

基于熵权-CRITIC 耦合赋权法的北京市地下水超采综合治理效果评价

张梦琳^{1,2}, 杨 涛^{1,2,3}, 杨 卓⁴, 张 涛⁴, 戴月星桐^{1,2,3}, 李炳华^{1,2}, 杨默远^{1,2},
吴 霞^{1,2}, 刘翠珠⁵, 和继军³

(1. 北京市水科学技术研究院; 2. 城市地下水监测预警与安全防护北京市重点实验室;
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院; 4. 北京市水资源调度管理事务中心; 5. 北京市水文总站)

摘要:为科学量化北京市地下水超采综合治理效果,利用 2018—2024 年水文气象数据、地下水动态数据、治理措施等资料,构建了包含 13 项核心指标的评价指标体系,对比了分别基于 AHP-GRA 主客观结合赋权法和熵权-CRITIC 双客观耦合赋权法的评价结果,并采用最大信息系数验证了两种赋权方法的适用性。结果表明:熵权-CRITIC 法为更优方法,其耦合权重分布均衡,变异系数为 0.11,基于该方法得到的综合评价指数与综合治理影响地下水位变幅的最大信息系数达 0.60,评价结果更贴合实际;“控、管、节、调、换、补”六大治理维度成效分化显著,“换”维度波动最大,“节”维度呈边际递减特征,“补”维度持续增长;综合治理效果呈 3 阶段演化特征,2019 年受政策驱动综合评价指数达峰值 1.54,2020—2022 年降至谷值 0.85,2023—2024 年回升至 0.93,接近基准年(2018 年)水平。

关键词:地下水超采综合治理;熵权-CRITIC 耦合赋权;层次分析;灰色关联分析;北京市

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0090-09

Evaluation of comprehensive management effectiveness of groundwater over-exploitation in Beijing based on entropy weight-CRITIC coupled weighting method//Zhang Menglin^{1,2}, Yang Tao^{1,2,3}, Yang Zhuo⁴, Zhang Tao⁴, Dai Yuexingtong^{1,2,3}, Li Binghua^{1,2}, Yang Moyuan^{1,2}, Wu Xia^{1,2}, Liu Cuizhu⁵, He Jijun³ (1. *Beijing Water Science & Technology Institute*; 2. *Beijing Key Laboratory of Urban Groundwater Monitoring, Early Warning and Safety Control*; 3. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University*; 4. *Beijing Water Resources Dispatching and Management Affairs Center*; 5. *Beijing Hydrological Station*)

Abstract: To scientifically quantify the comprehensive management effectiveness of groundwater over-exploitation in Beijing, this research constructed an evaluation index system consisting of 13 core indicators by using hydrometeorological data, groundwater dynamics data, and management measure data from 2018 to 2024. The evaluation results of the AHP-GRA-based subjective-objective integrated weighting method and the entropy weight-CRITIC dual-objective coupled weighting method were compared, and the maximum information coefficient was utilized to verify the applicability of the two weighting methods. The results indicated that the entropy weight-CRITIC method was identified as the optimal method, which yielded evenly distributed coupled weights with a coefficient of variation of 0.11. The maximum information coefficient between the comprehensive evaluation index calculated via the entropy weight-CRITIC method and the groundwater level variation amplitude affected by comprehensive management reached 0.60, demonstrating that its evaluation results were more consistent with actual conditions. Significant differences in effectiveness were observed among the six governance dimensions including water control, management, conservation, regulation, replacement and recharge. The replacement dimension exhibited the most drastic fluctuation, the conservation dimension showed a marginally diminishing trend, while the recharge dimension maintained a continuously increasing tendency. The comprehensive management effectiveness evolved in three distinct stages: driven by policies, the comprehensive evaluation index peaked at 1.54 in 2019; it declined to a trough value of 0.85 during 2020-2022, and rebounded to 0.93 during 2023-2024, approximating the level of the baseline year (2018).

