

李昕妍, 朱永楠, 程鹏, 等. 用水效率频谱构建及其时空变化: 以中国四大经济分区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 79-89. LI X Y, ZHU Y N, CHENG P, et al. The construction of water use efficiency frequency spectrum and its temporal and spatial variation analysis: Taking the four economic regions in China as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 79-89. (in Chinese)

用水效率频谱构建及其时空变化

——以中国四大经济分区为例

李昕妍¹, 朱永楠¹, 程鹏², 何凡¹, 何国华¹, 李激¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 石家庄市水资源综合服务中心, 石家庄 050011)

摘要: 构建直观、可解释、可比较的用水效率评价方法, 是科学分析用水效率与经济社会发展规律的有效手段。构建经济社会发展与综合、农业、工业、生活用水效率拟合曲线及用水效率频谱的方法, 以我国的 31 个省级行政区为例, 绘制综合及分产业用水效率频谱图, 分析四大经济分区用水效率时空变化规律及其驱动因素。结果显示: 2010—2022 年综合以及工业用水效率提升明显, 频谱拟合呈现明显的用水效率、经济效益协同发展趋势; 农业及生活用水量与效益拟合曲线表现为正相关关系。通过产业用水效率综合比较, 识别四大经济分区用水效率提升的重点产业和环节, 提出效率效益协同发展的建议, 为节水管理和经济社会高质量发展提供支撑。

关键词: 用水效率; 经济; 频谱; 时空变化; 节约用水

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2025.0008

我国水资源时空分布不均^[1-4], 正常年份缺水量达 500 亿 m³^[5-6] (“十三五”期间)。合理评价水资源利用效率、优化水资源利用结构、坚持推进节水控水工作是适应水资源紧缺形势、平衡水资源供需与经济发展关系的重要方法, 也是水资源保护及节水管理的重要任务之一。

用水效率是水资源领域关注的焦点问题之一, 提高用水效率是合理开发利用水资源的重要举措。国外对于用水效率的研究开展已久: Omnezzine 等^[7]、Speelman 等^[8] 分别利用了 SFA 模型以及 DEA 全要素生产模型对用水效率进行了测量; Kaneko 等^[9]、Emilie 等^[10] 通过随机前沿分析方法衡量农业生产技术以及用水效率; Sahin 等^[11] 通过水资源供需变化分析了水资源、经济、人口等因素对用水效率的影响; Carvalho 等^[12] 运用随机前沿分析方法研究了水部门的效率和规模经济的问题;

Callejas 等^[13] 整合了影响用水的环境和行为因素, 研究用水效率背后的人类用水行为。国内学者针对中国各地区^[14-17]、各产业^[18-21] 用水效率也开展了多方面研究。用水效率评价是分析比较地区、产业水资源利用有效性、合理性和节水成效的重要手段。指标评价法通常基于综合或产业用水效率指标或参数形成指标体系, 广泛应用于节水型社会、城市节水等评价及管理工作中。指标评价方法多以等级的形式对研究地区的用水效率进行评价, 结果以数值型量化表达为主, 计算结果的主观性较强^[22], 对于用水效率变化趋势的直观表示程度较弱。在数值模拟方面, Wang 等^[23] 采用随机前沿分析模型量化测度了中国农业用水效率, 李可柏等^[24] 运用数据包络分析法和莫兰指数模型测算了 2015—2020 年我国的 31 个省份用水效率及其动态变化情况和时空分布格局。通过评价模型可

收稿日期: 2024-05-09 修回日期: 2024-11-10 网络出版时间: 2024-11-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241129.0939.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009141; 52109042); 中国工程院院地合作项目(2023NMZA-01)

作者简介: 李昕妍(1999—), 女, 河北唐山人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lxinyan12@163.com

通信作者: 朱永楠(1985—), 女, 北京人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhyn@iwhr.com

进行更深入的分析研究,然而模型构建对用户要求较高且需要大量的数据支撑,用水效率指标的欠缺以及影响参数的不确定性会直接影响模型的构建以及精确度^[25],对分析结果造成影响。构建直观、可解释、可比较的用水效率评价方法是深化节水控水工作的有效途径,频谱分析是将信号或数据分解研究频谱特性的一种方法,具有化繁为简、直观明确的特点,常用于通信^[26]、机械^[27]等领域。在水资源领域,频谱分析能帮助我们深入理解水资源时间序列数据,揭示用水效率和用水量随时间的变化规律^[28]。国外学者充分利用遥感等现代科技手段,对大范围区域的水资源利用情况进行快速、准确的监测,同时通过与经济学、生态学、环境科学等相关领域的跨学科合作与交流拓宽研究视野、汲取先进理念和方法,从而推动用水效率频谱研究的全面、深入发展。Jaramillo 等^[29]基于 859 个水文流域的水文气候数据,发现至少 74% 的流域需要土地和水资源利用、储水或水相的变化等景观驱动因素来解释陆地上的水变化。国内学者也进行了广泛的研究。徐洁等^[30]分析海绵城市水体污染负荷频谱,并进行污染生态修复,结果表明修复后水质得到明显改善。王晟等^[31]建立了适用于降雨、径流和污染事件的频谱分析方法,表明频谱分析可提供大量细节信息,表征水文特征的真实性更高。陈志军^[32]利用频谱分析法建立了山西大同地下水预预报模型,结果表明大同盆地该观测井附近地下水水位呈持续下降趋势。刘家宏等^[33]将频谱概念引入用水效率的研究中,选用伽马分布函数作为频谱分析的基础函数,通过频谱图以可视化形式揭示了中国区域水资源综合利用效率的演变趋势。伽马函数在水文统计中应用时,需要以参数符合约束条件为前提。实际用水效率受地区水资源紧缺程度、经济社会发展、气候等因素影响,变化规律并非都是有序的^[34],因此伽马函数在实际中的应用较为受限。未来,随着频谱分析理论的不完善和用水效率频谱构建方法的日益成熟,用水效率频谱将在水资源管理中发挥更为重要的作用。

为探索高效、直观的节水效率可视化比较分析方法,本研究将地理信息、用水效率、经济发展数据相结合,构建综合及分产业用水效率频谱拟合方法,以 2010—2022 年全国的 31 个省级行政区

为例,绘制全国用水综合效率及农业、工业、生活用水效率频谱曲线,分析各地区、各产业用水效率时空变化规律及其相互差异,识别四大经济分区用水低效环节,针对各地区用水差异特点提出节水优化建议,以期节水管理工作提供理论及方法支持。

