7.42)	0.393*** (3.21)

注:***、**、* 分别表示达到 0.01、0.05、0.1 显著水平;括号内统计量为 t 值; τ 为面板分位数。

源节约集约安全利用能力。高分位点,产业结构趋于合理,节水技术和基础设施的边际改进空间缩小,出现边际递减效应,导致经济增长对水资源节约集约安全利用能力提升的回归系数不显著甚至为负。

b. 水资源禀赋。水资源禀赋对水资源节约集约安全利用能力存在显著的负向关系,且随着分位点的提高这种负向关系变得不显著。归因于丰水区长期依赖自然资源,政府和企业对节水基础设施建设的投资意愿较低,缺乏水资源管理技术优化和创新动力,导致水资源配置和治理效率低下。而缺水地区通过再生水、地下水、跨流域调水等多水源调度和政策倒逼生产生活节约集约利用,节水能力提升。

c. 产业结构。在 0.1 的显著性水平下,产业结构优化升级对水资源节约集约安全利用能力的提升具有显著的正向关系。在选取的分位点中,产业结构对水资源节约集约安全利用能力提升的影响效应不显著,但其回归系数随分位点的增加呈先下降后上升的趋势,即在 0.1~0.5 分位阶段,产业结构的影响效应下降甚至变为负值,而在 0.75~0.9 分位阶段,产业结构的影响不断提高。说明产业结构不合理地区,降低农业占比也未能有效提升水资源节约集约安全利用能力。

d. 外商投资水平。外商投资水平对水资源节约集约安全利用能力在 0.01 的显著性水平下存在负向关系,且显著性随分位点的提高而降低。由《中国外资统计公报(2024)》可知,外商在中国制造业的投资长期占据主导地位。在低分位点地区,外资涌入直接增加了高耗水行业的工业取水量和废水排放量,而节水技术和中水回用设施尚不完善,导致用水压力加剧和安全利用能力被削弱,因此负向影响显著;而在高分位点地区,产业结构更优、环保标准更严,外资更多流向高技术服务业或绿色制造,对水资源的边际挤压效应被稀释,负向作用不再显著。

e. 政府干预程度。政府干预程度对水资源节约集约安全利用能力的提升存在显著的正向关系。随着分位点的提高,回归系数整体呈现上升趋势,但显著性逐渐降低,说明随着水利基础设施建设逐步完善,以及水资源开发高效利用和节水意识逐渐成熟,政府干预对提升水资源节约集约安全利用能力的作用下降。

f. 科技创新能力。科技创新能力能够显著提升水资源节约集约安全利用能力,且在 0.1~0.75 分位阶段,随着分位点的提高,科技创新能力的影响效应不断加大。在 0.9 分位阶段,影响效应有所下降,出现边际效应递减。

4 建 议

a. 构建全链条管理体系的制度创新。一是完善水资源刚性约束制度,建立基于“四水四定”原则的动态配额机制,进一步完善水资源节约集约安全利用的政策法规,明确各行业用水定额和监管责任,加强水资源管理和保护。二是继续推行和完善阶梯水价制度深化改革,对天然水、再生水、淡化海水实行差异化定价,使价格信号真正反映资源成本和环境代价。三是完善全国统一的水权交易市场和跨区域水资源补偿机制,鼓励缺水地区通过交易获得用水额度,激发节水内生动力。四是加大水资源节约集约安全利用的媒体宣传教育,增强公众节水意识和责任感,形成全社会节水的良好氛围。

b. 实施梯度适配的技术升级策略。一是农业领域构建因地制宜的核心技术推广体系,在西北干旱区重点推广滴灌、喷灌技术以及水肥一体化技术,在黄灌区建设高效节水示范工程提高节水灌溉面积。二是工业领域聚焦高耗水行业,强制推行膜分离技术等水循环利用技术改造,建立水效标杆企业引领机制,对达到国际先进水平的企业给予税收优惠。三是生产生活领域加快建设水资源统一调度平台和智慧水务系统,实现对水资源的实时监控和智能化管理,并建立管网漏损监控系统,将漏损率与地方政府考核挂钩。四是加强非常规水源技术研发,在沿海地区扩大海水淡化和再生水收集规模,在西北矿区推广矿井水回用技术,形成多元供水格局。