基金项目:京津冀环境综合治理国家科技重大专项项目(2025ZD1205600);国家重点研发计划项目(2025YFC3215100)

作者简介:张梦琳(1991—),女,高级工程师,博士,主要从事地下水资源保护研究。E-mail:mlzhang199109@163.com

通信作者:杨卓(1977—),男,正高级工程师,主要从事水文水资源及地下水管理研究。E-mail:8014844@qq.com

地下水是北京市供水体系的核心组成部分,兼具资源保障功能与生态调节价值,其可持续利用直接关乎北京市城乡供水安全、经济社会高质量发展及河湖生态系统稳定^[1]。然而,长期超采引发了地下水位下降、地面沉降等一系列生态环境问题,对区域生态和地质安全构成严峻挑战^[2-4]。为解决地下水超采问题,自2019年起,北京市相继落实《华北地区地下水超采综合治理行动方案》《北京市地下水超采综合治理实施方案(2023—2025年)》等一系列专项政策,通过系统性治理取得了显著成效,平原区平均地下水位自2015年止跌回升后,连续9年累计回升13.49 m,严重超采区面积从2015年的3 113 km²减少至0^[5]。地下水超采治理是涉及“控、管、节、调、换、补”多环节的复杂系统工程^[6-7],各环节相互关联、交叉影响^[8-9]。对地下水超采治理效果进行评价能够量化治理措施的实际成效,为后续治理策略的优化调整提供依据。许多学者围绕评价指标体系构建开展了研究,从目标成效、措施落实、管理保障等维度搭建评价框架,采用层次分析(AHP)法、灰色关联分析(GRA)等方法,提升了评价结果的系统性与科学性^[10-13]。例如:杜明亮等^[14-15]从5个核心维度构建了评价指标体系,量化了巴州地下水治理成效;雷米等^[16-18]选取地下水位回升率、水质改善度、水量变化等指标,建立了适用于库尔勒市超采区的综合治理效果评价模型。尽管现有研究已取得一定进展,但针对地下水超采综合治理的评价仍存在优化空间:一是现有评价多侧重静态指标,对治理工作的动态效应关注不足;二是缺乏不同赋权方法的对比分析,难以验证各种赋权法的适用性。

权重确定作为综合治理效果评价的核心环节,直接决定评价结果的准确性与可靠性^[19]。现有权重计算方法分为主观赋权法、客观赋权法及组合赋权法3类^[20]。主观赋权法依赖研究者主观判断,缺乏统一标准与客观性;客观赋权法在处理复杂系统多指标问题时,易受数据信息不完全或不确定性的限制^[21-23];组合赋权法通过融合主观与客观赋权的优势,更全面地反映评价指标特性,能够显著提升评价结果的可信度^[24]。但现有组合赋权法中,主观与客观权重的耦合系数设定缺乏统一规范,仍存在主观干扰风险^[25]。而双客观赋权法通过引入两个独立的客观数据源,直接从数据本身提取权重,能够有效规避主观判断的影响,在复杂系统多指标评价中展现出更强的科学性与准确性^[26]。

鉴于此,本文利用水文气象数据、地下水动态数据、治理措施等资料,构建北京市地下水超采综合治理效果评价指标体系,对比AHP-GRA的主客观结合赋权法(以下简称“AHP-GRA法”)与熵权与基于指标相关性的指标重要性评价(CRITIC)耦合的双客观赋权法(以下简称“熵权-CRITIC法”),筛选更适配北京市地下水超采治理效果的评价方案,以期为区域地下水资源精细化管理与治理成效优化提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北京市地处华北平原北端,东、西、北三面靠山,东南为缓倾平原,地形呈现西北高、东南低的特征。全市总面积约1.64万km²,其中平原区(不包括延庆盆地)面积约6 400 km²^[27],是本文地下水超采综合治理的核心评价范围(图1)。北京市属温带半湿润大陆性季风气候,平原区多年平均降水量为569 mm,降水时空分布极不均衡,80%以上集中在汛期6—9月,降水的季节性波动直接影响地下水补给过程^[28-29];区域内河网密集,由西向东依次分布大清水系、永定河水系、北运河水系、潮白河水系及蓟运河水系,五大水系为地下水补给提供了重要的水文基础^[30]。

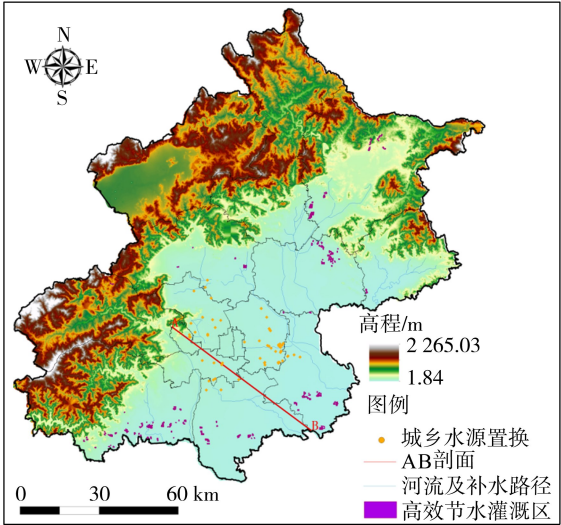


图1 北京市地下水超采治理措施分布

Fig. 1 Distribution of management measures for groundwater over-exploitation in Beijing

