

王敏, 张玉顺, 邱新强, 等. 基于用水统计的河南省工业用水重复利用率测算[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 59-68.
WANG M, ZHANG Y S, QIU X Q, et al. Calculation and analysis of industrial water recycling rate in Henan Province based on water use statistics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 59-68. (in Chinese)

基于用水统计的河南省工业用水重复利用率测算

王敏¹, 张玉顺¹, 邱新强², 杨浩晨², 王艳平², 陶洁³

(1. 河南省水利科技应用中心, 郑州 450003; 2. 河南省科达水利勘测设计有限公司, 郑州 450003;
3. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001)

摘要: 为全面了解河南省工业用水重复利用情况, 提出一种基于用水统计的工业用水重复利用率测算方法, 通过河南省全口径用水量数据和典型企业水重复利用数据, 测算河南省工业用水重复利用率, 并对测算成果进行分析。结果表明: 河南省 2022 年工业用水重复利用率为 94.15%, 各市在 82.89% ~ 96.76%, 各行业在 23.89% ~ 98.04%; 河南省工业用水重复利用整体水平较高, 城市之间差异显著, 纺织、食品和其他行业水平较低, 火电行业对河南省工业用水重复利用率的影响程度最高; 全省提高工业用水重复利用率的节水潜力为 7.97 亿 m³, 工业节水潜力较为可观。采用的测算方法适用于区域工业用水重复利用率测算, 测算成果符合河南省实际, 可为河南省加强工业节水管理、提高工业用水效率提供参考。

关键词: 重复利用率; 用水统计; 测算方法; K-均值聚类; 敏感性分析; 节水潜力

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2025.0006

工业是国民经济的支柱, 水资源是工业发展的重要保障^[1], 工业用水重复利用率是反映工业用水效率^[2]、评价工业用水循环利用以及工业节水程度的一项重要指标。对工业用水重复利用率进行测算分析, 有助于全面了解工业用水重复利用情况, 对于提高工业节水水平、预测工业节水潜力、促进工业可持续发展具有重要意义。

关于工业用水重复利用率的研究, 目前主要聚焦于以下方面: 对企业用水重复利用率的测算研究。主要为通过水平衡测试等方法, 分析企业用水和水重复利用情况, 测算企业的工业用水重复利用率, 并提出相应的节水措施。曹荣等^[3]、陈晓成^[4]、杨会玲等^[5]、蔡琼瑜等^[6]分别对火电、化工、纺织印染和啤酒酿造等行业企业进行水平衡测试, 测算了企业水重复利用率并提出节水改进方案。根据工业用水重复利用率预测工业需水量或节水潜力。王会容等^[7]采用重复利用率提高法预测了乐至县 2030 年工业需水量; 秦长海等^[8]、李佳伟等^[9]、刘秋丽^[10]考虑工业用水重复利用率等指标分别估算了京津冀地区、河南省、山西省的工业节水潜力。工

业用水重复利用率指标对工业用水的影响分析和节水水平评价。张旭等^[11]认为水资源重复利用率变动是遏制工业用水量增长的主要因素之一; 刘波等^[12]揭示了我国工业用水重复利用率的时空演变特征; 王文川等^[13]构建包括工业用水重复利用率在内的洛阳市节水评价指标体系并进行了评价。总结现有研究可知, 目前对工业用水重复利用率测算方法的研究主要针对企业, 缺乏区域层面上的研究; 而现有对该指标的应用, 大多直接采用《城市建设统计年鉴》等公开发布的统计数据^[12,14-15], 但其统计范围仅为计划用水部分, 不能完全反映区域实际用水情况。

为此, 在用水统计调查制度^[16-17]对区域用水量数据全覆盖的基础上提出一种区域工业用水重复利用率测算方法。全国用水统计调查直报管理系统是建立于取用水户直报的工作体系, 于 2020 年开始实施, 基本实现了对自备水源工业企业的全面覆盖, 工业用水量数据翔实全面。结合用水统计调查数据和典型企业测算, 对 2022 年河南省工业用水重复利用率进行测算分析, 补充完善了工业用水重复

收稿日期: 2024-06-19 修回日期: 2024-09-28 网络出版时间: 2024-10-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241011.1328.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJH/JS/FWKY-2021002); 河南省水利科技攻关计划项目(GG202022); 河南省基本科研业务费项目

作者简介: 王敏(1975—), 女, 河南太康人, 高级工程师, 主要从事水资源及节水相关研究。E-mail: wangmin371@126.com

利用率在区域层面的测算方法,基于用水统计全口径数据的测算可很好地反映区域工业水重复利用情况,测算结果更加合理可靠。研究成果可为河南省加强工业节水管理、提高工业用水效率提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河南省位于我国中东部, $31^{\circ}23'N \sim 36^{\circ}22'N$ 、

$110^{\circ}21'E \sim 116^{\circ}39'E$, 全省辖 18 个市, 总面积 16.7 万 km^2 。河南省水资源匮乏, 多年平均水资源量 403.5 亿 m^3 , 人均水资源量约为 383 m^3 , 仅为全国人均水资源量的 20%^[18]。2012—2022 年河南省总用水量在 209.29 亿 $\sim$ 240.57 亿 m^3 ; 工业用水量在 21.26 亿 $\sim$ 60.51 亿 m^3 , 呈逐年下降趋势(图 1)。2022 年河南省总用水量 228.00 亿 m^3 , 其中工业用水量 21.26 亿 m^3 , 工业增加值(当年价)19 593 亿元, 万元工业增加值(当年价)用水量 10.9 m^3 (含火电)。

