

我国城市工业用水效率与经济发展水平的秩匹配度原理及特征解析

刘波¹, 张璐然¹, 王文鹏^{1,2}, 孙成文³, 董四方⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 211100;
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 4. 水利部节约用水促进中心, 北京 100038)

摘要:对现有基于数列的匹配度指标进行改进,提出了秩匹配度概念和计算方法,将匹配度内涵拓展为欠匹配、匹配、过匹配3种状态及高、中、低匹配3个层次,以更加全面地反映特征指标与影响因素的相对发展水平与匹配状况。采用秩匹配度分析了全国336个城市2017年工业用水效率与经济发展水平的匹配特征,结果表明:我国工业用水效率与经济发展水平呈匹配状态的城市占比为28.27%,全国各区域均有分布;高层次匹配的城市主要分布在北方地区,低层次匹配的城市主要分布于鄂、闽、桂等南方地区;呈过匹配状态的城市占比为36.31%,主要分布于华北、西北地区;呈欠匹配状态的城市占比为35.42%,主要分布在华中、东南等经济较发达、水资源较丰富的地区。

关键词:秩匹配度;工业用水效率;经济发展水平;匹配状态;匹配层次

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0064-08

Principle and characteristic analysis of rank matching degree between urban industrial water use efficiency and economic development level in China//LIU Bo¹, ZHANG Luran¹, WANG Wenpeng^{1,2}, SUN Chengwen³, DONG Sifang⁴
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 211100, China; 3. Shanghai Investigation Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China; 4. Water Conservation Promotion Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The existing matching degree index based on data sequences was improved, and the concept and calculation method of the rank matching degree were put forward. The connotation of matching degree was expanded to three states of under-matching, matching, and over-matching, along with three levels of matching hierarchy, i. e., high, medium, and low, so as to provide a more comprehensive assessment of the relative development level and matching state of characteristic indicators and influencing factors. The rank matching degree was employed to examine the matching characteristics between industrial water use efficiency (IWUE) and economic development level (EDL) across 336 cities in China in 2017. The findings indicate that cities in the matching state of IWUE and EDL constitute 28.27% of the total, and are distributed across China. Among cities in the matching state, high-level matching cities are mainly distributed in northern areas, and low-level matching cities are mainly distributed in southern areas, such as Hubei and Fujian provinces, as well as Guangxi Zhuang Autonomous Region. Cities in the over-matching state account for 36.31%, which are predominantly located in North China and Northwest China. The proportion of under-matching cities is 35.42%, which are primarily distributed in Central China, Southeast China, and other economically developed regions with abundant water resources.

Key words: rank matching degree; industrial water use efficiency; economic development level; matching state; matching hierarchy

工业是重要的用水部门之一,1978—2021年间,全国工业用水总量由523亿m³增长到1049.6亿m³。科学提高和有效管控工业用水效率对于提升水资源集约节约利用水平、有效缓解水资源

供需矛盾具有重要意义。2012年国务院出台《关于实行最严格水资源管理制度的意见》,确定了全国用水效率控制红线,并将万元工业增加值用水量作为评价工业用水效率的关键指标^[1]。“十三五”

基金项目:中央高校基本科研业务费专项经费资助项目(B220201028);江苏省水利科技项目(2022002)

作者简介:刘波(1980—),女,副教授,博士,主要从事水资源系统理论与可持续应用研究。E-mail:liubohu@hhu.edu.cn

通信作者:王文鹏(1983—),男,副研究员,博士,主要从事水文不确定性分析理论及应用研究。E-mail:wangwphhu@163.com

以来,全国万元工业增加值用水量从 2015 年的 58.3 m^3 下降至 2021 年的 28.2 m^3 ,工业用水效率明显提升。2022 年,国家六部门联合印发《工业水效提升行动计划》,提出到 2025 年全国万元工业增加值用水量较 2020 年下降 16%。由于我国在水资源禀赋、经济发展水平等方面的空间不均衡性,造成工业用水效率的省际、城际间差异显著^[2]。在城市尺度全面准确认识工业用水效率与经济发展水平的匹配特征,科学合理制定用水效率区域化控制目标,是实现“四水四定”,落实水资源高效可持续利用的关键问题之一。

我国学者对水资源与经济社会发展时空匹配状态的研究一直较为关注。关于水资源与经济发展系统匹配关系的研究,主要集中在以下方面:

a. 关于水资源禀赋、水资源利用量与经济发展要素间的匹配关系探讨。包括运用基尼系数、耦合协调度模型、不均衡指数等方法评估分析我国典型省^[3-4]、城市^[5]、一带一路^[6]等不同区域的水资源分布配置、水资源系统的安全与经济发展要素在时间和空间上的匹配规律;采用基于数列的匹配度计算方法、脱钩理论、Vehmas 脱钩指数法确定不同区域水资源利用与人口、GDP 的匹配度^[7]。

b. 关于水资源利用效率与经济发展间协调关系的探讨。借助耦合协调度模型和障碍度模型,从用水效率和经济发展两个维度构建评价指标体系,探究两个子系统之间的耦合协调关系及作用机理^[8];采用随机前沿生产函数和面板数据模型,对不同城市间经济与用水技术效率间的耦合协调度进行测算^[9],认为只有经济发展与用水技术效率并举才能提高协调度;利用改进的水足迹计算方法,对水资源利用效率进行分析,量化城市化水平与水资源利用效率之间的关系^[10]。