c. 实施补齐短板与优化布局相结合的设施建设。一是实施全国供水管网更新改造工程,重点对使用年限超过 20 a 的老旧管网全面检修,并采用先进的管材和施工技术,2030 年前确保 90% 的省份漏损率控制在目标值 8% 以内。二是推进再生水循环利用系统建设,缺水城市新城区建设必须同步规划再生水管网,老城区逐步完善再生水配送系统,西北地区借鉴新疆河润尚源科技有限公司经验推广“冬储夏用”调蓄设施。三是在黄河流域、京津冀等重点区域,建设区域性再生水循环利用工程,将处理后的水资源优先用于农业灌溉、生态补水和工业冷却。

d. 构建生态协同系统治理格局。一是严格落实入河排污口“一口一策”整治方案,尤其是长江、黄河等重要流域排污口排查整治,建立水质超标预警机制和全国水资源监控网络。二是将生态用水作为刚性约束纳入水资源配置方案,并实施流域统一调度和生态补偿机制,针对上海等生态用水比例远低于目标值的省份,制定法律法规明确生态用水的法定地位,并将生态用水保障作为地方政府的重要

考核指标。三是在干旱易发区建设应急水源工程,在洪涝多发区完善雨洪资源利用设施,以增强气候变化适应能力,提升水资源系统韧性。

5 结 论

a. 中国各省份水资源节约集约安全利用能力总体波动上升,至 2023 年,21 个省份超过 0.8,9 个省份超过 0.6,仅西藏低于 0.6。由于各省份的经济发展水平、科技水平、自然条件等存在显著差异,北京、天津等经济发展水平较高的省份,水资源节约集约安全利用能力普遍较高。

b. 社会、经济、生态、水资源四大系统对水资源节约集约安全利用能力的驱动作用均呈增长趋势。社会系统的障碍度最小;经济系统的障碍度较大,但呈缓慢降低趋势;生态系统的障碍度呈下降趋势;水资源系统的障碍度最大且呈缓慢波动上升趋势。

c. 内部影响因素看,排名前五的障碍因子依次为:再生水利用率、生态用水比例、万元服务业增加值用水量、供水管网漏损率、地下水占总供水量比例。从外部影响因素看,经济发展水平、产业结构、政府干预程度、科技创新能力的提高显著促进水资源节约集约安全利用能力提升,而水资源禀赋和外商投资水平的提高显著抑制水资源节约集约安全利用能力提升。构建“制度创新-技术升级-设施建设-生态协同”四维协同治理框架可以全面提升中国水资源节约集约安全利用能力。

参考文献:

[1] 左其亭,钟涛,张志卓,等. 水利高质量发展的判别准则及评价体系[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(5): 109-117. (Zuo Qiting, Zhong Tao, Zhang Zhizhuo, et al. Discriminant criteria and evaluation system of high-quality development of water conservancy[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2022,33(5): 109-117. (in Chinese))

[2] 李宁,倪翠娟,李家昕. 中国式现代化视域下中国共产党的治水思路演进及启示[J]. 水利经济,2025,43(2): 1-10. (Li Ning, Ni Cuijuan, Li Jiaxin. Evolution and enlightenment of the Communist Party of China water management ideas from the perspective of Chinese modernization [J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(2): 1-10. (in Chinese))

[3] Wang Xuanxuan,Chen Yaning,Li Zhi,et al. Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia [J]. Agricultural Water Management,2020,240:106297.

[4] Bahramifard A,Zibaei M. Integrated assessment of water security in D-8 countries [J]. Heliyon, 2024, 10 (21) :

e39781.