1 研究方法

1.1 用水效率频谱构建

用水效率频谱的构建基于对不同区域、不同产业用水情况的深入分析和比较,其基本原理在于将复杂信号分解成不同频率成分的组合,从而能够更直观清晰地揭示信号的变化规律和特性。将频谱分析与传统评价指标相结合,可以形成一个更为完善、全面的用水效率分析体系。以 2010—2022 年全国各省综合、农业、工业、居民生活用水效率指标及经济指标为基础构建用水效率频谱,涉及社会、经济、资源及用水效率相关数据,其中水资源及用水效率数据来源于《中国水资源公报》,社会经济数据来源于《中国统计年鉴》《城乡建设统计年鉴》。

将用水效率区间进行步长划分,以用水效率区间内的省份数量作为“频”,用水效率效益拟合曲线作为“谱”,构建全国综合及农业、工业、居民生活用水效率频谱。由于不同地区、不同产业用水效率值存在较大差异,本研究中综合用水以及工业、居民生活用水效率值均以“10”为步长进行用水效率区间划分,农业用水效率以“100”为步长进行用水效率区间划分。为直观体现各地区实际用水效率,用水效率频谱图中同时绘制了各地区水资源利用效率与经济社会发展指标原始数据分布散点图。多个连续区间内数据点的疏密程度存在明显差异,将存在 70% 省份且用水效率散点密度最大的区间作为聚集区,表征效率指标集中分布的范围。根据各分区的用水效率数据,解析出不同用水效率及其对应的经济规模之间的关系,进而绘制出直观的用水效率频谱图,展示各分区的发展趋势,还能揭示区域内部用水效率的不均衡性。

以我国四大经济分区为例,进行用水效率频谱构建以及时空变化研究。依据国家统计局 2011 年颁布的《东西中部和东北地区划分方法》,将全国分为四大经济区域,分别为东部地区、西部地区、中部

地区和东北地区。东部地区包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆;中部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南;东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江。

1.2 用水效率曲线拟合方法

水是农业、工业生产和居民生活中不可或缺的资源,用水效率是评价水资源可持续发展以及经济社会高质量发展的关键指标^[35-36]。常用的用水效率评价指标包括水资源利用率、经济用水效率、单位产品用水量等,本研究选取万元 GDP 用水量、单位产品用水量、人均日生活用水量分别表征区域经济、农业、工业和生活用水效率。

频谱分析是指将信号做变换,从而在频域上进行分析^[37]。本研究参考频谱分析方法,选用万元 GDP 用水量为综合用水效率指标,表征平均创造 1 万元国内生产总值所消耗的水资源量;人均 GDP 为综合经济效益指标,表征国家或地区在一年内平均的经济发展水平,构建经济社会发展与综合用水效率的拟合曲线。首先根据两项指标绘制散点图进行适配线型筛选,深入剖析指标的分布、趋势、周期性以及可能存在的异常值特征,核心目的在于寻找一个能够最佳描述用水效率、经济效益关系的曲线,使拟合所得的曲线与原始观测数据之间的误差达到最小化。根据原始指标数据可以统计出峰值、谷值、拐点、周期等能够反映数据规律的关键信息,初步判断曲线的走势和类型,经分析综合用水效率、效益散点变化趋势符合指数函数拟合中的指数衰减型函数。再通过计算均值、方差、标准差等反映指标数据整体特性的指标,对所选拟合线型进行验证,达到精细拟合。最后借助贝叶斯优化多项式拟合公式,优化调整本研究中的相关系数,确定最佳参数值。拟合公式为

$$y_i = y_0 + A \times [1 - \exp(-Bx_i)] \quad (1)$$

式中: x_i 为 i 区域万元 GDP 用水量, m^3 ; y_i 为 i 区域人均 GDP, 万元; y_0 为偏移量, 指一个数据相对于基准位置的偏移距离, 用于降低拟合方差; A 为指前因子, 描述散点总体的振荡情况, 表示不同用水效率、经济指标构成的数据组整体的离散程度; B 表示衰减速率, 表示拟合过程的衰减程度快慢, 反映不同数据组的衰减幅度。用相关系数平方 R^2 表征 2 个变量之间的相关程度, 用来表示拟合程度优劣, R^2

取值范围为 0~1, 数值越接近 1 代表其相关程度越好^[38]。

与综合用水效率变化相比, 受区域产业细化类型和结构的影响, 产业用水效率数据更为离散, 选择公式通用性更强的乘幂函数进行拟合, 并借助 LINEST 函数进行相关参数计算, 通过牛顿迭代法以不断逼近的方式进行校核, 得到最佳拟合曲线。以各省逐年耕地实际灌溉亩均用水量、万元工业增加值用水量、人均日生活用水量分别表征农业、工业、居民生活用水效率; 以人均农业 GDP、人均工业 GDP、居民人均可支配收入分别表示经济社会系统发展变化, 构建产业发展与用水效率的拟合曲线, 拟合公式为

$$y_i = a \times x_i^b \quad (2)$$

式中: x_i 为 i 区域产业用水指标, $\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{d})$; y_i 为 i 区域产业经济指标, 万元, 其中第一产业(简称: 一产)人均 GDP、工业人均 GDP 分别以区域农业、工业就业人口计算; a 是拟合函数的系数, 表示函数的整体变化趋势; b 是拟合函数的指数, 表示函数图像的陡峭程度和增减趋势。幂函数的图像特征与指数 b 的正负有关: 当 $b > 0$ 时, 幂函数是单调递增的; 当 $b < 0$ 时, 幂函数是单调递减的。再通过系数 a 的调节, 针对产业用水效率不同的变化趋势进行拟合, 反映发展规律并优化拟合效果。

1.3 地理探测器

产业用水效率受到多重因素影响, 参考已有研究, 分别从社会因素、经济因素、技术因素以及资源禀赋 4 个层面^[39-42], 探究产业用水效率变化的主要驱动力。地理探测器是探测空间分异性、驱动力分析的有效统计学手段^[43]。本文基于地理探测器中的因子探测, 分析产业用水效率变化的驱动因素。表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{n \sigma^2} \quad (3)$$

式中: $h=1, 2, \dots, N_h, N$ 分别为自变量与全区的评价单元数; σ_h^2 表示层 h 的方差; σ^2 是全区域总方差; q 值表示因子 X 对属性 Y 的解释力, 其中, X 为各产业用水效率因子(表 1 中 A、B、C 指标), Y 为各产业用水效率水平, q 值取值范围是 $[0, 1]$, q 值越大说明因变量的空间分异越明显, 因变量和自变量的空间分布越一致, 自变量对因变量的解释力越强, 反之则越弱^[44]。