本文对现有的匹配度指标进行改进,提出秩匹配度概念与计算方法,量化秩匹配度分级标准,将匹配度内涵扩展到欠匹配、匹配、过匹配 3 种状态与高、中、低匹配 3 个层次,从而更全面地刻画工业用水效率关键指标与控制因素之间的关联关系。以万元工业增加值用水量作为工业用水效率的评价指标、人均 GDP 作为经济发展指标,采用提出的秩匹配度评价方法,分析了全国 336 个地级行政区与直辖市 2017 年经济发展水平与工业用水效率之间的匹配状态、匹配层次及其空间分布特征,成果可为衡量全国城市工业用水效率状况提供了新的分析手段,也可为“十四五”期间全国城市节水目标的合理制定与节水工作的有效开展提供借鉴与参考。

1 数据来源

本文的地理分析单元采用民政部公布的行政区划,涉及全国 336 个地级行政区与直辖市(以下简称“城市”),包括 292 个地级市、30 个自治州、7 个地区、3 个盟以及 4 个直辖市,并参照《节水型社会建设“十三五”规划》区域布局,将上述区域划分为东北、华北、西北、西南、华中、东南六大区域。基础资料包括 2017 年用水量和社会经济发展数据。用水量数据主要摘录于《中国水资源公报》及各省《水资源公报》。2017 年水利部门公开发布用水量的城市占城市总数的 78.2%,针对用水资料不完备的城市,采用多年平均省市比例系数对用水量数据进行插补。为使各省《水资源公报》与《中国水资源公报》两个渠道获取的用水量数据保持一致性,采用等差内插法对数据进行修正,其中万元工业增加值用水量按 2010 年不变价统计。涉及社会经济发展的基础数据包括工业增加值、GDP、总人口、第二产业增加值占 GDP 比例等,这些数据能够反映用水产出的经济效益,主要来源于我国除港澳台以外的 31 个省级行政区《统计年鉴》《中国城市统计年鉴》,其中 GDP、工业增加值均依据对应指数折算至 2010 年可比值。

2 研究方法

2.1 秩匹配度内涵

左其亭等^[11]提出的基于数列的匹配度计算方法,可用于判定二元要素处于匹配或不匹配两种状态,已成功应用于国内外多地水资源利用与经济社会发展匹配特征分析^[12-14]。采用该匹配度分析工业用水效率与经济发展水平的匹配关系,不匹配状态的评价结果包含了工业用水效率滞后或领先于经济发展水平两种子情况;匹配状态包含了工业用水效率与经济发展水平同时处于先进、中等、落后水平的子情况。将上述子情况归为一类,对工业用水效率与经济发展水平匹配状况的判断不够准确。为此,本文提出秩匹配度概念,定义为基于秩序列测算的两个系统或其要素之间的匹配关系及匹配层次状态,将匹配度的内涵拓展到欠匹配、匹配、过匹配 3 种状态与高、中、低匹配 3 个层次。

2.2 秩匹配度计算方法

假定研究空间内有 N 个样本,每个样本由指标 X 、 Y 构成, X 为自变量, Y 为因变量,对 N 个样本的自变量指标 X 取值按从小到大排序为 $x_1, x_2, \dots, x_N$,在序列中对应的秩次为 $a_1, a_2, \dots, a_N$;对 N 个样本的因变量指标 Y 取值也按升序排列为 $y_1, y_2, \dots, y_N$,

在序列中对应的秩次为 $b_1, b_2, \dots, b_N$, 可得每个样本的秩次为 (a_i, b_i) ($i = 1, 2, \dots, N$)。秩匹配度 m_i ($-1 \leq m_i \leq 1$) 计算公式见式(1)~(4)。

a. 当指标 X 与 Y 为正相关关系且 X 数值越大代表发展水平越高时:

$$m_i = (b_i - a_i)/(N - 1) \tag{1}$$

b. 当指标 X 与 Y 为正相关关系且 X 数值越小代表发展水平越高时:

$$m_i = (a_i - b_i)/(N - 1) \tag{2}$$

c. 当指标 X 与 Y 为负相关关系且 X 数值越大代表发展水平越高时:

$$m_i = (N - a_i - b_i + 1)/(N - 1) \tag{3}$$

d. 当指标 X 与 Y 为负相关关系且 X 数值越小代表发展水平越高时:

$$m_i = (a_i + b_i - N - 1)/(N - 1) \tag{4}$$

2.3 匹配状态与匹配层次的分级方法

以工业用水效率与经济发展水平为例, 秩匹配度的欠匹配、匹配、过匹配 3 种状态体现了两要素发展水平是否同步。当 $-0.1 \leq m_i < 0.1$ 时, 两指标在各自序列中秩次相近, 定义为匹配状态, 两指标发展水平接近; 当 $-1 \leq m_i < -0.1$ 时, 工业用水效率滞后于经济发展水平, 定义为欠匹配状态, 工业用水效率有提升空间; 当 $0.1 \leq m_i \leq 1$ 时, 工业用水效率领先于经济发展水平, 定义为过匹配状态, 往往反映当地有较大的用水压力。在匹配状态三分法基础上, 参考基尼系数划分方法, 可对欠匹配与过匹配状态做进一步划分, 划定 $-1 \leq m_i < -0.5$ 为极欠匹配, $-0.5 \leq m_i < -0.3$ 为明显欠匹配, $-0.3 \leq m_i < -0.1$ 为较欠匹配; $0.1 \leq m_i < 0.3$ 为较过匹配, $0.3 \leq m_i < 0.5$ 为明显过匹配, $0.5 \leq m_i \leq 1$ 为极过匹配。

依据样本点到最优匹配点距离, 可将处于相同匹配状态的样本进一步细分为高、中、低 3 个匹配层次。以平面直角坐标系为参照, 说明高、中、低层次匹配的划分方法。如图 1 所示, 设图中样本点总数为 N (样本点表示城市, 本文中 $N = 336$), X 为人均 GDP, Y 为万元工业增加值用水量, 由于两指标呈负相关关系, 采用式(3)计算秩匹配度。坐标系中最右下角坐标为 $(N, 1)$, 最左上角坐标为 $(1, N)$, 两点间连线附近的样本点 (城市) 均处于匹配状态。样本点越靠近最优匹配点 $(N, 1)$, 该样本点匹配层次越高; 样本点越靠近劣匹配点 $(1, N)$, 该样本点的匹配层次越低。故以最优匹配点 $(N, 1)$ 为圆心, 计算各样本点 (a_i, b_i) 到圆心的距离, 记为 R_i , 以 $1/3\max R_i$ 、 $2/3\max R_i$ 、 $\max R_i$ 为节点, 可划分出高层次、中层次和低层次匹配区间。 R_i 计算公式为

$$R_i = \sqrt{(a_i - x_o)^2 + (b_i - y_o)^2} \tag{5}$$

式中 (x_o, y_o) 为最优匹配点坐标。对应式(1)的最优匹配点坐标为 (N, N) ; 对应式(2)的最优匹配点坐标为 $(1, 1)$; 对应式(4)的最优匹配点坐标为 $(1, N)$ 。

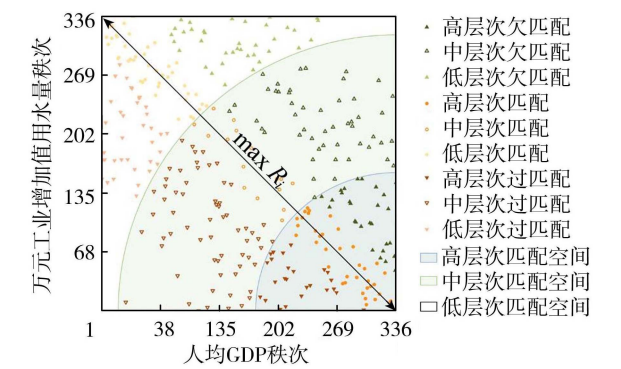


图 1 秩匹配度的匹配层次划分

Fig. 1 Matching hierarchy division based on rank matching degree

由进一步划定的 7 种匹配状态 (极欠匹配、明显欠匹配、较欠匹配、匹配、较过匹配、明显过匹配、极过匹配) 与 3 个匹配层次 (高层次、中层次、低层次) 得到 21 种组合状态, 构成了秩匹配度评价体系。

3 结果与分析

3.1 秩匹配度与匹配度的统计特征比较

选取万元工业增加值用水量和人均 GDP 为表征指标, 分析 2017 年我国 336 个城市工业用水效率与经济发展水平的匹配关系。按照秩匹配度分级方法, 匹配状态分为 7 级, 如图 2(a) 所示。3 种过匹配状态的万元工业增加值用水量分布均呈正态分布, 明显过匹配和极过匹配状态的人均 GDP 也呈正态分布, 其余匹配状态的万元工业增加值用水量和人均 GDP 均呈现非对称的正偏分布, 均值明显高于中位数。从各项分布的均值来看, 万元工业增加值用水量和人均 GDP 都随着秩匹配度增大而减少, 呈负向关联关系。仅从均值特征变化可反映出, 越是经济发达地区越容易处于欠匹配状态, 工业用水效率在全国排序的秩次赶不上其相应的经济发展水平。而万元工业增加值用水量控制较好的地区, 其经济发展水平往往在全国排序中相对滞后, 处于过匹配状态。

基于数列的原匹配度计算结果处于 $[0, 1]$, 将匹配度划分为 $[0, 0.1)$ 、 $[0.1, 0.3)$ 、 $[0.3, 0.5)$ 、 $[0.5, 1]$ 4 个区间, 分别对应于匹配、较不匹配、明显不匹配、极不匹配 4 个等级, 如图 2(b) 所示。原匹配度各分级的万元工业增加值用水量和人均 GDP