北京市的平原区主要由永定河、潮白河、沟河、温榆河、拒马河等河流的冲洪积作用形成,多个冲洪积扇交错沉积、相互切割。图2为北京市山区至平

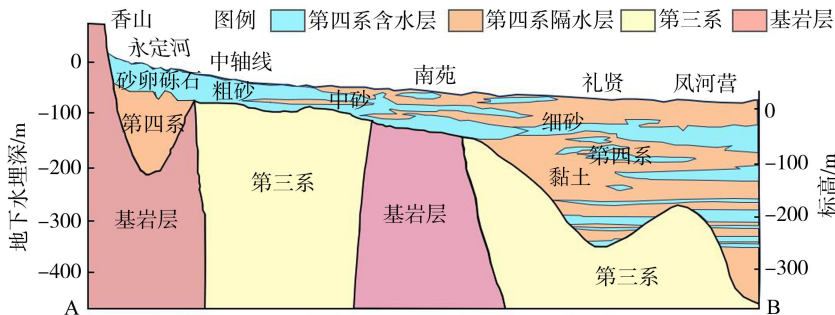


图2 北京市典型水文地质剖面

Fig. 2 Typical hydrogeological profile in Beijing

原区方向的典型水文地质剖面(图1中AB剖面)。由图2可见,从山前至下游其浅部含水层由单层结构变为多层结构,含水层厚度由10 m左右增加到100 m以上,含水层岩性由粗砂砾石逐渐变为细砂与黏土互层,地下水埋深逐步减小,地下水类型也从单一潜水过渡为多层承压水,这种水文地质结构直接影响地下水的赋存、运移及超采治理的实施效果^[31-32]。第四系地下水的补给来源主要是降水入渗补给,其次是山区侧向补给、农田灌溉补给、河湖入渗补给及城市管网渗漏补给等。地下水流动的总趋势是从冲洪积扇顶部到前缘进入平原区,即由西北向东南流动。山前地带径流条件好,动态变化大,向冲洪积扇中下部逐渐变弱。地下水排泄包括自然消耗和人工开采,其中自然消耗包括地下水溢出、潜水蒸发、地下水侧向流出等。

1.2 数据来源

本文使用数据包括2018年1月至2024年12月的水文气象数据、地下水动态数据、水资源开发利用及治理措施等13项资料。其中,地下水埋深数据来源于地下水位自动监测站,其分布覆盖平原区主要超采治理区域;降水量数据来源于研究区内及周边雨量站,采用泰森多边形法插值计算;河湖生态补水量逐日数据来源于研究区内水文站;计划用水量数据来源于北京市年度生产生活用水计划及水资源配置方案;地下水开采量、实际用水量、节水、调水、水源置换、海绵城市建设等治理措施资料来源于2018—2024年《北京市水务统计年鉴》。

2 地下水超采综合治理效果评价

2.1 评价指标体系构建

基于目标、准则、指标3层递阶框架,结合北京市地下水超采治理“控、管、节、调、换、补”的综合施策逻辑,构建评价指标体系,如图3所示。其中,指标选择基于可获取性、独立性、代表性、可量化性原则。

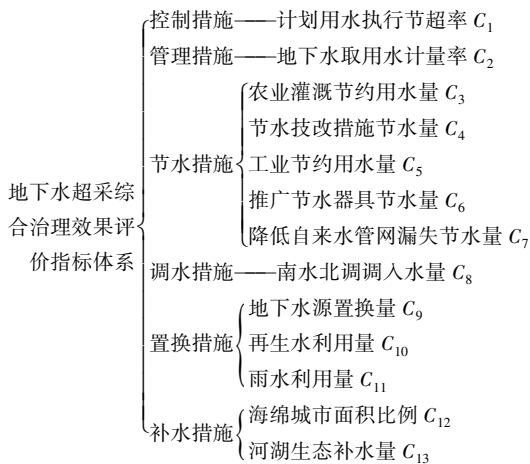


图3 评价指标体系

Fig. 3 Evaluation indicator system

2.2 赋权方法与综合评价指数计算

a. AHP 法权重确定。邀请领域专家采用1~9标度法,对同层次指标进行两两比较,构造判断矩阵;求解判断矩阵的最大特征值对应的特征向量,归一化后得到各指标的初始权重,并进行一致性检验,一致性比率小于0.1即判断矩阵合理,此时初始权重即为AHP法权重,具体计算方法见文献[33]。