[5] Zakeri M A ,Mirmia S K,Moradi H. Assessment of water security in the large watersheds of Iran[J]. Environmental Science & Policy,2022,127:31-37.

[6] Yuan Liang,Zhou Zhijie,He Weijun,et al. A fuzzy logic approach within the DPSIR framework to address the inherent uncertainty and complexity of water security assessments [J]. Ecological Indicators, 2025, 170: 112984.

[7] Wang Xuanxuan,Cui Buli, Chen Yaning, et al. Dynamic changes in water resources and comprehensive assessment of water resource utilization efficiency in the Aral Sea Basin, Central Asia [J]. Journal of Environmental Management,2024,353:120198.

[8] Wang Guansu, Kumar S, Huang Zhihong, et al. Water resource management and policy evaluation in Middle Eastern countries: achieving sustainable development goal 6 [J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 320: 100829.

[9] 张欣,张保祥,李冰,等. 基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023,21(1): 95-106. (Zhang Xin,Zhang Baoxiang, Li Bing,et al. Evaluation and application of regional water saving based on water quota [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(1): 95-106. (in Chinese))

[10] 汪倩,陈军飞. 南水北调工程通水对受水区水资源集约利用效率的影响:基于河南省市级层面的实证[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(6): 155-164. (Wang Qian,Chen Junfei. Impact of water supply of South-to-North Water Transfer Project on the intensive utilization efficiency of water resources in the water receiving area:an empirical analysis at the municipal level of Henan Province [J]. China Population Resources and Environment,2022,32(6):155-164. (in Chinese))

[11] Wan Daiji, Liu Jiping, Ma Hanxing. Temporal-spatial variation characteristics of utilization efficiency of water resources in Changbai Mountain area[J]. Desalination and Water Treatment,2022,276:1-12.

[12] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究[J]. 水利经济,2024,42(6): 43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(6): 43-49. (in Chinese))

[13] Ji Yihu,Zuo Qiting,Zhao Chenguang,et al. Measurement and decomposition of green water resource utilization efficiency across multiple water use sectors in China: a perspective on water-saving potential [J]. Environmental Impact Assessment Review,2025,112:107806.