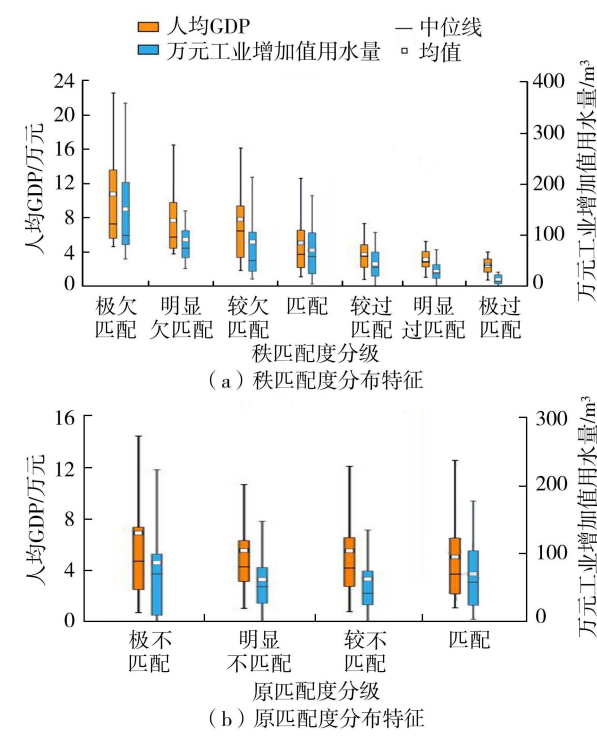


图2 2017年我国城市工业用水效率与经济发展水平匹配度与原匹配度的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of rank matching degree and original matching degree of China's urban industrial water use efficiency and economic development level in 2017

亦呈现出正偏分布。原匹配度在匹配状态的分布范围与秩匹配度几乎重合,说明两种匹配度计算方法在匹配状态的样本保持一致。与秩匹配度相比,原匹配度没有进一步区分欠匹配和过匹配两种子状态,因此,3种不匹配状态的分布均位于相应的欠匹配和过匹配状态之间。采用原匹配度分级方案时应注意,若以正态分布为基准,3种不匹配等级中样本分布尾部的高值区容易被视作离群值,其样本分布的数字特征易忽略离群样本点的特性。比较而言,秩匹配度分级方案中,欠匹配和过匹配等级对原不匹配样本进行了分解,其样本分布特征包含了更丰富的尾部高值区样本信息(图2(a))。

3.2 匹配状态的空间分布特征

利用匹配状态划分方法,对2017年全国336个城市工业用水效率与经济发展水平匹配状态特征进行分析。结果显示,处于匹配状态的城市共有95个,占全部有资料城市的28.27%;处于过匹配、欠匹配状态的城市占比分别为36.31%和35.42%。处于较过、较欠匹配及明显过、明显欠匹配状态的城市共有202个,占全部有资料城市的60.12%;处于极过、极欠匹配的城市共有39个,占全部有资料城市的11.61%。表明我国工业用水效率与经济发展水平总体上处于积极联动状态,我国节水型社会建

设初见成效。

处于欠匹配状态城市的万元工业增加值用水量均值和人均GDP均值均最高,分别为100.20 m³和8.32万元(表1),过匹配状态城市则相反,分别为34.97 m³和3.36万元。处于匹配状态城市的万元工业增加值用水量均值和人均GDP均值分别为71.11 m³和5.10万元,需要注意的是,欠匹配状态并不一定意味着工业用水效率的低下。工业用水效率需要考虑多方面因素,因此在今后的研究中,匹配度也应考虑除人均GDP和万元工业增加值用水量两个指标维度外的其他因子,尤其是在水资源禀赋较好的地区,需采用多元匹配度来表征匹配状态。

表1 各匹配层次两指标平均水平

匹配状态	匹配层次	城市数量	万元工业增加值用水量均值/m³	人均GDP均值/万元
欠匹配	低层次	38	195.42	3.97
	中层次	56	67.71	8.98
	高层次	25	28.25	13.46
匹配	低层次	39	121.93	2.10
	中层次	26	50.30	4.39
	高层次	30	16.35	9.61
过匹配	低层次	36	62.48	1.81
	中层次	66	26.94	3.42
	高层次	20	11.97	5.97

2017年全国城市工业用水效率与经济发展水平匹配状况空间分布如图3(审图号:GS(2019)1831)所示。西南地区工业用水效率与经济发展水平匹配的城市有27个,占比39.71%,但该区两者水平均较低。过匹配状态城市在西北地区东南部和华北地区连片分布,工业用水效率总体超前于经济发展水平,这与西北、华北地区水资源短缺、用水压力大的状况密不可分。华中地区与东南地区60%的城市处于欠匹配状态,这些城市水资源丰富、用水