表 1 产业驱动因素指标

Tab. 1 Industrial driving factors index system

因素	农业	工业	生活
社会因素	农业就业人口/万人(A_1)	工业就业人口/万人(B_1)	用水人口/万人(C_1)
	农作物总播种面积/ 10^3 hm^2 (A_2)	规模以上工业企业单位数/个(B_2)	人口密度/(人 $\cdot\text{km}^{-2}$)(C_2)
经济因素	水价/元(A_3)	水价/元(B_3)	水价/元(C_3)
	一产增加值占比/%(A_4)	工业增加值占比/%(B_4)	第三产业增加值占比/%(C_4)
	一产人均GDP/万元(A_5)	工业人均GDP/万元(B_5)	居民人均可支配收入/万元(C_5)
技术因素	节水灌溉面积/ 10^3 hm^2 (A_6)	节水投资/万元(B_6)	节水投资/万元(C_6)
	农业机械总动力/万kW(A_7)	工业用水重复利用率/%(B_7)	再生水利用率/%(C_7)
资源禀赋	年降水量/mm(A_8)	年降水量/mm(B_8)	年降水量/mm(C_8)
	农业用水占比/%(A_9)	工业用水占比/%(B_9)	生活用水占比/%(C_9)

2 结果分析

2.1 综合用水效率变化分析

基于以上方法绘制了 2010—2022 年综合用水效率频谱簇反映年际变化总体规律(图 1)。可以看出,随着时间的发展中国综合用水效率以及经济效益整体均呈现提升的趋势,万元 GDP 用水量、人均 GDP 年均增幅分别为 5.2%、13.3%,截至 2022 年全国所有省份的万元 GDP 用水量已全部降低至 320 m^3 以下,其中 7 个省位于 $20\sim 30\text{ m}^3$,占全国 22.6%。为研究年际间具体变化,选取 2010 年、2016 年和 2022 年为代表年,绘制综合及分产业用水效率频谱平面图。

近年来,中国各分区综合用水效率均有显著提高(图 2),2022 年全国平均万元 GDP 用水量 49.6 m^3 ,比 2010 年下降 66.9%,与此同时,人均 GDP 稳步提高,2022 年全国人均 GDP 为 8.6 万元,比 2010 年增

加 178.2%。用水效率聚集区范围明显向高效率区间聚集,聚集区范围由 2010 年的 $24\sim 215\text{ m}^3$ 变化至 2022 年的 $21\sim 68\text{ m}^3$ 。综合用水与分产业用水相比曲线拟合程度更高,用水效率和经济效益同步发展趋势更明显。

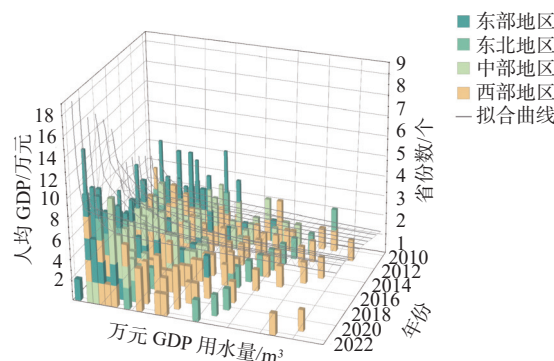


图 1 全国四大分区综合用水效率频谱簇

Fig. 1 Frequency spectrum cluster of comprehensive water use efficiency in the four major regions of China

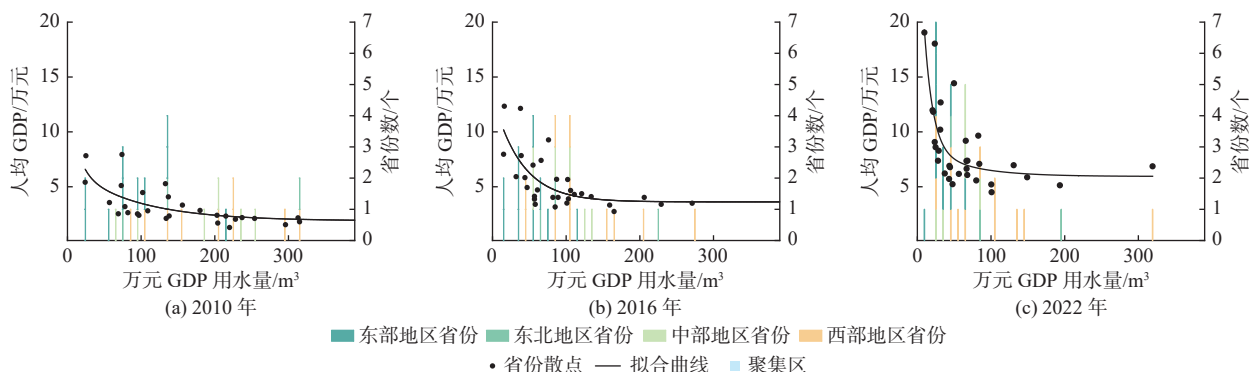


图 2 全国四大分区 3 个代表年份综合用水效率频谱

Fig. 2 Comprehensive water use efficiency spectrum in three representative years of the four major regions in China

东部地区综合用水效率较高,2022 年 90.0% 的东部省份处在用水效率聚集内,区域平均用水效率为 31.8 m^3 。西部地区用水效率以及效益提高幅度最大,区域平均万元 GDP 用水量由 2010 年 251.4 m^3

降低至 2022 年 75.4 m^3 ,年均降幅达 5.4%,同期区域人均 GDP 由 2.1 万元提升至 6.7 万元,年均增幅达 16.5%。但由于地理、气候及现状经济发展差异等原因^[45],西部地区综合用水效率不高,仅有 50.0% 的

省份处在用水效率聚集区内。东北地区 2022 年万元 GDP 用水量为 93.6 m^3 , 年均降幅为 5.1%, 与东部、中部、西部地区相比变幅较缓, 同期辽宁、吉林和黑龙江万元 GDP 用水量在全国分别排在第 13、23 和 30 位。

2.2 产业用水效率频谱分析

2.2.1 农业用水效率分析

2022 年全国耕地实际灌溉亩均用水量 364 m^3 ,

年均降幅为 1.3%, 同期一产人均 GDP 年均增幅 21.7%。农业灌溉用水受地区气候条件、资源禀赋、种植结构及方式等多重因素影响, 地区间用水效率及经济效益差异较大, 农业用水效率聚集区呈缓慢向高效区移动的变化趋势(图 3)。受产业结构、农产品类型差异影响, 省际间一产人均 GDP 差异较大, 农业用水效率曲线离散度较高。