- [14] 赵业馨,仇蕾,许长新. 苏皖两省水资源利用效率的时空分异研究[J]. 水利经济,2024,42(3):36-44. (Zhao Yexin, Qiu Lei, Xu Changxin. Spatial and temporal differentiation of water resources use efficiency in Jiangsu Province and Anhui Province[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(3):36-44. (in Chinese))
- [15] Xu Yue, Yang Li, Sun Keyu, et al. Synergistic security relationships and risk measurement of water resources-social economy-ecological environment in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Ecological Indicators, 2025, 175: 113512.
- [16] 刘佳,付鹏举,林春艳,等. 黄河流域水资源节约集约水平的测度、时空差异及收敛性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(9): 20-30. (Liu Jia, Fu Pengju, Lin Chunyan, et al. Measurement, spatiotemporal variation and convergence of water resource conservation and intensification in the Yellow River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(9): 20-30. (in Chinese))
- [17] 李跃红,蒋晓辉,张琳. 黄河流域水资源节约集约利用能力评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 731-741. (Li Yuehong, Jiang Xiaohui, Zhang Lin. Evaluation of conservation and intensive utilization capacity of water resources in Yellow River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 731-741. (in Chinese))
- [18] Zhang Jian, Zhang Chunling, Shi Wanli, et al. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 96-107.
- [19] Lv Cuimei, Li Shuang, Ling Minhua, et al. Assessment of water conservation and water intensification level based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 319: 100567.
- [20] 甘荣情,曾令武,陈媛,等. 黄河流域中下游城市水资源节约集约利用能力[J]. 环境科学, 2025, 46(5): 2816-2827. (Gan Rongqing, Zeng Lingwu, Chen Yuan, et al. Water resource conservation and intensive utilization capability of cities in the Middle and Lower reaches of the Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2025, 46(5): 2816-2827. (in Chinese))
- [21] 王红瑞,李一阳,杨亚锋,等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 18-25. (Wang Hongrui, Li Yiyang, Yang Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 18-25. (in Chinese))
- [22] 杨荣雪,洪梅,高媛媛,等. 区域水资源集约安全利用评价:以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(2): 218-223. (Yang Rongxue, Hong Mei, Gao Yuanyuan, et al. Intensive and safe utilization of regional water resources: case of Beijing [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(2): 218-223. (in Chinese))
- [23] 韩宇平,苏潇雅,曹润祥,等. 基于熵-云模型的我国水利高质量发展评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 26-33. (Han Yuping, Su Xiaoya, Cao Runxiang, et al. Evaluation of high-quality development of water conservancy in China based on entropy-cloud model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 26-33. (in Chinese))
- [24] 吴丹,陈江南. 协同治理视角下中国水治理效能的演变特征与贡献测量[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 268-277. (Wu Dan, Chen Jiangnan. Evolutionary characteristics and contribution measurement of China's water governance effectiveness from the perspective of collaborative governance [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 268-277. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 王敏,李云,刘莹莹,等. 中国式水治理现代化发展评估及时空特征[J]. 中国农村水利水电, 2024(5): 176-183. (Wang Min, Li Yun, Liu Yingying, et al. Evaluation and spatio-temporal characteristics of Chinese path to modernization of water governance [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(5): 176-183. (in Chinese))
- [27] 刘中会. 建立健全节水制度政策体系不断提升水资源集约节约安全利用水平[J]. 水利发展研究, 2022, 22(6): 21-24. (Liu Zhonghui. Improving policies and systems for water conservation for enhanced intensive and economical utilization of water resources [J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(6): 21-24. (in Chinese))
- [28] 于文轩,邵经纬. 流域水资源节约集约利用机制的完善:以《黄河保护法》为视角[J]. 水利发展研究, 2023, 23(3): 7-11. (Yu Wenxuan, Shao Jingwei. The improvement of conservation and utilization mechanism of Basin water resources: from the perspective of the Yellow River Protection Law [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(3): 7-11. (in Chinese))
- [29] 景晓栋,田贵良. 黄河流域最严格水资源保护利用制度的内涵解析、核心构成及实施路径[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 58-64. (Jing Xiaodong, Tian Guiliang. Connotation analysis, core composition and implementation pathways of strictest water resources protection and utilization system in the Yellow River Basin [J]. Water