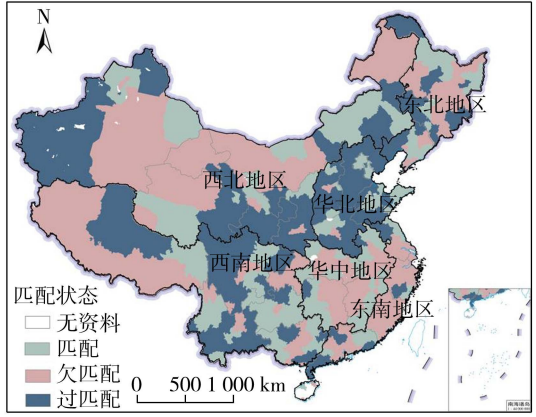


图3 2017年各城市秩匹配度分级空间分布格局
Fig.3 Spatial distribution pattern of rank matching degree classification of cities in 2017

压力小,万元工业增加值用水量较其他地区偏大。

工业用水效率与经济发展水平处于匹配状态的城市在全国六大分区均有分布,主要在山东、安徽、贵州、湖南等省。山东半岛、辽东半岛以及北京、天津等地已总体进入工业化后期阶段,产业结构转向以技术创新和结构升级为内涵的新阶段,用水需求提升的总体动力减弱,经济相对发达且工业用水效率高,两指标处于匹配状态。例如天津市2017年万元工业增加值用水量为 10 m^3 ,人均GDP为10.83万元,两项指标均处于全国前列,达到了较高层次的匹配关系。经济相对落后的临界匹配城市,例如邵阳、毕节等市,水资源量丰富,但工业发展起步晚,工业用水效率水平不高,当前处于经济较落后且工业用水效率较低的状态。

两指标处于欠匹配的城市集中分布于华中与东南地区。这类城市共同的特点是水资源量丰富、用水压力相对较低,资源禀赋对资源利用效率的约束较弱,工业节水水平不高,工业用水效率滞后于经济发展水平。该状态下的城市应全面贯彻“三新一高”(新发展阶段、新发展理念、新发展格局、高质量发展)战略要求,进一步完善水资源刚性约束制度,健全水资源管控体系,着力提升水资源集约节约利用能力^[15]。

工业用水效率较高但经济发展水平相对落后的过匹配城市,例如喀什地区和邢台、邯郸等市,具有水资源禀赋弱、入境水量少等特点,用水增长曲线属于发展约束型或严重胁迫型^[16],针对当地水资源短缺的状况,需高效利用现有的水资源并结合外调水等方式提高水资源承载力,优先发展水资源需求量低、工业产出价值高的产业,带动经济发展,提高匹配程度。

3.3 匹配层次的空间分布特征

2017年全国各城市匹配层次的空间分布格局总体自南向北由中低层次逐渐变化为中高层次(图4)。高层次匹配的城市主要分布在华北、东北、西北等水资源量短缺地区,以及浙江沿海与珠三角附近水资源重复利用率高的部分东南地区城市;低层次匹配的城市分布相对集中,主要分布于华中与西南地区。中层次匹配的城市分布较为零散,六大分区均有分布,这类城市的工业用水效率与经济发展水平均处于全国中等水平,且在欠匹配、过匹配状态的城市中占比均为最高(表1)。

高层次匹配中的典型城市包括北京、天津、青岛、深圳等经济发达城市,其普遍特征为工业发展水平高,工业用水重复利用率高,产业结构已经转向以技术创新为主导的新阶段。如北京市工业产业结构

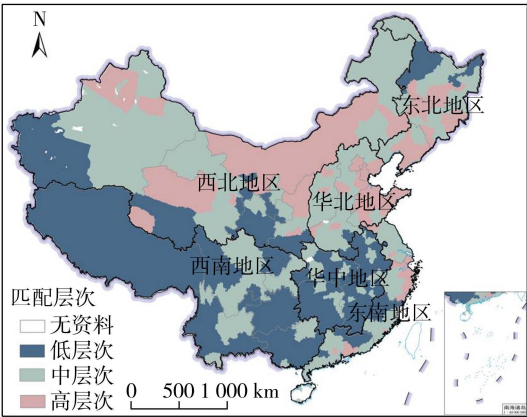


图4 2017年各城市匹配层次空间分布

Fig.4 Spatial distribution of matching hierarchy of cities in 2017

发生较大变化,工业主导产业由20世纪90年代初期的高耗低效行业转变为汽车制造、电力、热力生产等为主的低耗高效产业,工业用水占总用水量的比重已经由20世纪90年代的30%降低至10%左右,工业用水重复利用率与生产废水再利用率不断提高^[17],相邻直辖市天津情况与之相近^[18]。2017年深圳人均GDP为13.94万元,万元工业增加值用水量为 9.42 m^3 ^[19],该市匹配特征为高层次匹配。

哈尔滨、连云港等市处于中层次匹配,经济发展与工业节水在国内城市中均处于中等水平。哈尔滨目前正处于产业转型升级的进程中,产业结构不断优化。在此背景下,工业产业应努力提升科技创新能力,建设新型工业集聚区,提高现有工业节水水平,为经济发展注入新的活力。经济发展相对落后、工业用水效率也较低的城市,如荆州、黄冈市,两指标虽高度匹配,但在全国范围内的相对水平却比较落后,属于低层次匹配。这部分城市近年来采取了大量应对措施,例如荆州市“十三五”以来持续推进工业兴市战略,积极培育生物医药、新能源、新材料等新兴产业,优化产业结构,调整产业空间布局,加快工业企业节水技术改造,有效控制了工业用水增长,为同层次其他城市树立了样板。各城市应充分借鉴先进经验,提升节水水平向更高匹配层次迈进。