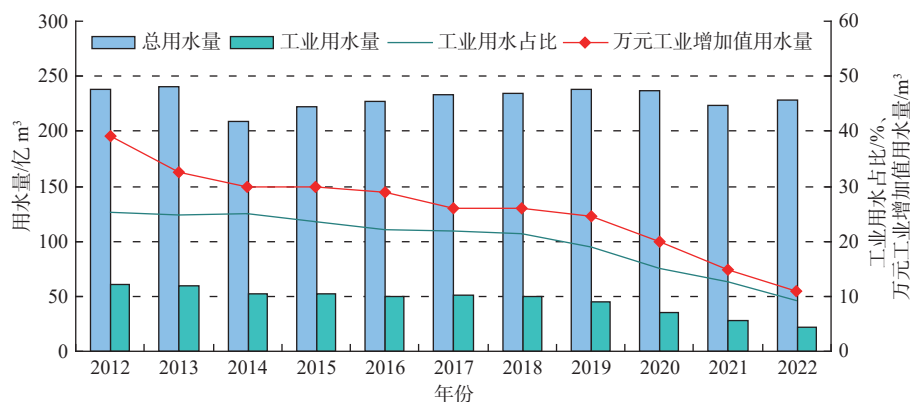


图 1 2012—2022 年河南省工业用水变化趋势

Fig. 1 Change trend of industrial water use in Henan Province from 2012 to 2022

工业用水主要受产业结构、节水技术、经济发展水平和行业规模等的影响^[19], 与工业增加值、万元工业增加值用水量等指标密切相关。河南省万元工业增加值用水量从 2012 年的 39.0 m^3 下降到 2022 年的 10.9 m^3 , 目前该指标已处于国内先进水平; 工业用水占比从 2012 年的 25.4% 下降到 2022 年的 9.3%, 现状水平已压缩到极低。从这些指标的趋势来看, 在产业策略、经济、技术等无较大变化的情况下, 可以预见河南省工业用水量下降趋势将会放缓, 近几年变化幅度不会太大。在此情况下, 以 2022 年为代表年进行测算分析, 基本可以反映近几年河南省工业用水及水重复利用情况。

1.2 数据来源及预处理

研究数据包括全省工业用水量数据和典型企业水重复利用测算数据。全省工业用水量数据主要来源于《河南省水资源公报》、用水统计调查直报管理系统和水行政主管部门计划用水管理相关资料。后两者覆盖全省自备水源工业企业及年用水量 1 万 m^3 以上的公共供水工业企业。对这些企业的原始数据按照不同行业、不同城市进行分类处理。典型企业水重复利用测算数据主要来源于各企业的水平衡测试报告, 也有小部分已建企业水资源论

证报告、节水型企业建设资料和节水指标调查表。对收集的企业测算资料进行审查复核, 确保数据的合理性和可靠性; 对审核后的企业资料按行业分类, 作为典型企业测算资料。

2 研究方法

2.1 基于用水统计的测算方法

工业用水重复利用的重点在高耗水行业, 本研究按照火电、钢铁、有色金属、纺织、造纸、石化化工、食品等高耗水行业及其他行业, 划分河南省工业行业, 测算工业用水重复利用率。测算流程见图 2。

各市分行业的工业用水新水量计算。新水量按水源及资料来源的不同, 划分为自备水源工业企业用水(包括重点、非重点工业企业用水)、年用水量 1 万 m^3 以上的公共供水工业企业用水, 以及其他无统计资料的工业企业用水(包括年用水量 1 万 m^3 以下的公共供水工业企业用水、部分取用其他水源的工业企业用水等)。其中无统计资料的用水可由各市新水总量反算得出。该部分用水的行业分类无法确定, 考虑到这些企业用水量基数一般很小, 在计算中将之归类为其他行业用水。据此进行计算, 公式为

$$Q_{ij} = Q_{z,ij} + Q_{f,ij} + Q_{g,ij} + Q_{q,ij} \quad (1)$$

式中: Q_{ij} 为第 i 个市第 j 个行业的工业用水新水量, m^3 ; $Q_{z,ij}$ 、 $Q_{f,ij}$ 、 $Q_{g,ij}$ 、 $Q_{q,ij}$ 分别为第 i 个市第 j 个行业的