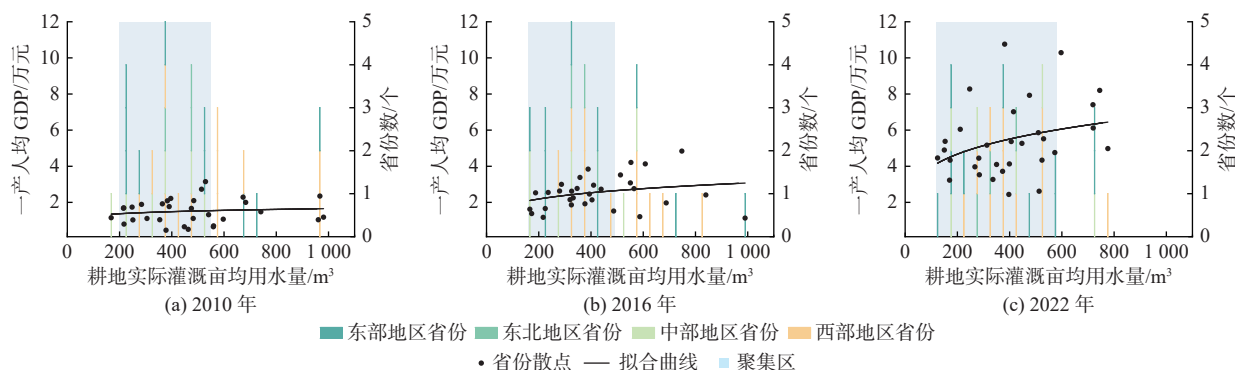


图 3 全国四大分区 3 个代表年份农业用水效率频谱

Fig. 3 Agricultural water use efficiency spectrum in three representative years of the four major sub-regions in China

东北地区农业用水效率提升最为明显, 2022 年区域耕地实际灌溉亩均用水量为 290 m^3 , 年均降幅为 1.9%。西部地区农业效益提升最明显, 2022 年区域人均农业 GDP 为 4.1 万元, 年均增幅为 32.8%; 同期农业用水效率也有大幅提升, 年均降幅为 1.4%, 但受气候、种植结构、技术水平等影响^[16], 西部地区农业用水效率及效益与东部省份相比仍相对较低。中部地区 2022 年耕地实际灌溉亩均用水量为 321 m^3 , 近年来年均用水效率变幅最小, 为 0.8%。2016—2022 年东部地区一产人均 GDP 增速较快, 年均增幅达 33.6%。山东、河南作为中国的粮食大省, 用水

效率长期位于国内领先地位, 2022 年耕地实际灌溉亩均用水量分别为 150 和 172 m^3 。

2.2.2 工业用水效率分析

近年中国工业节水成效显著, 2022 年万元工业增加值用水量为 24.0 m^3 , 年均降幅 5.6%。从用水效率频谱图(图 4)可明显看出, 工业用水效率显著向高效率、高效益区聚集, 聚集区范围由 2010 年 11~122 m^3 持续降至 2022 年 8~23 m^3 。同期全国工业人均 GDP 从 2010 年的 7.8 万元增加至 2022 年的 18.3 万元, 上升 10.4%。

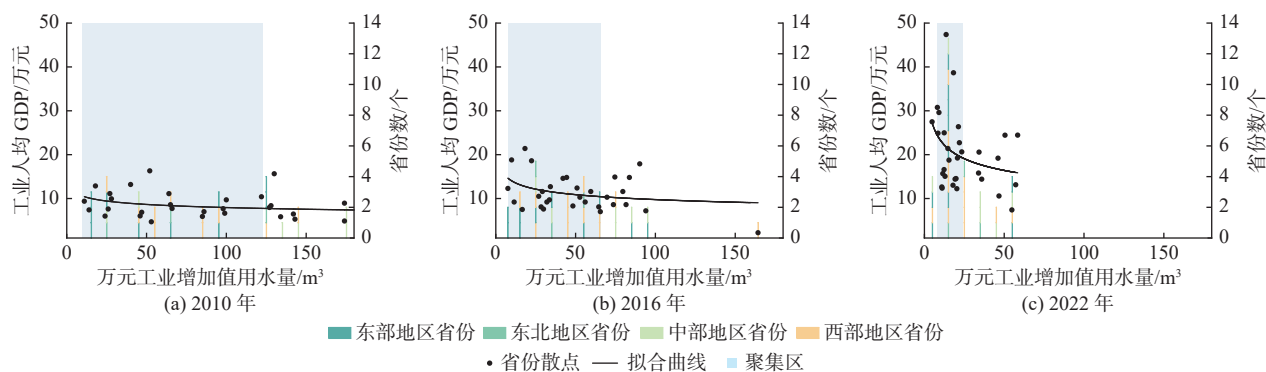


图 4 全国四大分区 3 个代表年份工业用水效率频谱

Fig. 4 Industrial water use efficiency spectrum in three representative years of the four major regions in China

工业用水受产品结构、产业发展需求、技术进步等方面因素影响^[46-47], 使地区间工业经济、用水效

率呈现差异化发展水平。东部地区工业用水效率持续领跑, 天津、北京、山东、河北长期处于全国工

业用水效率前十名。西部地区万元工业增加值用水量 2010—2022 年的年均降幅为 6.3%、工业人均 GDP 年均增幅 11.9%, 变化幅度最大。中部地区工业发展趋势较稳定, 但受产业结构单一、产业外向度偏低^[48] 等因素影响, 截至 2022 年, 万元工业增加值用水量比西部、东北、东部地区分别高 85.8%、56.2%、39.6%。

2.2.3 生活用水效率分析

近年来, 我国居民生活质量持续提升, 截至 2022 年居民人均可支配收入已增加至 3.7 万元, 年均增幅 16.0%。同时, 受经济社会、民生水平、气候等因素综合影响, 我国居民家庭和服务业用水量持续增加。2022 年全国人均日生活用水量为 176 L, 年均增幅 0.9%, 用水效率聚集区逐渐向高水量方向

移动(图 5), 聚集区由 2010 年的 78~170 L 变化为 2022 年的 103~208 L。

东部地区人均日生活用水量和居民人均可支配收入均高于其他区域, 2022 年分别为 191 L 和 4.7 万元。受水资源本底条件等因素影响, 东部地区内各省份生活用水效率呈现明显的地域差异, 河北、山东等长期处于低用水区间, 如河北 2022 年人均日生活用水量仅为 103 L, 生活用水效率排名全国第一; 上海、广东等则位于高用水区间, 如 2022 年上海人均日生活用水量为 263 L, 远高于全国其他省份。与东部地区相比, 中部地区生活用水效率变幅相对较快, 年均增幅为 1.4%, 东北地区变幅相对较慢, 年均增幅为 0.3%。西部地区居民人均可支配收入增幅最大, 年均增幅为 16.7%。