- Resources Protection,2025,41(2):58-64. (in Chinese))
- [30] Wang Xiaoyan, Zhang Silong, Gao Chao, et al. Coupling coordination and driving mechanisms of water resources carrying capacity under the dynamic interaction of the water-social-economic-ecological environment system[J]. Science of the Total Environment,2024,920:171011.
- [31] 焦雯珺,李宇薇. 社会-生态系统框架研究综述:发展动态 研究方法与应用领域[J]. 生态学报,2024,44(20):8968-8983. (Jiao Wenjun, Li Yuwei. Reviewing the social-ecological systems framework: development dynamics, research approaches and application fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (20): 8968-8983. (in Chinese))
- [32] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统[J]. 生态学报,1984,4(1):1-9. (Ma Shijun, Wang Rusong. The social-economic-natural complex ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica,1984,4(1):1-9. (in Chinese))
- [33] 赵景柱. 社会-经济-自然复合生态系统持续发展评价指标的理论研究[J]. 生态学报,1995,15(3):327-330. (Zhao Jingzhu. Theoretical analysis on the measurement of sustainable development of social-economic-natural complex ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, 15 (3):327-330. (in Chinese))
- [34] 吴建寨,张红凤. 社会-经济-自然复合生态系统协调发展实证研究[J]. 经济理论与经济管理,2009(12):13-17. (Wu Jianzhai, Zhang Hongfeng. The empirical research on the coordinated development of socio-economic-natural complex ecosystem [J]. Economic Theory and Business Management,2009(12):13-17. (in Chinese))
- [35] Wang Rusong, Li Feng, Hu Dan, et al. Understanding eco-complexity: Social-Economic-Natural Complex Ecosystem approach[J]. Ecological Complexity,2011,8(1):15-29.
- [36] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems [J]. Science, 2009, 325 (5939):419-422.
- [37] Wang Yixu, Gong Jie, Yang Zhihui, et al. Social-ecological system research in a changing world: state of the art and future challenges [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,489:144725
- [38] 李治涛,高文程,魏贤达,等. 中国城市生活用水效率及收入、价格弹性评估[J]. 中国农村水利水电,2021(7):202-208. (Li Zhitao, Gao Wencheng, Wei Xianda, et al. Evaluation of the efficiency of Chinese cities' urban domestic water consumption and its income and price elasticity[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(7):202-208. (in Chinese))
- [39] 邓淇中,张玲. 长江经济带水资源绿色效率时空演变特征及其影响因素[J]. 资源科学,2022,44(2):247-260. (Deng Qizhong, Zhang Ling. Spatiotemporal pattern and influencing factors of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2022,44(2):247-260. (in Chinese))
- [40] 田贵良,盛雨,卢曦. 水权交易市场运行对试点地区水资源利用效率影响研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(6):146-155. (Tian Guiliang, Sheng Yu, Lu Xi. On the influence of water rights trading market operation on water resource use efficiency in pilot areas[J]. China Population Resources and Environment, 2020, 30 (6): 146-155. (in Chinese))
- [41] 慕云霄,程玉菲,王军德. 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):38-46. (Mu Yunxiao, Cheng Yufei, Wang Junde. Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (4):38-46. (in Chinese))
- [42] 陈艳萍,刘畅. 黄河流域水资源利用效率及其时空分异特征[J]. 统计与决策,2022,38(8):62-66. (Chen Yanping, Liu Chang. Water resource utilisation efficiency and its spatiotemporal variation characteristics in the Yellow River Basin [J]. Statistics & Decision, 2022, 38 (8):62-66. (in Chinese))
- [43] 赵炳南,栗晓玲,褚江东,等. 中国水资源消耗与产业结构升级的动态解耦关系[J]. 水资源保护,2026,42(2):209-217. (Zhao Bingnan, Su Xiaoling, Chu Jiangdong, et al. Dynamic decoupling relationship between water resources consumption and industrial structure upgrading in China [J]. Water Resources Protection, 2026,42(2):209-217. (in Chinese))
- [44] 马海良,向慧伶,庞庆华. 新质生产力发展对中国水资源利用效率的影响[J]. 资源科学,2025,47(3):485-500. (Ma Hailiang, Xiang Huiling, Pang Qinghua. The impact of new quality productivity development on water resource utilization efficiency in China [J]. Resources Science,2025,47(3):485-500. (in Chinese))
- [45] 黄文佳,杨柏寒. 新安江流域生态补偿政策对绿色水资源利用效率的影响[J]. 长江流域资源与环境,2024,33(9):1969-1981. (Huang Wenjia, Yang Bohan. Ecological compensation policy of Xin'an River Basin on efficiency of green water resources utilization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33 (9): 1969-1981. (in Chinese))
- [46] 田贵良,高廷艳. 税费改革对高耗水行业水资源利用效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(9):143-150. (Tian Guiliang, Gao Tingyan. Impact of tax reform on water resource utilization efficiency in water-intensive industries[J]. China Population, Resources and Environment,2022,32(9):143-150. (in Chinese))

(下转第55页)

Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health,2007,34(1):46-50. (in Chinese))

[23] Wu Y, Chen H, Lu Y, et al. The dominant mechanisms of nutrient cycling in high-dam reservoirs: retention, transport or transformation? [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(12): 124024.