1998—2017年,我国工业用水效率逐年提升,在新时期“十六字”治水思路的指引下,“节水优先,空间均衡”初见成效。华北、西北等地区城市工业用水效率较高,与经济发展水平的匹配层次较高,但主要受限于水资源禀赋条件,面临严峻的缺水形势及较大的用水压力^[20],应考虑充分发挥我国跨流域调水的优势,在多目标规划的基础上制定适宜的水资源分配策略,缓解城市用水压力,适度用水,达到经济上的最优产出;华东与华南地区水资源量丰富

的城市,经济较发达,与工业用水效率匹配层次较低,在水资源配置过程中应考虑采用基于效率的水资源配置方案^[21],探索最优工业用水效率目标,减少经济社会各环节中仍存在的低效用水,促进经济、社会与环境综合效益的提高,实现水资源高效利用的目标。

3.4 秩匹配度等级的发展规律

如果将万元工业增加值用水量和人均 GDP 各取对数,则相似秩匹配度的城市聚集在一组函数关系附近,形成对称式的图景。该图景在不同的年份都保持相似的形状,但图景所处的绝对位置和变幅随年份发生变化,将该现象称为匹配度分级的自相似规律。以 2007 年与 2017 年秩匹配度计算结果为例,选取除极欠匹配与极过匹配以外的城市,将人均 GDP 的单位由万元换算为元,万元工业增加值用水量的单位由 m^3 换算为 10^2 cm^3 ,经对数处理并按照匹配状态划分后绘制散点图,进行曲线拟合,绘出相应匹配状态下人均 GDP ($\lg X$) 和万元工业增加值用水量 ($\lg Y$) 指标的拟合线,如图 5 所示。与 2007 年相比,2017 年城市人均 GDP 更高,万元工业增加值用水量更低,图形位置有所变化,但形状保持稳定。

城市人均 GDP 与万元工业增加值用水量的秩匹配度为 $-0.1 \leq m_i < 0.1$ 时,两指标处于匹配状态。图 5(b) 中对应城市分布接近于 $y = -1.36x + 9.91$,说明若某城市长期处于匹配状态时,工业节水水平随经济水平的提高速度较为稳定,其工业用水效率将伴随经济水平协同发展,当地用水压力不会增加且经济发展水平会稳步提高。

城市指标间秩匹配度为 $-0.5 \leq m_i < -0.3$ 和 $-0.3 \leq m_i < -0.1$ 时,两指标分别处于明显欠匹配和较欠匹配状态,2017 年对应城市工业用水效率发展的拟合曲线分别为 $y = 1.43x^2 - 14.90x + 42.42$ 和 $y = 1.09x^2 - 11.84x + 35.33$,随着经济的发展,其切线斜率绝对值均由大变小,表明处于这两个秩匹配度区间内的城市若保持匹配度不变,工业用水效率变化规律为初始工业用水效率较低,伴随经济社会发展,工业用水效率提升的速度先快后慢。在相同人均 GDP 情况下观察用水量变化与匹配度的关系,可发现两区间内秩匹配度越低的的城市,其工业用水效率低于经济发展水平越多,亟须充分发挥水资源的强约束作用,在增加节水投入的同时落实水资源节约措施,防范工业用水效率较低导致的用水压力升高,保障社会经济良好健康发展。

城市指标间秩匹配度为 $0.1 \leq m_i < 0.3$ 和 $0.3 \leq m_i < 0.5$ 时,两指标分别处于较过匹配和明显过匹配状态。秩匹配度数值越大的城市,其工业用水效率高于经济发展水平越多。随着经济发展,两区间内城市工业用水效率提高趋势整体相同,2017 年拟合曲线分别为 $y = -1.79x^2 + 14.60x - 25.84$ 和 $y = -3.37x^2 + 27.94x - 54.11$,切线斜率绝对值均由小变大,表明两秩匹配度区间内,各城市若保持秩匹配度不变,工业用水效率提高速度将随社会经济的发展先慢后快。

4 结 语

本文提出的秩匹配度概念与评价方法,拓展了匹配度的内涵,能够更准确地描述两指标间的匹配状态。2017 年,我国工业用水效率与经济发展水平处于匹配状态的城市占 28.27%,在六大分区均有分布;处于过匹配状态的城市占 36.31%,主要分布于华北、西北等水资源较为匮乏的地区;处于欠匹配状态的城市占 35.42%,主要分布在华中、东南等水资源较丰富的地区。全国城市匹配层次的空间分布格局为自南向北由中低层次逐渐变化为中高层次。由匹配层次与匹配状态的分析可判断不同城市工业用水效率与经济发展水平的协同发展状况以及在全