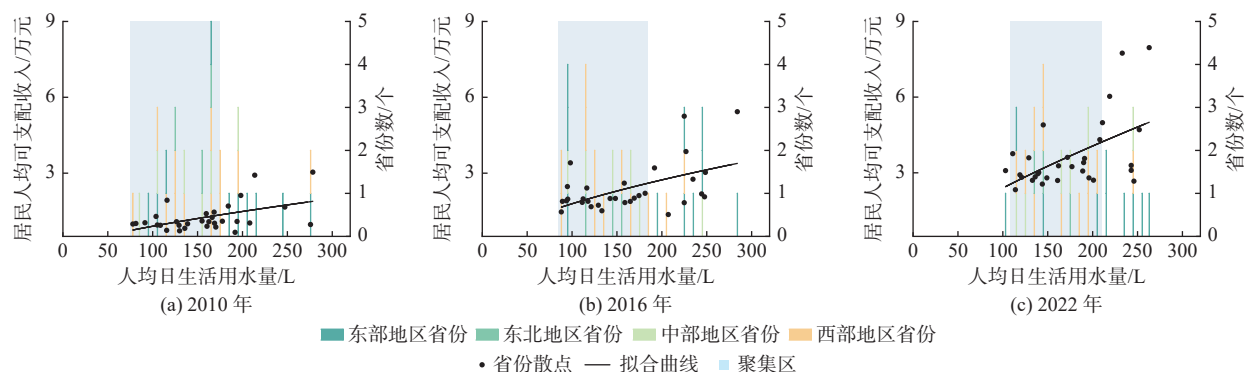


图 5 全国四大分区 3 个代表年份生活用水效率频谱

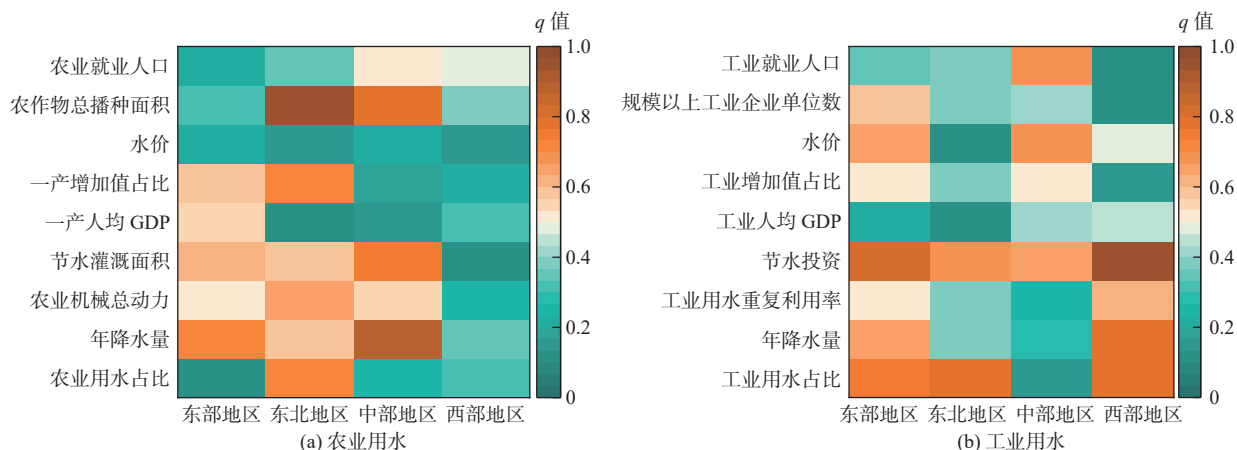
Fig. 5 Domestic water use efficiency spectrum in three representative years of the four major regions in China

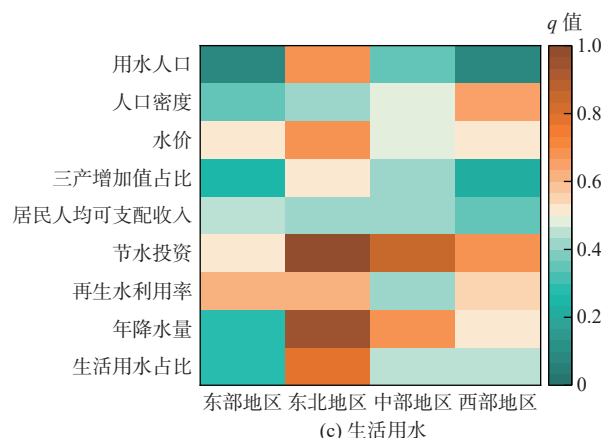
2.3 用水效率驱动力分析

首先运用自然断点法对原始数据中的连续性因子进行离散化和类别化处理, 再使用地理探测器得到各驱动因子对产业用水效率解释程度的 q 值, 当 q 值大于 0.6 时为强关联因素^[49]。

全国农业用水效率变化主要受社会、技术和资

源禀赋影响, 其中年降水量和节水灌溉面积是主要的驱动因素, 驱动因子解释力 q 分别为 0.63 和 0.52[图 6(a)]。分地区来看, 农业机械总动力对东北地区的驱动较为显著, 驱动因子解释力 q 为 0.67; 所有因子对西部地区的解释力 q 均小于 0.5, 驱动程度相对较弱。



图6 全国四大分区产业用水效率驱动因子解释力 q 值对比Fig. 6 Water use efficiency driving factor q value comparison chart in the four major regions of China

工业、生活用水效率主要受技术和经济因素影响[图6(b)、4(c)],节水投资驱动因子解释力 q 最大,分别为0.78和0.76,特别是在东部、西部地区,节水投资驱动因子对工业用水效率的解释力 q 达0.81和0.96;各驱动因子对于东北、中部地区解释力并不显著。生活用水效率驱动程度中,节水投资对东部、中部地区表现最明显,解释力 q 分别为0.97、0.85,其次再生水利用率也表现出较强的驱动作用,各因子对于东部地区驱动相对较弱。

3 讨论

3.1 我国用水效率与国际现状对比

从国际视角分析我国用水效率现状,与全球主要国家,特别是发达国家用水效率进行比较。依据联合国粮农组织 AQUASTAT 水信息系统数据^[50],以目前最新的2021年全球主要国家用水数据进行比较。