自备水源重点工业企业、自备水源非重点工业企业、年用水量 1 万 m^3 以上的公共供水工业企业、其他工业企业新水量, m^3 。

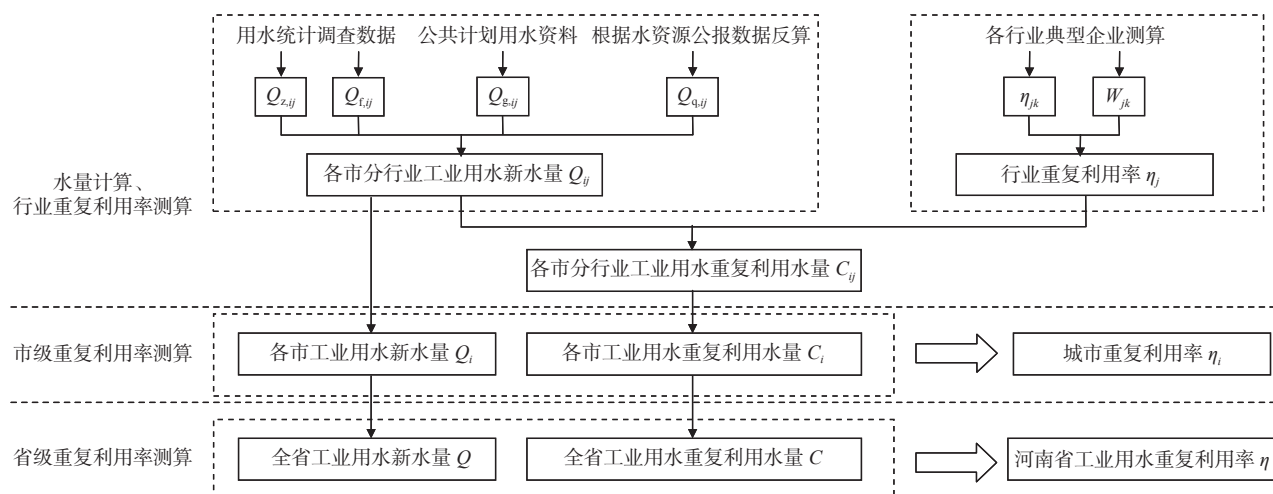


图2 测算流程

Fig. 2 Flow chart of calculation

行业重复利用率测算。根据典型企业资料分别测算其用水重复利用率,并对每种行业的典型企业用水重复利用率进行加权平均,求得该行业的工业用水重复利用率,计算公式为

$$\eta_{jk} = \frac{C_{jk}}{W_{jk}} \times 100\% = \frac{C_{jk}}{Q_{jk} + C_{jk}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_j = \frac{\sum_{k=1}^n \eta_{jk} W_{jk}}{\sum_{k=1}^n W_{jk}} \quad (3)$$

式中: η_{jk} 为第 j 个行业第 k 个典型企业的水重复利用率, %; η_j 为行业重复利用率, 行业分类包括火电、钢铁、有色金属、纺织、造纸、石化化工、食品、其他, %; W_{jk} 、 Q_{jk} 、 C_{jk} 分别为第 j 个行业第 k 个典型企业的工业用水总水量、新水量、重复利用水量, m^3 。

各市分行业的工业用水重复利用水量计算。根据各市分行业的工业用水新水量,以及各行业的重复利用率,求出各市分行业的工业用水重复利用水量,计算公式为

$$C_{ij} = \frac{\eta_j}{1 - \eta_j} \times Q_{ij} \quad (4)$$

式中: C_{ij} 为第 i 个市第 j 个行业的工业用水重复利用水量, m^3 。

各市及全省的工业用水重复利用率测算。根据各市分行业的工业用水新水量和重复利用水量,计算出各市及全省的工业用水重复利用率,计算公

式为

$$\eta_i = \frac{C_i}{Q_i + C_i} \times 100\%, \text{ 其中: } Q_i = \sum_{j=1}^8 Q_{ij}, C_i = \sum_{j=1}^8 C_{ij} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{C}{Q + C} \times 100\%, \text{ 其中: } Q = \sum_{i=1}^{18} Q_i, C = \sum_{i=1}^{18} C_i \quad (6)$$

式中: η_i 为城市工业用水重复利用率, 城市范围包括河南省 18 个市, %; η 为河南省工业用水重复利用率, %; Q_i 、 C_i 分别为第 i 个市的工业用水新水量、重复利用水量, m^3 ; Q 、 C 分别为全省工业用水新水量、重复利用水量, m^3 。

2.2 工业节水潜力

工业节水潜力与工业结构、企业规模、节水技术等多种因素有关^[20],一般考虑万元工业增加值用水量、工业用水重复利用率和工业供水管网漏失率等^[21]。本文仅研究提高工业用水重复利用率的节水潜力。以各行业典型企业测算的重复利用率上限值作为采取节水技术措施预期可达到的极限值,计算其对应的河南省极限工业用水重复利用率和全省用水量,进而求出提高工业用水重复利用率的节水潜力,计算公式为

$$\Delta Q = Q_0 - Q_1 = Q_0 \frac{\eta_1 - \eta_0}{1 - \eta_0} \quad (7)$$

式中: ΔQ 为提高工业用水重复利用率的节水潜力, m^3 ; Q_0 、 Q_1 分别为现状、预期工业用水量, m^3 ; η_0 、 η_1 分别为现状、预期的工业用水重复利用率, %。

3 结果与分析

3.1 行业重复利用率测算成果及水平分析

根据前述测算方法对各典型企业水重复利用率进行测算,并进一步测算各行业重复利用率,见表 1。将测算结果与节水型企业标准、《工业废水循环利用实施方案》目标值相对比(表 2),从各行业典型企业测算结果来看,火电、造纸行业的典型企业水重复利用率均达到了节水型企业标准;钢铁行业有 83.3% 的典型企业达到标准;有色金属、石化化工行业种类较多,节水型企业标准主要针对其中的部分行业,具体为有色金属行业的氧化铝、电解铝行业,以及石化化工行业的石油炼制、现代煤化工、乙

烯、氯碱、氮肥等行业,对这些行业的典型企业进行对比,有色金属行业有 50% 达到标准,石化化工行业有 85.7% 达到标准;纺织、食品行业典型企业分别有 68.8%、45.5% 达到标准,但企业之间差别较大,个别企业无重复用水。对比行业重复利用率与《工业废水循环利用实施方案》(工信部联节〔2021〕213 号)对重点用水行业提出的 2025 年目标值,河南省的钢铁、有色金属、造纸、石化化工行业均已提前达到行业目标,纺织、食品行业尚未达到目标值。总的来说:河南省各行业中,火电、造纸、钢铁、有色金属、石化化工行业的整体水平较高,但部分企业水平还需要加强;纺织、食品和其他行业的水平相对较低,企业之间差异显著。

表 1 行业重复利用率测算结果

Tab. 1 Calculation result of recycling rate by industry

行业	火电	钢铁	有色金属	纺织	造纸	石化化工	食品	其他
行业重复利用率	97.65	98.04	95.67	62.48	91.79	96.38	63.80	23.89
典型企业测算值范围	94.67~98.33	96.92~98.89	92.07~98.32	0~96.68	88.26~94.44	87.50~98.34	5.19~89.18	2.21~48.89

表 2 行业重复利用率水平对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of the level of recycling rate by industry