b. GRA 法权重确定。对指标数据进行标准化处理,构建评价矩阵;以各指标的最优值(正向指标取最大值,负向指标取最小值)构成参考序列,计算每个评价对象指标序列与参考序列的灰色关联系数,进而计算各指标的灰色关联度,归一化后得到GRA法权重,具体计算方法见文献[34]。

c. 熵权法权重确定。对指标数据进行标准化处理,计算各评价对象内部不同指标的特征占比,计算指标的信息熵值;熵值越小,说明这个指标的数据离散程度越大、包含的有效信息量越多;用1减去熵值得到差异系数,差异系数越大权重越高,将指标的差异系数归一化,即得到熵权法权重,具体计算方法见文献[22]。

d. CRITIC 法权重确定。对指标数据进行标准化处理,计算指标的标准差及各指标之间的相关系数,判断指标之间信息重叠、互相冲突的程度;结合

标准差和相关系数计算各指标的信息量,指标值波动越大、与其他指标重叠越少,信息量越大;将指标的信息量归一化,即得到 CRITIC 法权重,具体计算方法见文献[24]。

e. AHP-GRA 法是将 AHP 法权重与 GRA 法权重进行耦合,得到耦合权重;熵权-CRITIC 法是将熵权法权重与 CRITIC 法权重进行耦合,得到耦合权重。耦合过程采用博弈论耦合模型^[23],目标是使耦合权重与单个权重的偏差最小化,计算公式为:

$$w_j = (w_{ej} + w_{cj}) / \left[2 - \sum_{j=1}^n (w_{ej} + w_{cj}) \right] \quad (1)$$

式中: w_j 为指标 j 的耦合权重; n 为指标数量; w_{ej} 为指标 j 的 AHP 法权重或熵权法权重; w_{cj} 为指标 j 的 GRA 法权重或 CRITIC 法权重。

f. 采用线性加权法计算北京市地下水超采综合治理效果评价指数(以下简称“综合评价指数”),计算公式为:

$$Z_i = \sum_{j=1}^n w_j X_{ij} \quad (2)$$

式中: Z_i 为评价对象 i 的综合评价指数; X_{ij} 为评价对象 i 中指标 j 的标准化指标值。 $w_j X_{ij}$ 为评价对象 i 中指标 j 的评价指数。

3 赋权方法的对比与选择

3.1 赋权方法对比

3.1.1 基于两种赋权方法的权重分布

图 4 为基于两种赋权方法的指标耦合权重分布对比。由图 4 可见,基于 AHP-GRA 法的耦合权重分布呈显著不均衡特征,变异系数达 0.62。其中,河湖生态补水量(0.24)、南水北调调入水量(0.15)、海绵城市面积比例(0.10)3 项指标耦合权重合计占比 49%,而降低自来水管网漏失节水量耦合权重仅 0.04,指标间耦合权重最大差值为 0.20。这种差异源于专家主观判断的偏好性,导致“补”“调”类工程措施权重被过度放大,而“节”“管”

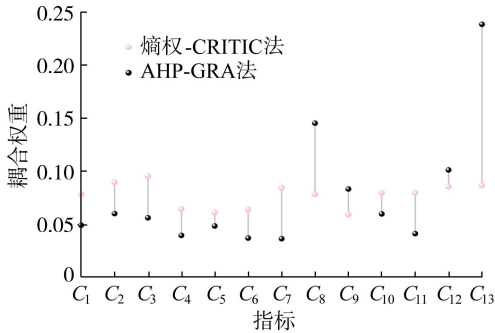


图 4 基于两种赋权方法的指标耦合权重分布对比
Fig. 4 Comparison of indicator coupling weight distribution based on two weighting methods

“控”类基础措施的贡献被低估,降低了评价结果的客观性与普适性,在不同区域或综合治理的不同阶段需重新组织专家打分,增加了评价成本。基于熵权-CRITIC 法的耦合权重分布较为均衡,变异系数仅为 0.11,耦合权重值范围为 0.06~0.09,最大差值为 0.03。除节水技改措施节水量(0.07)、工业节约用水(0.06)、推广节水器具节水量(0.06)、地下水置换量(0.06)4 项指标耦合权重略低外,其余 9 项指标耦合权重均处于 0.08~0.09 的合理区间,各指标对综合治理效果的边际贡献得到客观体现。可见,基于熵权-CRITIC 双客观耦合赋权法的耦合权重源于对数据的客观统计,无主观干扰,具有更强的可解释性与普适性。