综合用水效率方面,高收入国家平均万元GDP用水量为 24.1 m^3 ,中高等收入国家平均为 84.9 m^3 。中国万元GDP用水量为 51.8 m^3 ,在发展中国家排名较为靠前,但与发达国家相比仍有一定差距,是加拿大的1.7倍、日本的2.0倍、德国的5.2倍、英国的11.7倍、新加坡的25.0倍。中国灌溉水有效利用系数0.568,意大利、法国均在0.700以上,以色列甚至达到0.900以上;工业用水效率与德国相当,是澳大利亚的1.8倍、新加坡的3.8倍;服务业用水效率与希腊、土耳其相当,是日本、德国的2.5倍、新加坡的9.7倍。总体来看,近年来中国用水效率和效益大幅提升,北京、天津、浙江等地综合用水效率已优于高收入国家平均水平,全国平均用水效率总体处于国际平均水平。

在国家“节水优先”背景下,仍需深入实施国家节水行动和全面节约战略,以水资源可持续利用支撑经济社会高质量发展。微观技术层面主要聚焦于个体或局部范围内的节水实践,可借鉴灌区精准输配、淡水资源替代、节水器具推广^[51-53]等技术,通过节水工程技术和节水监督管理提高用水效率;宏观层面仍需优化产业结构、推动非常规水替代、贯彻落实“四水四定”^[54-56]等,形成全社会的节水合力。当前我国积极发展数字化节水,利用信息流和业务流的整合融合来提升水资源功效^[57-58],实现透明、科学、智慧节水,推动用水效率以及经济效益的协调发展。

3.2 分区用水效率综合比较及建议

整体来看,近年来我国综合用水效率不断提升,特别是工业用水效率呈显著提高趋势,受经济发展、产业结构升级、技术进步等因素影响^[59-60],各产业用水效率以及各分区用水效率仍存在一定差异。

从频谱拟合变化趋势来看,综合用水效率以及效益的拟合程度较稳定,分产业用水效率以及经济效益的拟合程度随时间发展逐渐变好。综合用水以及工业用水效率频谱图表现出明显的效率、效益协同发展趋势,其中97.0%的省份综合用水效率以及对应效益同步增长、全部省份的工业用水效率以及效益均同步增长。农业、生活用水效率的年均变化率为-1.3%、0.9%,经济效率年均增长率则分别为21.7%、16.0%。基于脱钩理论^[61],农业用水效率与经济效益处于强脱钩状态,生活用水效率以及效益处于弱脱钩状态。

从各分区变化来看,东部地区人均日生活用水量为各分区中的最大值,通过分析我国生活用水量的数据发现,2010—2022年东部生活用水量整体呈

持续上升的趋势,且东部地区经济持续高速发展,随着生活水平的提高,人们对生活舒适度的要求也随之提升,预计东部生活用水仍将保持一定时期的增长^[62]。东北地区农业用水效率提升幅度最大,农业耕地实际灌溉亩均用水量年均降幅为 1.9%,但同期农业效益增幅较低,一产人均 GDP 年均增幅仅为全国均值的 46.6%。中部地区作为中国的粮食主产区,农业用水量相对较大,尽管农业资源丰富,但在工业用水方面,由于部分老旧设备和工艺的存在,以及水资源管理上的不足,其工业用水效率低下,2022 年区域平均工业增加值用水量为 33.8 m³,比全国平均值高 40.6%。西部地区综合经济增幅最大,年均增速 16.5%,同期工业用水效率提升幅度最大,其中贵州、重庆工业增加值用水量年均降幅全国最大,分别为 7.0%、6.7%,工业增加值用水量年均降幅为 6.3%。

影响各分区用水效率的因素是多方面的、复杂的,基于用水效率变化及驱动力分析,可以从政策、技术、经济、社会等多个层面形成合力、综合施策,现提出以下建议:东部地区应侧重提升生活用水效率,通过主动调控的方式推动生活节水提效,提高公众节水、水资源保护和循环利用意识,加强节水器具的推广应用,促进节约用水。西部地区农业用水效率是提升的重点,建议推动产业结构优化升级,科学调整种植结构、深度节水控水,实现高质量发展。中部地区、东北地区建议侧重提升工业用水效率,针对各省特色设定严格的用水定额和超标管理措施,建立健全的水权交易制度、水资源税制度等,利用市场力量优化水资源配置,深入挖掘节水潜力,促进效率效益协同发展。

4 结论

本文提出经济社会发展与用水效率频谱拟合方法,通过构建用水效率频谱图分析 2010—2022 年我国各分区综合及分产业用水效率与经济变化的时空变化规律与差异,得出以下结论:

受社会、技术和资源禀赋等驱动因素影响,我国各分区综合、工业用水呈现向高效率、高效益方向发展的趋势,万元 GDP 用水量、人均 GDP 年均增幅分别为 5.2%、13.3%;工业增加值用水量、人均工业 GDP 年均增幅分别为 5.6%、10.4%,用水效率、经济效益协同发展的程度逐渐提升。

农业及生活用水量与效益拟合曲线表现为正相

关关系,其中耕地实际灌溉亩均用水量向降低的趋势发展,全国年均降幅为 1.3%;人均日生活用水量呈小幅增加,年均增幅为 0.9%。

东部地区综合用水效率、效益领先,但生活用水量较大,西部地区用水效率、效益增速较快,但农业用水量仍较大,中部地区工业用水量较大。东部人均日生活用水量、西部耕地实际灌溉亩均用水量、中部万元工业增加值用水量 2022 年区域均值分别为 191 L、422.1 m³、33.9 m³。东北地区经济效益增幅较低,人均 GDP 年均增幅为 9.9%。

基于各分区用水效率频谱分析,针对各地区特点提出深入挖掘节水潜力、提升用水效率的优化建议,以期水资源节约高效利用提供技术方法。

参考文献:

- [1] 李国英. 深入贯彻新发展理念推进水资源集约安全利用 [N]. 人民日报, 2021-03-22(10). DOI: 10.28655/n.cnki.nrmrb.2021.002834.
- [2] 贺玉晓, 苏小婉, 任玉芬, 等. 中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7464-7478. DOI: 10.5846/stxb201909252010.
- [3] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战 [J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617. DOI: 10.11821/dlxb202307003.
- [4] 王浩, 李海红, 赵勇, 等. 落实新发展理念推进水资源高效利用 [J]. 中国水利, 2021(6): 49-51.
- [5] 国家发展改革委、水利部联合印发《国家节水行动方案》[J]. 中国水利, 2019(8): 4.
- [6] 高甜, 杨肖丽, 任立良, 等. 基于 SBM-GWR 模型的中国省际用水效率及其影响因素分析 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 34-37.
- [7] OMEZZINE A, ZAIBET L. Management of modern irrigation systems in oman: Allocative vs. irrigation efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 37(2): 99-107. DOI: 10.1016/S0378-3774(98)00045-6.
- [8] SPEELMAN S, D'HAESE M F C, BUYASSE J, et al. Technical efficiency of water use and its determinants, study at efficiencies in small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa[C]//106th Seminar, October 25-27, 2007, Montpellier, France. European Association of Agricultural Economists, 2007.
- [9] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T, et al. Water efficiency of agricultural production in China: Regional comparison from 1999 to 2002[J]. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 2004, 3(3-4). DOI: 10.1504/IJARGE.2004.006038.