行业	与节水型企业标准对比		与《工业废水循环利用实施方案》目标值对比	
	节水型企业标准	典型企业测算达标率/%	2025 年目标值/%	行业测算成果是否达到目标值
火电	≥90%	100		
钢铁	≥97%	83.3	>97	是
有色金属	氧化铝行业: ≥98%; 电解铝行业: ≥92%	50.0	>94	是
纺织	≥45%	68.8	>78	否
造纸	≥70%(纸浆); ≥85%(纸及纸板)	100	>87	是
石化化工	石油炼制行业: ≥97.5%; 现代煤化工行业: ≥97%; 乙烯行业: ≥98%; 氯碱行业: ≥96%; 氮肥行业: ≥95%	85.7	>94	是
食品	≥60%	45.5	>65	否

注: 节水型企业标准依据国家标准, 其中火电、食品行业依据河南省《关于加强工业领域节水型企业创建工作的通知》(豫工信联节〔2022〕68 号)。

3.2 河南省工业用水重复利用率测算结果及时空分析

根据前述测算方法计算各市分行业的工业用水新水量和重复利用水量,进而求出各市及河南省的工业用水重复利用率,见表 3。河南省 2022 年工业用水重复利用率为 94.15%,与《工业废水循环利用实施方案》2025 年全国目标值(94% 左右)相比,河南省现状水平较高。这与河南省自印发实施《河南省节水行动方案》以来,积极推动节水型社会建设、坚持水资源消耗总量和强度双控、加强高耗水企业

节水监督管理等有一定关系。

将测算结果与统计资料相对比,根据《城市建设统计年鉴》,2022 年河南省计划用水户的工业用水量为 3.91 亿 m^3 ,计划用水部分的重复利用率为 94.31%(图 3)。统计口径的不同是测算成果小有差异的原因所在。本文采用的是河南省全口径用水量数据(21.26 亿 m^3),其范围除了计划用水部分,还包括大量的水重复利用程度较低的中小企业,因此测算结果相对偏低是合理的。受用水统计调查数据的限制,仅以 2022 年为代表年进行了工业用水重

复利用率测算。参考 2012—2022 年工业计划用水重复利用率(图 3),可见该指标变化大致可分为 2 个阶段:2012—2020 年基本处于上升趋势,从 2012 年的 93.29% 提升到 2020 年的 96.61%;而 2021 年和 2022 年下跌为 93.92% 和 94.31%,这可能和疫情

有关,随着疫情的结束趋向增加。工业计划用水重复利用率的趋势在一定程度上也反映了河南省工业用水重复利用率的发展趋势,可以作为本文的补充印证。

表 3 河南省工业用水重复利用率测算结果

Tab. 3 Calculation result of industrial water recycling rate in Henan Province

行政区	年新水量/万 m ³									年重复利用水量/万 m ³	工业用水重复利用率/%
	火电	钢铁	有色金属	纺织	造纸	石化化工	食品	其他	合计		
郑州市	4 983	10	781	169	195	652	1 676	12 424	20 890	251 491	92.33
开封市	1 949	1	13	56	1	2 543	274	3 724	8 560	150 783	94.63
洛阳市	4 357	126	1 007	106	0	1 993	215	17 256	25 060	268 645	91.47
平顶山市	4 263	1 039	18	184	18	1 742	321	12 705	20 290	280 944	93.26
安阳市	2 309	3 746	208	202	0	1 194	255	4 236	12 150	321 842	96.36
鹤壁市	2 293	0	11	60	1	1 131	298	1 516	5 310	126 757	95.98
新乡市	3 397	1	16	133	795	4 686	658	6 535	16 220	278 619	94.50
焦作市	3 472	12	3 548	32	965	1 538	701	4 722	14 990	277 776	94.88
濮阳市	1 236	0	0	8	517	1 445	363	4 101	7 670	97 536	92.71
许昌市	2 217	2	205	79	82	241	84	6 051	8 960	106 236	92.22
漯河市	840	0	1	0	218	308	1 082	3 992	6 440	48 705	88.32
三门峡市	2 737	3	2 018	0	0	317	101	3 374	8 550	168 143	95.16
南阳市	9 177	325	10	442	666	965	317	8 927	20 830	435 063	95.43
商丘市	1 674	304	41	36	25	1 656	278	4 405	8 420	132 015	94.00
信阳市	3 119	0	0	8	0	6	120	3 538	6 790	131 074	95.07
周口市	1 397	1 024	1	104	73	6	943	4 411	7 960	113 505	93.45
驻马店市	571	0	0	34	641	10	492	5 211	6 960	33 727	82.89
济源示范区	2 900	509	1 097	0	1	939	380	735	6 560	196 105	96.76
河南省	52 889	7 104	8 975	1 652	4 199	21 370	8 557	107 863	212 610	3 418 966	94.15

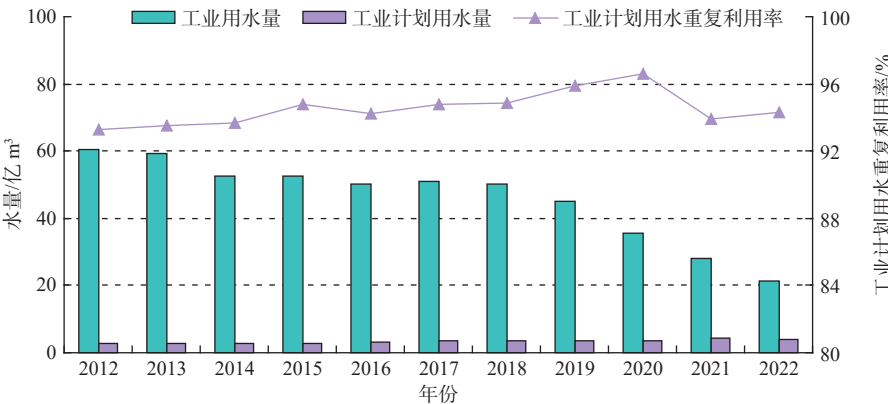


图 3 2012—2022 年河南省工业计划用水及重复利用率变化趋势

Fig. 3 Change trend of planned industrial water use and recycling rate in Henan Province from 2012 to 2022