3.1.2 基于两种赋权方法的综合评价指数

分别基于 AHP-GRA 法、熵权-CRITIC 法对 2018—2024 年北京市地下水超采综合治理效果进行评价,以 2018 年为基准年,其综合评价指数设为 1,得到 2019—2024 年基于 AHP-GRA 法的综合评价指数分别为 1.77、1.29、1.26、1.07、1.06、1.11,基于熵权-CRITIC 法的综合评价指数分别为 1.54、1.16、1.08、0.85、0.88、0.93。可见基于两种赋权方法的评价结果变化趋势基本一致,均呈先升后降再缓升的趋势,但基于 AHP-GRA 法的综合评价指数值整体显著高于熵权-CRITIC 法。基于 AHP-GRA 法的结果均大于 1,与实际不符;基于熵权-CRITIC 法的结果反映出治理措施的积极成效,也体现了 2022 年前后综合治理效果减弱,更贴合实际。

图 5 为 2018—2024 年基于两种赋权方法的单指标评价指数热力图。由图 5 可见,基于熵权-CRITIC 法的结果中各指标评价指数年度差异更清晰,补给类指标评价指数总体呈波动上升趋势;降低自来水管网漏失节水量、节水灌溉面积节水量等部分节水类指标评价指数在 2024 年高于 2023 年,而工业节约用水量等个别指标则出现回落;基于 AHP-GRA 法的评价结果受高权重指标主导,降低自来水管网漏失节水量等低权重指标的年度变化被掩盖,辨识度较低。究其原因,主要由权重失衡导致,2019 年,河湖生态补水量、地下水置换量等高权重指标评价指数显著上升,直接拉高了当年的综合评价指数,而忽略了其他措施的实际效果;熵权-CRITIC 法的耦合权重均衡,各指标评价指数的正向与负向波动相互抵消,得到的综合评价指数更能反映治理措施的综合效应。

3.2 赋权方法选择

3.2.1 地下水超采综合治理效果的量化

采用降水量-水位响应系数表征作为自然因素

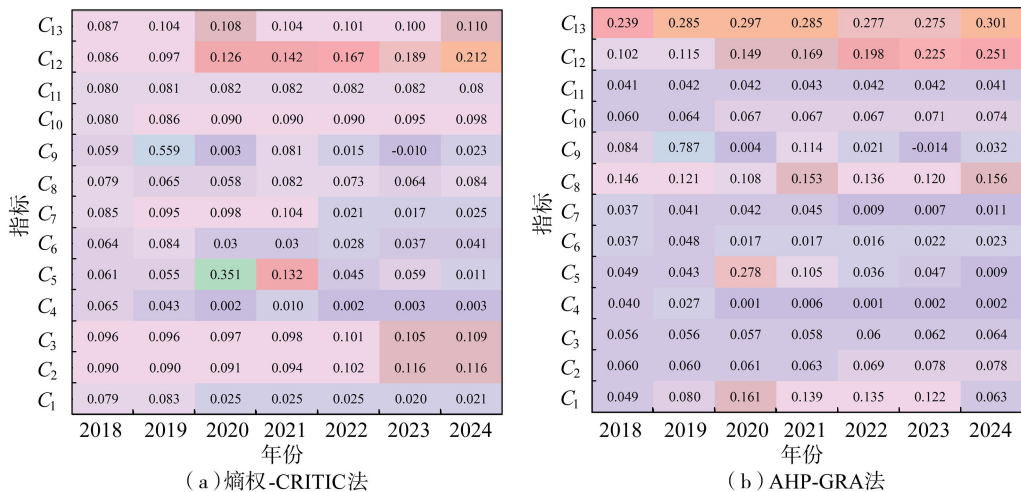


图5 2018—2024年基于两种赋权方法的各指标评价指数热力图

Fig. 5 Heat maps of each indicator's evaluation index based on two weighting methods from 2018 to 2024

的降水量对地下水位变幅的影响程度,计算公式为:

$$\alpha = P/\Delta H \quad (3)$$

式中: α 为降水量-水位响应系数; P 为降水量; ΔH 为地下水位变幅。

图6为2018—2024年北京市降水量与地下水位变幅。本文认为基准年(2018年)地下水超采综合治理措施未实施,干扰因素较少,其地下水位变化完全由作为自然因素的降水量引起。在此基础上,计算综合治理影响地下水位变幅,用于量化北京市地下水超采综合治理效果,其计算公式为:

$$\Delta H_{z,k} = \Delta H_k - \alpha_b P_k \quad (4)$$

式中: $\Delta H_{z,k}$ 为第 k 年的综合治理影响地下水位变幅; ΔH_k 为第 k 年的地下水位变幅; P_k 为第 k 年降水量; α_b 为基准年降水量-水位响应系数。2018年降水量为590 mm,年末与年初地下水位变幅为1.94 m,因此本文 $\alpha_b = 0.003 \text{ m/mm}$ 。