- [10] EMILIE W, CHRIS S. Less water in agriculture? Potential and challenges in optimizing water use efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2024(13): 13. DOI: 10.1093/jxb/erae227.
- [11] SAHIN O, STEWART R A, HELFER F. Bridging the water supply-demand gap in Australia: Coupling water demand efficiency with rain-independent desalination supply[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(2): 253-272. DOI: 10.1007/s11269-014-0794-9.
- [12] CARVALHO P, MARQUES R C. Estimating size and scope economies in the Portuguese water sector using the Bayesian stochastic frontier analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 574-586. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.169.
- [13] CALLEJAS D, PANDE S, RIETVELD L C. Water use efficiency: A review of contextual and behavioral factors[J]. *Frontiers in Water*, 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.685650.
- [14] 詹力伟, 朱永楠, 赵勇, 等. 南水北调受水区生活用水影响因素与节水潜力[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 56-64. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0007.
- [15] 汪紫薇, 董四方, 王文鹏, 等. 长江经济带典型城市用水效率变化特征分析[J]. *地下水*, 2020, 42(5): 112-116. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2020-05-033.
- [16] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 36-42. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0003.
- [17] 师林蕊, 朱永楠, 李海红, 等. 北京居民用水调查及节水潜力[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 851-861. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0086.
- [18] 尚杰, 于浩然, 杨旭. 农业用水效率时空差异与影响因素分析[J]. *中国农业科技导报*, 2022, 24(3): 11-19. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2021.0346.
- [19] 李珊, 张玲玲, 丁雪丽, 等. 中国各省区工业用水效率影响因素的空间分异[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11): 2539-2552. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj.201911001.
- [20] 姚园, 李海红, 李激, 等. 基于脱钩指数和LMDI的第三产业用水发展研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(1): 71-81. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2024.01.09.
- [21] 赵勇, 朱永楠, 师林蕊, 等. 中国居民家庭生活用水十点规律与认识[J]. *中国水利*, 2024(4): 27-33.
- [22] 唐小婧. 浑河流域水生生态安全状况与安全驱动机制分析[J]. *水土保持应用技术*, 2024(1): 26-28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5366.2024.01.11.
- [23] WANG F T, YU C, XIONG L C, et al. How can agricultural water use efficiency be promoted in China? A spatial-temporal analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 411-418. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.03.017.
- [24] 李可柏, 陶军, 卢慧. 中国水资源利用效率评价及空间集聚分析[J]. *人民黄河*, 2023, 45(9): 96-103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.09.017.
- [25] 何卿姮. 基于SWAT模型的南流江流域上游段土地利用变化及农业面源污染响应研究[D]. 广西: 广西大学, 2023. DOI: 10.27034/d.cnki.ggxu.2022.001583.
- [26] 郭铁梁, 李志军, 张文祥. 基于希尔伯特变换的带通信号包络频谱分析及Matlab仿真[J]. *高师理科学刊*, 2020, 40(8): 72-77.
- [27] 程秀芳, 王鹏. 基于时域和频域分析的滚动轴承故障诊断[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 58-64.
- [28] 吴骏. 调压井水压监测系统频谱分析实现[C]//全国大坝安全监测技术信息网全网大会暨学术流研讨. 全国大坝安全监测技术信息网, 2010.
- [29] JARAMILLO F, DESTOUNI G. Developing water change spectra and distinguishing change drivers worldwide[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8377-8386. DOI: 10.1002/2014GL061848.
- [30] 徐洁, 宋祥. 海绵城市水体污染负荷频谱分析与污染生态修复方法研究[J]. *环境科学与管理*, 2023, 48(12): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2023.12.016.
- [31] 王晟, 闵飞田. 海绵城市设施的降雨径流和污染负荷频谱分析方法[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(2): 204-211. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0203.
- [32] 陈志军. 频谱分析法在大同盆地地下水水位动态预报中的应用[J]. *山西水土保持科技*, 2022(2): 15-16, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0120.2022.02.006.
- [33] 刘家宏, 邵薇薇, 王浩, 等. 水资源利用效率频谱分析方法及应用[J]. *水利水运工程学报*, 2019(6): 132-138. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.06.016.
- [34] 朱欢. 气候因素对农业用水效率影响的空间异质性分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2022.000745.
- [35] 邢霞, 修长百, 刘玉春. 黄河流域水资源利用效率与经济耦合协调关系研究[J]. *软科学*, 2020, 34(8): 44-50. DOI: 10.13956/j.ss.1001-8409.2020.08.08.
- [36] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 80-86. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.012.
- [37] 秦敏敏. 基于振动信号的滚动轴承故障诊断[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023. DOI: 10.27724/d.cn-