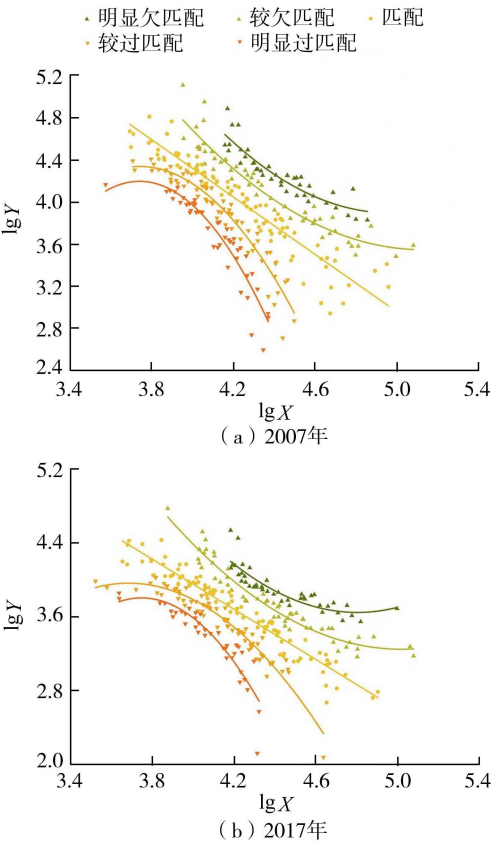


图 5 不同匹配状态城市两指标发展趋势
Fig.5 Development trend of two indicators of cities in different matching states

国的发展水平秩次,有助于判别工业用水效率的主控因素与变化规律,更合理地制定区域水资源管理策略。

参考文献:

[1] 张翔宇,李玉娟,张国玉,等. 最严格水资源管理制度对工业用水效率的影响[J]. 长江科学院院报,2020,37(5): 23-27. (ZHANG Xiangyu, LI Yujuan, ZHANG Guoyu,et al. Impact of the most stringent water resource management system on industrial water use efficiency[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(5):23-27. (in Chinese))

[2] 刘波,汪紫薇,王文鹏,等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(6): 534-541. (LIU Bo, WANG Ziwei, WANG Wenpeng,et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over China’s mainland [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 534-541. (in Chinese))

[3] 孙付华,张林林,吕彝,等. 中国省域工业用水效率评价及区域差异分析[J]. 水利经济,2022,40(1): 21-28. (SUN Fuhua,ZHANG Linlin, LYU Ben,et al. Evaluation of China’s provincial industrial water efficiency and analysis of regional differences[J]. Journal of Economics of Water Resources,2022,40(1): 21-28. (in Chinese))

[4] ZHANG Y, KHAN S U, SWALLOW B, et al. Coupling coordination analysis of China’s water resources utilization efficiency and economic development level[J]. Journal of Cleaner Production,2022,373:133874.

[5] 韩雁,贾绍凤,鲁春霞,等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征:以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020,35(6): 1392-1401. (HAN Yan, JIA Shaofeng, LU Chunxia, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy;a case study in Zhangjiakou [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35 (6): 1392-1401. (in Chinese))

[6] 郝林钢,左其亭,韩春辉,等. “一带一路”沿线分区用水结构与产业结构的分析比较[J]. 干旱区研究,2019,36(1):44-51. (HAO Lingang,ZUO Qiting, HAN Chunhui, et al. Water consumption and industrial structure in different regions along the “Belt and Road” [J]. Arid Zone Research,2019,36(1): 44-51. (in Chinese))

[7] 郭佳航,左其亭,李东林,等. 新疆水资源利用与产业发展关联研究[J]. 水资源保护,2021,37(2): 34-42. (GUO Jiahang,ZUO Qiting,LI Donglin,et al. Research on relationship between water resources utilization and industrial development in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):34-42. (in Chinese))

[8] 邢霞,修长百,刘玉春. 黄河流域水资源利用效率与经济发展的耦合协调关系研究[J]. 软科学,2020, 34 (8): 44-50. (XING Xia, XIU Changbai, LIU Yuchun. Research on coupling and coordination relationship between water resources utilization efficiency and economic development[J]. Soft Science,2020,34(8):44-50. (in Chinese))

[9] 陈杰,许朗. 基于面板三阶段 DEA-Malmquist 模型的中国农业绿色水资源利用效率研究[J]. 地理科学,2023, 43 (4): 709-718. (CHEN Jie, XU Lang. Utilization efficiency of Chinese agricultural green water resources based on panel three-stage DEA-Malmquist model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43 (4): 709-718. (in Chinese))

[10] 吕良华,姜蓓蕾,耿雷华,等. 基于用水总量控制的雄安新区用水强度指标体系[J]. 水资源保护,2022,38(5): 105-110. (LYU Lianghua, JIANG Beilei, GENG Leihua,et al. Water intensity index system of Xiong’ an New Area based on total water consumption control[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 105-110. (in Chinese))

[11] 左其亭,赵衡,马军霞,等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用[J]. 水利水电科技进步,2014, 34(6): 1-6. (ZUO Qiting,ZHAO Heng,MA Junxia,et al. A calculation method and its application on the matching degree of the water resources utilization and socioeconomic development[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(6):1-6. (in Chinese))