河南省 18 个市测算结果在 82.89%~96.76%。采用 K-均值聚类法^[22]对各市的工业用水重复利用

率进行划分,分析其空间分布特征。运用 SPSS 22.0 软件进行聚类分析,将 18 个市的工业用水重复

利用率划分为高、中、低水平 3 个类别。根据聚类结果,河南省工业用水重复利用率的空间分布整体上大致为南北高、中间低的态势。从测算方法来看,河南省工业用水重复利用率与各市分行业的用水量及行业重复利用率有关。将各市按重复利用率排序,并进一步分析各市的工业用水结构(图 4):高水平组包括济源、安阳、鹤壁、南阳、三门峡、信阳、焦作、开封、新乡、商丘共 10 个城市,基本分布在河南省的南北两端,工业用水重复利用率在 94.00%~96.76%,高耗水行业用水量占总水量的比例在 47.68%~88.80%(其中火电行业用水量占比在 19.00%~45.93%),高耗水行业包括火电行业用水量占比较高是该组各市的工业用水重复利用率较

高的重要原因;中水平组包括周口、平顶山、濮阳、郑州、许昌、洛阳、漯河共 7 个城市,除濮阳外均位于河南省中部,工业用水重复利用率在 88.32%~93.45%,高耗水行业用水量占比在 31.14%~46.53%(其中火电行业用水量占比在 13.04%~24.74%),用水量占比总体上低于高水平组,工业用水重复利用率与用水量的变化趋势大体上一致;低水平组仅包括驻马店市,地处河南省中部偏南,工业用水重复利用率为 82.89%,高耗水行业用水量占比为 25.13%(其中火电行业用水量占比为 8.20%),驻马店工业用水以其他行业为主,高耗水行业包括火电行业用水量占比在河南省 18 个市中均为最低,是该市工业用水重复利用率最低的原因所在。

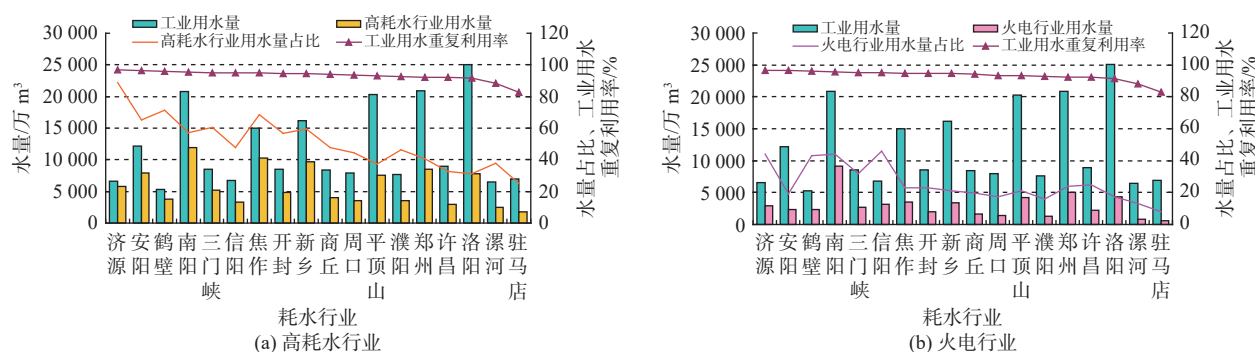


图 4 2022 年河南省工业用水重复利用率及行业用水水平

Fig. 4 The recycling rate of industrial water and the level of industrial water use in Henan Province in 2022

3.3 行业敏感性分析

行业重复利用率是影响河南省工业用水重复利用率的重要因素。以各行业重复利用率为不确定因素,采用单因素敏感性分析^[23],分析不同行业对测算结果所产生的影响。以各行业重复利用率测算结果作为基准值;假设表 1 中典型企业的测算值范围为当前节水技术条件下所能达到的行业重复利用率上下限,以其作为不确定因素的取值区间,对各行业在区间内不同的取值进行计算,得出相应的全省新水量和河南省工业用水重复利用率。

表 4 和图 5 反映了行业重复利用率对河南省工业用水重复利用率及新水量的影响情况。以火电行业为例:当火电行业的重复利用率在取值区间(94.67%~98.33%)内变化时,保持其他各行业重复利用率不变,仅变动火电行业的重复利用率,相应的全省新水量变化范围为 27.96 亿~19.74 亿 m³,河南省工业用水重复利用率变化范围为 92.30%~94.57%。各行业重复利用率的提高均会引起河南

省新水量降低、工业用水重复利用率增大,但各行业所带来的影响程度不同。利用敏感性系数,即河南省工业用水重复利用率的变化率与不确定因素(各行业重复利用率)变化率之比^[24-25],计算不同行业下河南省工业用水重复利用率变化,分析各行业重复利用率的敏感程度。各行业按敏感性系数排序为:火电>石化化工>钢铁>有色金属>造纸>其他>食品>纺织。从敏感性分析结果来看,火电行业重复利用率的影响程度最高,敏感性系数(0.642 8)远远高于其他各行业,提高火电行业的重复利用率可以更好地提升河南省工业用水重复利用率。河南省纺织、食品行业的重复利用率水平相对较低,但这两个行业的敏感程度在各行业中最低,因此对于河南省工业用水重复利用率所造成的实际影响不大。其他行业的敏感程度在各行业中属于倒数第三,但鉴于其他行业的新水量基数较大,2022 年新水量 10.79 亿 m³,占比 50.73%,因此对于河南省工业用水重复利用率的总体提升值也较大,在实际中也需要加以重视。