- ki.gnmkg.2022.000637.
- [38] 纪德洋, 金锋, 冬雷, 等. 基于皮尔逊相关系数的光伏电站数据修复 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1514-1522. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211172](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211172).
- [39] 孙克, 张信为, 聂坚, 等. 中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 102-110. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.013](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.013).
- [40] 何伟军, 孟旭, 孔阳, 等. 时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 215-223. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.026](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.026).
- [41] 李情情, 曹永强, 王菲, 等. 海河流域水-能-碳系统耦合协调发展及驱动因素研究 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(6): 20-31. DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2024062](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2024062).
- [42] 张京新, 谷雨鑫, 沈佳琦, 等. 黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析 [J/OL]. *环境科学*, 1-23[2024-11-12]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202401141>.
- [43] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. DOI: [10.11821/dlxb201701010](https://doi.org/10.11821/dlxb201701010).
- [44] 谭德明, 饶佳艺. 深圳市都市型滨水空间活力影响因素分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(4): 809-822. DOI: [10.12082/dqxxkx.2023.220508](https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2023.220508).
- [45] 徐智敏, 孙亚军, 高尚, 等. 干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 767-776. DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2018.6041](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2018.6041).
- [46] 郭丰源, 徐剑锋, 徐敏, 等. 我国工业用水现状、问题与节水对策 [J]. *环境保护*, 2022, 50(6): 58-63. DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.06.018](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.06.018).
- [47] 李海红, 袁令, 王丽珍, 等. 我国工业节水分析与推进建议 [J]. *中国水利*, 2020(19): 44-46. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2020.19.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2020.19.022).
- [48] 姚鹏, 张明志. 新中国 70 年中国中部地区工业发展: 历程、成就、问题与对策 [J]. *宏观质量研究*, 2019, 7(2): 103-113. DOI: [10.13948/j.cnki.hgzlyj.2019.02.005](https://doi.org/10.13948/j.cnki.hgzlyj.2019.02.005).
- [49] 薛选登, 范晓婕, 谢清华. 黄河流域农业水资源生态韧性与水效率耦合协调及驱动因素研究 [J]. *节水灌溉*, 2024(7): 62-74. DOI: [10.12396/jsgg.2023507](https://doi.org/10.12396/jsgg.2023507).
- [50] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析 [J]. *水利水电工程学报*, 2019(4): 31-41. DOI: [10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.04.005](https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.04.005).
- [51] 吴彩丽, 白美健, 张宝忠, 等. 基于水动力学模拟的灌区输配水系统优化调控模式研究 [J]. *节水灌溉*, 2023(4): 87-95. DOI: [10.12396/jsgg.2022335](https://doi.org/10.12396/jsgg.2022335).
- [52] 杨正勇, 高梦雨, 彭乐威. 中国淡水养殖业绿色水资源效率: 时空演化特征及脱钩趋势 [J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(1): 57-72. DOI: [10.7621/cjarrp.1005-9121.20240106](https://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20240106).
- [53] 翟光耀, 杨胜利, 万宾, 等. 北京市某区节水器具使用与节水意识调研分析 [J]. *给水排水*, 2022, 58(增刊 2): 328-332. DOI: [10.13789/j.cnki.wwel964.2022.10.10.0006](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwel964.2022.10.10.0006).
- [54] 王西琴, 贾宝珍, 姜智强, 等. 基于产业结构的区域水环境承载力优化方法与例证 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(5): 2652-2661. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230130.001](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230130.001).
- [55] 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 等. 中国非常规水资源开发利用进展 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(6): 960-969. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2020.06.015](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2020.06.015).
- [56] 王浩, 许新发, 成静清, 等. 水资源保护利用“四水四定”: 基本认知与关键技术体系 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 1-7. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.001](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.001).
- [57] 王爱杰, 许冬件, 钱志敏, 等. 我国智慧水务发展现状及趋势 [J]. *环境工程*, 2023, 41(9): 46-53. DOI: [10.13205/j.hjgc.202309006](https://doi.org/10.13205/j.hjgc.202309006).
- [58] 冶运涛, 蒋云钟, 曹引, 等. 以数字孪生水利为核心的智慧水利标准体系研究 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4): 1-16. DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2023040](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2023040).
- [59] YANG J, LIU X J, YING L M, et al. Correlation analysis of environmental treatment, sewage treatment and water supply efficiency in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135128. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135128](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135128).
- [60] 巩灿娟, 徐成龙, 张晓青. 黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素 [J]. *地理科学*, 2020, 40(11): 1930-1939. DOI: [10.13249/j.cnki.sgs.2020.11.018](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2020.11.018).
- [61] 聂志萍, 吴梦芝, 马海良. 基于 LMDI 和脱钩理论的我国生活用水影响因素研究 [J]. *水利经济*, 2019, 37(5): 11-15. DOI: [10.3880/j.issn.1003-9511.2019.05.003](https://doi.org/10.3880/j.issn.1003-9511.2019.05.003).
- [62] 韩勇, 杨倩楠, 李占斌, 等. 近 20 年中国供用水结构变化与政策调控 [J]. *水利规划与设计*, 2022(3): 5-10. DOI: [10.3969/j.issn.1672-2469.2022.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2469.2022.03.002).

The construction of water use efficiency frequency spectrum and its temporal and spatial variation analysis: Taking the four economic regions in China as an example

LI Xinyan¹, ZHU Yongnan¹, CHENG Peng², HE Fan¹, HE Guohua¹, LI Wei¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Shijiazhuang Water Resources Comprehensive Service Center, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: China is among one of the countries in the world with high degree of water stress due to its uneven distribution of water resources. Reasonable evaluation of water resources utilization efficiency is an important method to balance the relationship between supply and demand of water resources supply as well as economic development, and it is also one of the important tasks of water-saving management. Water use efficiency evaluation is an important means to analyze and compare the effectiveness, rationality and water saving effect of water resources utilization in regions and industries.

A comprehensive and sub-industry water use efficiency spectrum fitting method was constructed based on the combination of geographic information, water use efficiency and economic development data. The spectrum curves of comprehensive water use efficiency and water use efficiency of agriculture, industry and life in China were drawn by taking 31 provinces, autonomous regions and municipalities in the mainland of China from 2010 to 2022 as an example. The spatial and temporal variation rules of water use efficiency in various regions and industries along with their differences were analyzed. The main driving factors of water use efficiency changes were identified by geographic detectors, and water-saving optimization suggestions were put forward according to the characteristics of water use differences in various regions.

The results show that from the year 2010 to 2022, the comprehensive water use efficiency and benefit of 97.0% of the provinces showed a synergistic growth trend, and the fitting degree of water use efficiency and economic benefit of different industries gradually improved with time with the simultaneous increased benefits of all the provinces.

The increase of agricultural water use efficiency in Northeast China is the largest. The average annual decrease of water consumption per mu of actual irrigation of agricultural cultivated land is 1.9%, but the average annual increase of GDP per capita in the same period is only 46.6% of the national average. The comprehensive economic growth in the western region is the largest, with an average annual growth rate of 16.5%. The industrial water use efficiency also showed largest increase in the same period. The industrial added value water consumption in the western region has decreased by an average annual rate of 6.3% in the past 13 years. However, there is still a big gap between the agricultural water use efficiency and the eastern and central regions. The efficiency of industrial water use in the central region is low. The comprehensive water use efficiency and benefit in the eastern region continue to lead. The main driving factors for the change of agricultural water use efficiency in China are annual precipitation and water-saving irrigation area. The efficiency of industrial and domestic water use is most driven by water-saving investment.

The comprehensive and industrial water usage in each region of China is expected to continue developing towards greater efficiency and higher benefits. The level of coordinated development will gradually increase, with agricultural and domestic water consumption showing a positive correlation with benefits. In the eastern region, water use efficiency and benefits are leading, although domestic water consumption remains high. In the western region, both water use efficiency and benefits are rising rapidly, yet agricultural water consumption is still significant, along with industrial water consumption in the central region. Based on the above analysis, the optimization suggestions for further tapping the water-saving potential and improving the water use efficiency are put forward according to the characteristics of each region, which provided a technical method for the economical and efficient utilization of water resources.

Key words: water use efficiency; economy; frequency spectrum; temporal and spatial variation; water saving