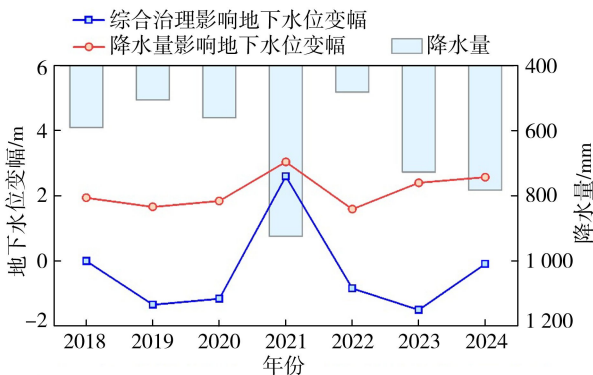


图6 2018—2024年北京市降水量与地下水位变幅

Fig. 6 Precipitation and groundwater level variation in Beijing from 2018 to 2024

2019—2024年北京市地下水超采综合治理影响地下水位变幅分别为-1.34、-1.16、2.60、-0.84、-1.50、-0.09 m。综合治理影响地下水位变幅为负

值,说明该阶段综合治理措施的效果尚未完全抵消地下水的耗损;2021年综合治理影响地下水位变幅达到研究期内的最大值,体现了综合治理措施与降水补给的协同效应;2024年综合治理影响地下水位变幅接近0,表明综合治理措施已基本抵消地下水耗损,治理效果趋于稳定。

3.2.2 基于综合治理影响地下水位变幅的赋权方法选择

采用最大信息系数能分析两组时序变量间的非线性依赖关联,识别变量间线性与复杂非线性协同变化特征。其取值范围为0~1,越接近1代表两个变量依赖程度越强^[35-37]。本文采用最大信息系数对2018—2024年北京市分别基于AHP-GRA法、熵权-CRITIC法计算的综合评价指数序列与综合治理影响地下水位变幅序列进行分析,得到最大信息系数分别为0.5、0.6。由此可见,熵权-CRITIC法优于AHP-GRA法,基于熵权-CRITIC法的评价结果更能反映北京市地下水超采综合治理效果。因此,选择熵权-CRITIC法进行耦合赋权,开展北京市地下水超采综合治理效果评价。

4 评价结果分析

4.1 基于单因子评价指数的分析

单因子评价指数直接反映北京市各类地下水超采综合治理措施的实施强度与直接成效,按“控、管、节、调、换、补”六大治理维度分类解析。

a. “控”维度聚焦地下水取用水总量控制。核心指标为计划用水执行节超率,直接体现用水总量的刚性约束效果。该指标评价指数在2019年达到峰值0.083,随后大幅回落至0.020~0.025并长期稳定,变异系数0.62,呈现“政策初期冲高、后期趋稳”的特征。究其原因,2019年《北京市地下水超采

《综合治理行动方案》实施初期,以压减地下水开采量为核心目标,对工业、农业等高耗水领域强化用水总量管控,2020 年工业用水总量较 2019 年下降了 12.9%、农业用水总量下降了 12.5%,推动计划用水执行节超率评价指数冲高;2020 年后,随着经济复苏与民生用水刚性需求增加,用水总量控制的弹性空间缩小,其评价指数稳定在合理区间。

b. “管”维度侧重取用水全流程监管。核心指标为地下水取用水计量率,是精准管控的技术支撑。该指标评价指数从 2019 年持续增长,2023 年起取用水计量率达到 100%,2024 年北京市完成农业灌溉机井“以电折水”计量改造试点,非农取水口实现水表全覆盖,在非农取水精细化监管领域处于全国领先水平。

c. “节”维度覆盖农业、工业、生活三大领域。核心指标含农业灌溉节约用水量、工业节约用水量等。指标评价指数呈“前稳后降”变化趋势,2022—2024 年多数指标低于基准年,贡献趋缓。农业上,2024 年新增高效节水设施 47.33 km²,累计 466.67 km²,平原区覆盖率超 95%,成效稳健;工业用水重复率超 95%,万元 GDP 用水量 8.45 m³,但技术潜力趋近饱和;全市公共管网漏损率降至 8.44%。