表 4 敏感性分析计算结果

Tab. 4 Calculation result of sensitivity analysis

行业	基准值/%	不确定因素 取值区间/%	全省新水量 变化范围/亿m ³	全省工业用水重复 利用率变化范围/%	敏感性 系数
火电	97.65	94.67 ~ 98.33	27.96 ~ 19.74	92.30 ~ 94.57	0.642 8
钢铁	98.04	96.92 ~ 98.89	21.67 ~ 20.95	94.03 ~ 94.23	0.103 9
有色金属	95.67	92.07 ~ 98.32	22.01 ~ 20.71	93.94 ~ 94.30	0.058 0
纺织	62.48	0 ~ 96.68	21.54 ~ 21.11	94.07 ~ 94.19	0.000 8
造纸	91.79	88.26 ~ 94.44	21.44 ~ 21.13	94.10 ~ 94.18	0.013 7
石化化工	96.38	87.50 ~ 98.34	26.50 ~ 20.10	92.70 ~ 94.46	0.166 4
食品	63.80	5.19 ~ 89.18	22.65 ~ 20.66	93.76 ~ 94.31	0.004 4
其他	23.89	2.21 ~ 48.89	24.33 ~ 17.72	93.30 ~ 95.12	0.009 9

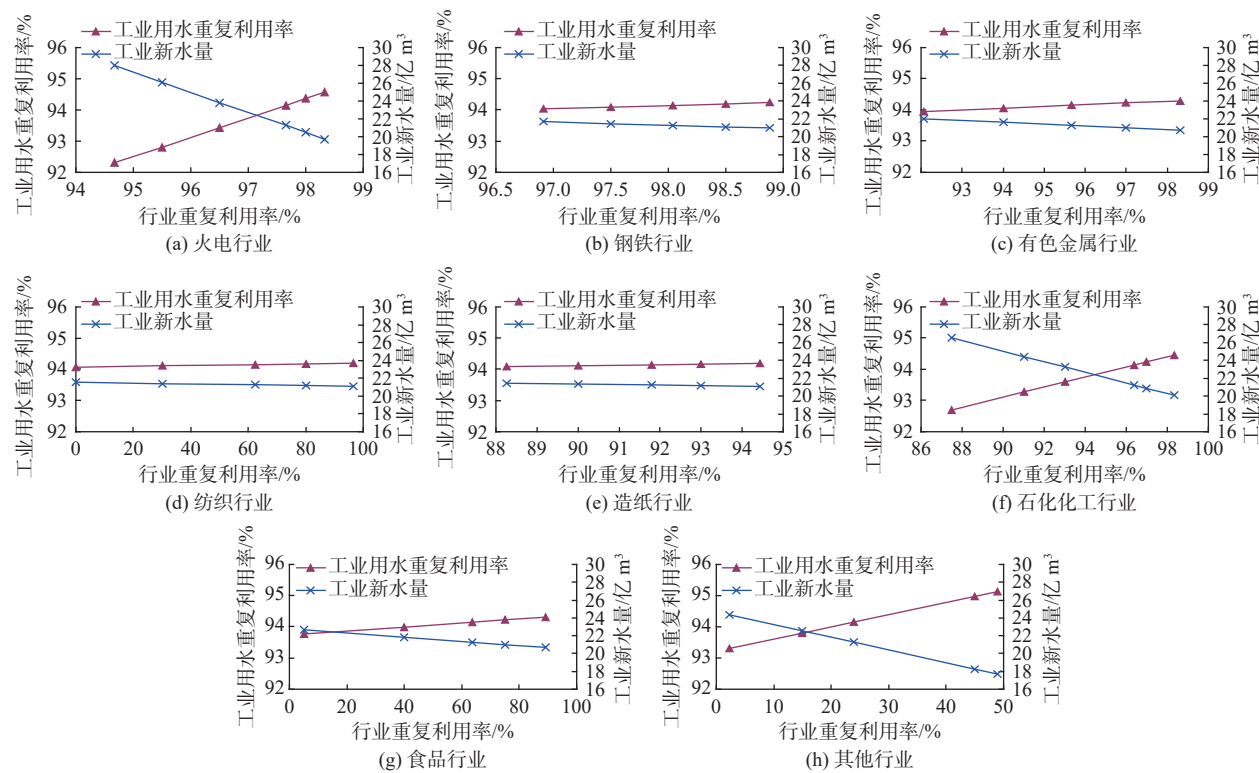


图 5 河南省工业用水重复利用率及新水量随行业重复利用率的变化

Fig. 5 Variation of industrial water recycling rate and water consumption with recycling rate by industry in Henan Province

3.4 提高工业用水重复利用率的节水潜力

根据测算成果及前述分析,以各行业典型企业测算的重复利用率上限值作为目前采取节水技术措施预期可达到的极限值,据此计算出河南省和各市所能达到的极限工业用水重复利用率,进而求出提高工业用水重复利用率的节水潜力,见表 5。

在不考虑工业产业布局、工业用水结构调整的前提下,河南省所能达到的极限工业用水重复利用率为 96.34%,相应的节水潜力为 7.97 亿 m³,节水潜力较为可观。与河南省已有研究相比,许拯民等^[26]提出河南省工业节水潜力为 7.43 亿 ~ 13.27 亿 m³,李佳伟等^[9]估算河南省 2025 年、2035 年工业节水

潜力分别为 1.96 亿、3.45 亿 m³,分析研究结果不一致的原因:许拯民等的研究,是以河南省 18 个市中大于等于某一市万元工业增加值用水量的频率为 50% 和 75% 时为目标(基准年 2011 年)进行的计算;李佳伟等的研究,是以 2018 年为基准年、2025 年和 2035 年为规划年,以万元工业增加值用水量规划值为目标进行的计算;而本文是在 2022 年,仅考虑工业用水重复利用率提高的节水潜力,基于近期可预知的技术水平假设当前所能达到的工业用水重复利用率极限值,计算得出的极限节水潜力^[8]。基准年和预期目标的不一致是研究结果不一致的原因所在。