[12] 郭佳航,田进宽,左其亭,等. 沙颖河流域水资源利用量与经济发展匹配特征分析[J]. 南水北调与水利科技 (中英文),2021,19(3):487-495. (GUO Jiahang, TIAN Jinkuan,ZUO Qiting,et al. The matching characteristics of the water resources utilization and economic development in the Shaying River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(3): 487-495. (in Chinese))

[13] 朱光磊,赵春子,佟守正,等. 吉林省水资源利用与经济发展关系研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021,43(6): 122-128. (ZHU Guanglei, ZHAO Chunzi, TONG Shouzheng, et al. Research of the relationship between water resource utilization and economic growth of Jilin Province [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43 (6): 122-128. (in Chinese))

[14] 乔友凤,李奕曼,陈义忠,等. 京津冀地区城镇化与水资源可持续利用的演变及匹配特征[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(3): 64-73. (QIAO Youfeng, LI Yiman, CHEN Yizhong, et al. Evolution and matching characteristics of urbanization and water resources

sustainable utilization in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023, 34(3):64-73. (in Chinese))

[15] 李原园,李云玲,何君.新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J].水利学报,2021,52(11):1340-1346. (LI Yuanyuan, LI Yunling, HE Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1340-1346. (in Chinese))

[16] 赵勇,李海红,刘寒青,等.增长的规律:中国用水极值预测[J].水利学报,2021,52(2):129-141. (ZHAO Yong, LI Haihong, LIU Hanqing, et al. The law of growth: prediction of peak water consumption in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese))

[17] 徐傲,巫寅虎,陈卓,等.北京市城镇污水再生利用现状与潜力分析[J].环境工程,2021,39(9):1-6. (XU Ao, WU Yinhu, CHEN Zhuo, et al. Municipal wastewater reclamation in Beijing: state-of-the-art and future potential [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 1-6. (in Chinese))

[18] 栗清亚,裴亮,孙莉英,等.京津冀区域产业用水时空变化规律及影响因素研究[J].生态经济,2020,36(10): 141-145. (LI Qingya, PEI Liang, SUN Liying, et al. Study on temporal and spatial variation and influencing factors of industrial water consumption in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Ecological Economy, 2020, 36(10): 141-145. (in Chinese))

[19] 李深林,洪昌红,邱静,等.广东省不同区域污水资源化建设需求分析[J].水资源保护,2021,37(5):43-47. (LI Shenlin, HONG Changhong, QIU Jing, et al. Demand analysis of sewage reclamation construction in different regions of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 43-47. (in Chinese))

[20] 邓铭江,黄强,畅建霞,等.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,2020,31(5):775-792. (DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 775-792. (in Chinese))

[21] DALCIN A P, MARQUES G F. Integrating water management instruments to reconcile a hydro-economic water allocation strategy with other water preferences[J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): e2019WR025558.

(收稿日期:2023-03-03 编辑:施业)

(上接第 27 页)

[14] 杨研,夏朋,梁宁.“四水四定”制度体系构建思考[J].中国水利,2023(9):51-54. (YANG Yan, XIA Peng, LIANG Ning. Considerations of building a mechanism of “defining city, land, population and production by water” [J]. China Water Resources, 2023(9): 51-54. (in Chinese))

[15] 张丹,王境,王艺璇,等.“以水定产”的经验、问题及建议[J].水利经济,2021,39(2):82-85. (ZHANG Dan, WANG Jing, WANG Yixuan, et al. Experience, problems and suggestions for practicing “Production determination by water” [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(2): 82-85. (in Chinese))

[16] 田贵良,李晓宇,印浩,等.跨界水资源冲突协调的产权路径、博弈模型与案例仿真[J].管理工程学报,2020, 34(6):173-182. (TIAN Guiliang, LI Xiaoyu, YIN Hao, et al. Property rights path, game model and case simulation of the coordination of the cross boundary water resources conflict [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(6): 173-182. (in Chinese))

[17] 高磊.新形势下中国特色水权交易实践总结与发展对策[J].水利经济,2022,40(2):57-60. (GAO Lei. Summary and prospect of water right trade practice with Chinese characteristics under new situations [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(2): 57-60. (in Chinese))

[18] 景晓栋,田贵良,胡豪,等.我国水权交易市场改革实践探索:演进过程、模式经验与发展路径:兼析全国统一用水权交易市场建设实践[J].价格理论与实践,2022(9):83-88. (JING Xiaodong, TIAN Guiliang, HU Hao, et al. Practice and exploration of water rights trading market reform in China: evolution process, model experience and development path: analysis of the construction practice of China's unified water rights trading market [J]. Price: Theory & Practice, 2022(9): 83-88. (in Chinese))

[19] 王亚华,唐啸.中国环境治理的经验:集体行动理论视角的审视[J].复旦公共行政评论,2019(2):187-202. (WANG Yahua, TANG Xiao. China's experience in environmental governance: a collective action theory perspective [J]. Fudan Public Administration Review, 2019(2): 187-202. (in Chinese))

(收稿日期:2023-03-01 编辑:熊水斌)