d. “调”维度核心为南水北调调入水量。南水北调工程通过跨区域调水补充水资源缺口,指标评价指数呈波动回升趋势,2024 年南水北调调入水量达 12.78 亿 m³,创历史新高,直接推高指标评价指数至 0.084。南水北调中线工程已连续超额完成调水任务,为回补提供充足水源。

e. “换”维度聚焦地下水源替代。核心指标为地下水源置换量,通过地表水厂供水、再生水利用替代地下水开采。指标评价指数波动最为显著,2019 年高达 0.559,2021 年回落至 0.081,2023 年降至-0.010,整体稳定性不足。2019 年第十水厂、黄村水厂等地表水厂投产,年置换地下水 0.52 亿 m³,压采能力达 2.48 亿 m³/a,直接推高其评价指数;2023 年受海河“23·7”流域性特大洪水影响,部分区域临时恢复地下水开采,导致置换量下降,置换措施对地表水源保障能力依赖度高。

f. “补”维度包括主动补给与自然入渗提升。核心指标为河湖生态补水量、海绵城市面积比例。指标评价指数整体呈现稳定增长态势,是近期治理成效回升的重要支撑。自 2019 年以来,持续开展大规模生态补水,永定河、潮白河等主要河道生态基流得到保障,河湖入渗补给地下水的作用持续发挥,河湖生态补水量指标评价指数稳定在 0.1 左右。

2024 年建成区海绵城市面积比例达 39.47%,其评价指数持续升至 0.212,累积效应显著。

4.2 基于综合评价指数的分析

4.2.1 综合治理效果的阶段性特征

2019—2024 年北京市地下水超采综合治理效果评价指数呈现“政策驱动高峰—逐步下滑—稳步回升”的 3 阶段演化特征,本质是“控、管、节、调、换、补”六大维度措施协同作用的结果。第一阶段(2019 年)为六大维度协同冲高期,综合评价指数达最高值 1.54。主要原因包括:①政策红利释放,《北京市地下水超采综合治理行动方案》明确六大维度措施体系,资源集中投入;②多维度协同发力,“换”(地下水源置换量评价指数 0.559)、“补”(河湖生态补水量 0.104)、“控”(计划用水执行节超率 0.083)、“管”(地下水取用水计量率 0.090)等维度同步冲高,形成治理合力。第二阶段(2020—2022 年)为部分措施乏力导致下滑期,综合评价指数从 1.16 持续降至 0.85(研究期最低),较 2019 年下降 44.8%。主要原因有:①“节”维度潜力饱和(工业、生活节水指标回落);②“换”维度效应衰减(地下水源置换量趋于稳定);③“补”维度短期无突破(海绵城市面积比例指标累积效应未完全显现);④自然约束加剧(2022 年降水量 482 mm,枯水年抵消部分治理成效);⑤边际成本上升(老旧管网改造、深层地下水置换等工程投入产出比降低)。第三阶段(2023—2024 年)为优势措施带动回升期,综合评价指数从 0.88 升至 0.93(仍略低于基准年),回升趋势明确。主要原因有:①“补”维度累积效应(海绵城市面积比例、再生水利用量指标评价指数持续增长);②“调”维度发力(南水北调调入水量评价指数提升);③“管”维度持续赋能(地下水取用水计量率 100%覆盖提供精准支撑),三大维度措施带动综合成效回升。

4.2.2 综合评价指数的影响因素

对综合评价指数与降水量进行相关性分析,皮尔逊相关系数为 0.61,表明北京地下水超采综合治理效果与降水量存在显著联系。丰水年(2021 年、2024 年)降雨补给增强,“补”维度效果被放大,同时缓解“节”“换”维度的压力,推动综合评价指数回升;枯水年(2022 年)自然补给不足,地下水开采需依赖“节”“换”“调”维度措施抵消,治理压力加大,综合评价指数降至最低。

综合评价指数与实际地下水位存在短期变化不同步现象,2019 年综合评价指数最高,实际地下水位回升仅 0.32 m。主要原因包括:①水位响应的滞后性,“补”“换”“调”等维度措施的效果存在一定

的滞后周期,2019 年置换工程效果在 2020—2021 年显现;②多因素叠加影响,实际地下水位是六大维度治理、降雨补给、水文地质条件及长期超采累积效应的综合结果,而综合评价指数仅反映六大维度中人为措施的效果,短期存在差异但长期趋势一致。