表 5 工业节水潜力计算结果

Tab. 5 Calculation result of industrial water-saving potential

行政区	现状工业 用水量/ 万 m ³	现状工业 用水重复 利用率/%	预期工业 用水重复 利用率/%	提高工业用水 重复利用率的 节水潜力/万 m ³
郑州市	20 890	92.33	95.17	7 746
开封市	8 560	94.63	96.77	3 413
洛阳市	25 060	91.47	94.51	8 922
平顶山市	20 290	93.26	95.66	7 204
安阳市	12 150	96.36	97.80	4 811
鹤壁市	5 310	95.98	97.53	2 042
新乡市	16 220	94.50	96.71	6 512
焦作市	14 990	94.88	97.06	6 396
濮阳市	7 670	92.71	95.48	2 914
许昌市	8 960	92.22	94.86	3 041
漯河市	6 440	88.32	92.94	2 549
三门峡市	8 550	95.16	97.07	3 378
南阳市	20 830	95.43	96.99	7 089
商丘市	8 420	94.00	96.30	3 218
信阳市	6 790	95.07	96.64	2 156
周口市	7 960	93.45	95.98	3 077
驻马店市	6 960	82.89	88.95	2 465
济源示范区	6 560	96.76	98.12	2 744
河南省	212 610	94.15	96.34	79 679

从各城市层面来看, 18 个市的节水潜力在 0.20 亿 ~ 0.89 亿 m³, 按节水潜力排序为洛阳、郑州、平顶山、南阳、新乡、焦作、安阳、开封、三门峡、商丘、周口、许昌、濮阳、济源、漯河、驻马店、信阳、鹤壁, 大致上河南省中部偏西的一些城市工业用水重复利用率提高的节水潜力较大, 东部豫东平原和淮河上游区的城市节水潜力较小。节水潜力最大的洛阳和郑州, 也是河南省工业水平最高的市, 2022 年 2 市的工业增加值分别为 1 978.3 亿元和 3 533 亿元, 占全省工业增加值的比例分别为 10.1% 和 18.0%, 工业相对发达、工业用水量较大, 但工业用水重复利用率相对较低, 是这两市节水潜力较大的原因; 节水潜力最小的鹤壁和信阳, 各方面则刚好相反。总的来说, 提高工业用水重复利用率的节水潜力与水资源条件的关系不大, 主要受工业用水结构、工业经济发展水平等的影响。

4 结论

工业用水重复利用率的测算, 最终目的是了解

工业水重复利用情况, 从而有针对性地提高水的重复利用, 节约工业用水。本文在用水统计对工业企业用水全覆盖的基础上, 结合典型企业测算数据, 提出一种区域工业用水重复利用率测算方法, 并以河南省为例加以验证, 结果显示测算方法适用于区域工业用水重复利用率测算, 测算结果符合河南省实际。

河南省 2022 年工业用水重复利用率为 94.15%, 各市在 82.89% ~ 96.76%, 河南省整体水平较高, 但各市之间差异显著。区域工业用水重复利用率水平受当地用水结构及行业重复利用率水平的制约, 高重复利用率的行业用水量占比越大, 区域工业用水重复利用率水平越高。

各行业之中, 火电、钢铁、有色金属、造纸、石化化工行业的重复利用率水平较高, 纺织、食品和其他行业水平较低。从敏感性分析来看, 火电行业对河南省工业用水重复利用率的影响程度最高, 纺织、食品行业最低。提高行业重复利用率, 是提高河南省工业用水重复利用率、节约工业用水的有效方法。纺织、食品行业是提升行业重复利用率的重点, 火电行业是提升省、市重复利用率的重点。

预测工业用水重复利用率提高的节水潜力, 可进一步明晰工业用水重复利用率对于工业节约用水的作用。在仅考虑工业用水重复利用率提高的情况下, 河南省工业节水潜力为 7.97 亿 m³, 各市在 0.20 亿 ~ 0.89 亿 m³, 全省工业节水潜力较为可观。

参考文献:

- [1] 刘创, 刘家宏, 丁相毅, 等. 北京市工业耗水演变分析及模型研究 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 427-434. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0043.
- [2] 胡霞, 程亮, 王宗志, 等. 工业用水效率全过程驱动因子识别模型 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 201-208. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0077.
- [3] 曹荣, 王仁雷, 衡世权, 等. 大型火电厂全厂水平衡试验与深度优化用水分析 [J]. 能源与节能, 2022(12): 43-45. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2022.12.026.
- [4] 陈晓成. 化工企业水平衡测试实践分析 [J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(7): 80-84. DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.07.17.
- [5] 杨会玲, 董廷尉, 杨爱民, 等. 纺织印染企业的水重复利用率研究 [J]. 染整技术, 2020, 42(7): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9350.2020.07.008.
- [6] 蔡琼瑜, 马坤茹, 姜晓东, 等. 河北省某啤酒酿造企业水平衡测试及节水措施分析 [J]. 给水排水, 2023,