[24] Zheng Xuerui, Shen Zhenzhong, Wang Zhenhong, et al. Improvement and verification of one-dimensional numerical algorithm for reservoir water temperature at the front of dams[J]. Applied Sciences,2022,12(12):5870.

[25] 龙良红,王博文,黄宇波,等. 丹江口水库典型支流库湾水环境状况改善的整流幕设计与应用[J/OL]. 水资源保护, (2025-05-20). <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1454.006>. (Long Lianghong, Wang Bowen, Huang Yubo, et al. Design and application of rectifying curtain for improving water environment in typical tributary bays of Danjiangkou Reservoir[J/OL]. Water Resources Protection, (2025-05-20). <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1454.006>. (in Chinese))

[26] 彭为,刘丙军,邱江潮,等. 基于优先保护鱼类识别的澜沧江中下游生态流量[J]. 中山大学学报(自然科学版),2020,59(3):43-50. (Peng Wei, Liu Bingjun, Qiu Jiangchao, et al. The ecological flow of the Middle and Lower reaches of the Lancang River based on priority protection fishes identification [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2020,59(3):43-50. (in Chinese))

[27] 洪迎新,刘东升,马宏海,等. 澜沧江梯级开发下鱼类支流生境替代效果[J]. 生态学报,2022,42(8):3191-3205. (Hong Yingxin, Liu Dongsheng, Ma Honghai, et al. Effects of fish habitat substitution in tributaries under the cascade hydropower development of Lancang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3191-3205. (in Chinese))

[28] 王海龙,陈豪,肖海斌,等. 糯扎渡水电站进水口叠梁门分层取水设施运行方式研究[J]. 水电能源科学,2015,33(10):79-83. (Wang Hailong, Chen Hao, Xiao Haibin, et al. Study on operating method of multi-level intake structure with stoplog gate of Nuozhadu hydropower station [J]. Water Resources and Power,2015,33(10):79-83. (in Chinese))

[29] 纪道斌,成再强,龙良红,等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护,2022,38(3):34-42. (Ji Daobin, Cheng Zaiqiang, Long Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. Water Resources Protection,2022,38(3):34-42. (in Chinese))

[30] 曹俊,张晓敏,朱迪,等. 基于机器学习模型的长江上游典型产漂流性卵鱼类自然繁殖与环境特征关系研究[J]. 水资源保护,2025,41(6):251-258. (Cao Jun, Zhang Xiaomin, Zhu Di, et al. Research on relationship between natural reproduction of typical producing semi-buoyant eggs fish in Upper reaches of the Yangtze River and environmental characteristics based on machine learning models[J]. Water Resources Protection,2025,41(6):251-258. (in Chinese))

[31] 惠二青,毛劲乔,戴会超. 上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):44-48. (Hui Erqing, Mao Jingqiao, Dai Huichao. Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):44-48. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-18 编辑:王芳)

(上接第46页)

[47] 吴丹,潘朱玲. 京津冀科技创新水平对水资源利用效率的影响效应及贡献[J]. 水资源保护,2024,40(4):65-72. (Wu Dan, Pan Zhuling. Impact and contribution of technology innovation level on water use efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection,2024,40(4):65-72. (in Chinese))

[48] 刘晓君,闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究[J]. 水资源保护,2016,32(6):32-38. (Liu Xiaojun, Yan Lizhen. Research on water resources utilization efficiency and factors in western China based on data envelopment model [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):32-38. (in Chinese))

[49] 张修宇,康惠泽,李颖博. 人民胜利渠灌区水资源节约集约利用评价研究[J]. 人民黄河,2023,45(11):81-85. (Zhang Xiuyu, Kang Huize, Li Yingbo. Research on the evaluation of water resources conservation and intensive utilization in the people's victory canal irrigation area [J]. Yellow River, 2023, 45(11): 81-85. (in Chinese))

(收稿日期:2025-11-05 编辑:王芳)