- 59(6): 44-50. DOI: [10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.12.04.0002](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.12.04.0002).
- [7] 王会容, 颜志俊. 四川省乐至县水资源供需预测与合理配置研究 [J]. *水科学与工程学报*, 2023(5): 9-11. DOI: [10.19733/j.cnki.1672-9900.2023.05.03](https://doi.org/10.19733/j.cnki.1672-9900.2023.05.03).
- [8] 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](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0003).
- [9] 李佳伟, 水森, 左其亭, 等. 区域节水潜力计算方法及河南省节水潜力评估 [J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 141-146. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2020619](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2020619).
- [10] 刘秋丽. 山西省用水指标及节水潜力分析 [J]. *水资源开发与管理*, 2020, 6(9): 12-16. DOI: [10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2020.09.03](https://doi.org/10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2020.09.03).
- [11] 张旭, 张建云, 敖天其, 等. 中国工业用水演变驱动因素分析 [J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4520-4528. DOI: [10.13227/j.hjkk.202307159](https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202307159).
- [12] 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. DOI: [10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.008](https://doi.org/10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.008).
- [13] 王文川, 李磊, 徐冬梅. 基于博弈论可变集模型的节水型社会建设评价 [J]. *人民长江*, 2020, 51(4): 117-121. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.019](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.019).
- [14] 胡晓霁, 唐漂, 刘亚慧, 等. 工业用水价格杠杆的有效性: 基于联立方程模型 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 413-424. DOI: [10.31497/zrzyxb.20200213](https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20200213).
- [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](https://doi.org/10.19807/j.cnki.DXS.2020-05-033).
- [16] 郝春沣, 仇亚琴, 卢琼, 等. 用水统计调查制度实施情况及数据应用前景 [J]. *水利发展研究*, 2022, 22(5): 59-62. DOI: [10.13928/j.cnki.wrdr.2022.05.012](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrdr.2022.05.012).
- [17] 李姣, 王超. 云南用水统计调查方法与实践 [J]. *水资源开发与管理*, 2021(11): 19-22. DOI: [10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2021.11.04](https://doi.org/10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2021.11.04).
- [18] 向扬, 李治军. 基于改进 TOPSIS 模型的山西省水资源承载力与协调发展分析 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2024, 55(4): 48-58. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2024.04.005](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2024.04.005).
- [19] 任江楠, 吕小瑜, 李伟峰, 等. 京津冀城市群虚拟水流动格局变化对区域水资源压力的影响 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2024, 55(6): 148-158. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2024.06.012](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2024.06.012).
- [20] 唐晓灵, 李竹青. 区域工业用水效率及节水潜力研究: 以关中平原城市群为例 [J]. *生态经济*, 2020, 36(10): 134-140.
- [21] 刘柏君, 侯保俭, 王林威, 等. 青海省西宁海东地区节水潜力与节水对策研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(增刊 1): 65-70. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2020039](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2020039).
- [22] 王森, 刘琛, 邢帅杰. K-means 聚类算法研究综述 [J]. *华东交通大学学报*, 2022, 39(5): 119-126. DOI: [10.16749/j.cnki.jecjtu.20220914.001](https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20220914.001).
- [23] 崔欣宇, 宋霞飞, 周晨静. 交织区微观交通仿真模型参数敏感性分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27): 11854-11861. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2023.27.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2023.27.044).
- [24] 张雨山, 王双银, 臧聪敏, 等. 基于原型观测的输水渠道糙率取值及变化分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(1): 24-29. DOI: [10.3880/j.issn.1006-7647.2021.01.004](https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2021.01.004).
- [25] 蔡元芳, 董苇, 易晓丽, 等. 鄂北地区水资源配置工程供水水价影响因素研究 [J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(11): 60-63. DOI: [10.16867/j.issn.1673-9264.2021122](https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2021122).
- [26] 许拯民, 刘中培, 宋全香. 河南省工业用水效率及节水潜力研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 154-158. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.06.035](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.06.035).

Calculation and analysis of industrial water recycling rate in Henan Province based on water use statistics

WANG Min¹, ZHANG Yushun¹, QIU Xinqiang², YANG Haochen², WANG Yanping², TAO Jie³

(1. Henan Provincial Water Conservancy Technology Application Center, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Keda Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

3. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The industrial water recycling rate is an important index to reflect industrial water use efficiency, industrial water saving degree, and to evaluate industrial water recycling. To comprehensively comprehend the recycling situation, the calculation and analysis of the recycling rate of industrial water is helpful. It is of great significance to predict the potential of industrial water saving, improve the level of industrial water saving and promote the sustainable development of industry. Currently, the research on industrial water recycling rate mainly focuses on the calculation of enterprise water recycling rate and the utilization of industrial water recycling rate, but

lacks the research on the calculation method of regional water recycling rate. The statistical survey currently analyzes the water use in our country has basically achieved the comprehensive coverage of self-provided water source industrial enterprises and improved the quality of industrial water data. Based on this, the calculation of industrial water recycling rate will be more reasonable and reliable.

A calculation method of the recycling rate of regional industrial water was proposed based on the water use statistics survey in Henan Province. The industrial water consumption of various industries in each city was obtained by classifying and calculating the water consumption of different sources. The quantity of recycled water of different industries in each city was calculated according to the recycling rate of various industries using typical enterprises. Finally, the industrial water recycling rate of each city and Henan Province was calculated. The results were then analyzed from the aspects of industry level, spatial distribution, sensitivity and water-saving potential. *K*-means clustering method was used to analyze the spatial distribution characteristics of industrial water recycling rate in Henan Province. The influence of each industry on the industrial water recycling rate in Henan Province was studied by single factor sensitivity analysis. Industrial water-saving potential was predicted.

Based on the data of 2022, the industrial water recycling rate of Henan Province was calculated and analyzed. The results showed that the recycling rate of industrial water was 94.15% in Henan Province, 82.89% to 96.76% in various cities, and 23.89% to 98.04% in different industries. The overall level of industrial water recycling in Henan Province was higher, while there were significant differences among the cities. The thermal power industry had the highest impact on the recycling rate of industrial water in Henan Province, meanwhile the level of textile, food and other industries were lower. And the water-saving potential of improving the recycling rate of industrial water was 797 million cubic meters, which was considerable.

The calculation method is suitable for the calculation of regional water recycling rate. The level of regional water recycling rate is restricted by the local water structure and the level of industrial recycling rate. The higher the proportion of water used by industries with high recycling rate, the higher the level of regional water recycling rate. Among various industries, the textile and food industries are the focus of improving the industrial recycling rate, and the thermal power industry is the focus of improving the water recycling rate of Henan Province and various cities. The calculated results are consistent with the actual situation of Henan Province, and can provide reference for the Henan Province to strengthen industrial water-saving management and improve industrial water use efficiency.

Key words: recycling rate; water use statistics; calculation method; *K*-means clustering; sensitivity analysis; water-saving potential