综合评价指数的政策驱动存在“拐点效应”。综合评价指数在 2019 年《北京市地下水超采综合治理行动方案》、2023 年《北京市地下水超采综合治理实施方案(2023—2025 年)》实施时均出现显著拐点,表明政策是六大维度统筹协调的核心驱动。文件中明确了各项措施任务及目标,引导地表水厂、南水北调中线扩容、海绵城市等重大工程落地,直接推高对应维度评价指数,是综合评价指数变化的关键变量。

4.2.3 综合治理的优化方向

a. 各治理维度间均衡性不足,应补齐“节”“换”措施短板。“节”维度聚焦生活领域老旧管网改造与新型节水技术推广,探索“管网检漏+智慧节水”模式,挖掘剩余节水潜力;“换”维度构建多水源保障体系,降低单一水源依赖,提升地下水源置换的稳定性。

b. 维度内协同不够,应强化“控-管-调”联动。建立“控总量-精准计量-动态调水”联动机制,基于取用水量数据及时调整调水规模与用水计划,提升治理精准度。

c. 长期可持续性不足,应深化“补-管”长效机制。持续扩大海绵城市建设、河湖生态补水规模,提升地下水补给的稳定性与持续性;基于全流程计量数据,建立治理成效动态评估体系,实时优化六大维度措施强度,降低边际成本。

5 结 论

a. 以 2018—2024 年北京市地下水超采综合治理效果为研究对象,围绕“控、管、节、调、换、补”六大维度构建评价指标体系,对比基于 AHP-GRA 法与熵权-CRITIC 法的评价结果,结果表明基于熵权-CRITIC 法的地下水超采综合治理效果评价更优。

b. 六大治理维度成效分化显著,核心措施贡献特征明确。“换”维度年度贡献波动最大,变异系数 1.86,效果受大型工程进度与突发状况支配;“节”维度整体贡献呈边际递减,工业节水技术潜力饱和;“补”维度指数持续显著增长,凸显生态基础设施的长期累积效应;雨水利用、再生水利用、河湖生态补水措施贡献稳定,成为治理成效的“压舱石”;“控”与“管”维度评价指数差异显著,计划用水执行节超

率评价指数从峰值 0.083 回落至 0.020~0.025,而地下水取用水量计量率达 100%。

c. 北京市地下水超采综合治理效果呈明显的 3 阶段特征。2019 年受《北京市地下水超采综合治理行动方案》政策红利驱动,六大维度协同发力,综合评价指数达峰值 1.54;2020—2022 年综合评价指数持续降至谷值 0.85,核心原因是“节”“换”“补”等措施潜力收敛,边际成本递增,叠加 2022 年降水量偏少造成的自然补给不足;2023—2024 年综合评价指数回升至 0.93,接近 2018 年基准年水平,表明治理进入相对稳定的精细化管理阶段。

参考文献:

[1] 曾子悦,许继军,吴光东,等.南水北调中线一期工程生态效益评估:以北京市为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1168-1178. (Zeng Ziyue, Xu Jijun, Wu Guangdong, et al. Evaluation of ecological services of the first phase of Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project: a case study of Beijing City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1168-1178. (in Chinese))

[2] 贺国平,周东,杨忠山,等.北京市平原区地下水资源开采现状及评价[J].水文地质工程地质,2005,32(2):45-48. (He Guoping, Zhou Dong, Yang Zhongshan, et al. Current status and evaluation of groundwater resources exploitation in the plain area of Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2): 45-48. (in Chinese))

[3] Han Yan, Zhang Xiaoling, Lyu Aifeng, et al. Prediction of the annual variation of groundwater depth and its probability based on MCAR model and copula functions: a case study in Beijing, China [J]. Water Resources Research, 2025, 61(6): e2024WR038238.

[4] 徐腾,王以鹏,叶逾,等.地下水超采管控体系及水量水位双控体系研究进展[J].水资源保护,2024,40(4):27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, Ye Yu, et al. Research Progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))

[5] 李炳华,崔学慧,朱亚雷,等.北京市朝阳区地下水化学特征及其变化规律[J].水资源保护,2012,28(5):7-12. (Li Binghua, Cui Xuehui, Zhu Yalei, et al. Hydrochemical characteristics and change of groundwater in Chaoyang District of Beijing City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(5): 7-12. (in Chinese))

[6] 王建华,陆垂裕.华北地区地下水超采综合治理技术支撑体系探析[J].中国水利,2020(13):19-21. (Wang Jianhua, Lu Chuiyu. Studies on technical support system

- for comprehensive control of groundwater overexploitation in North China[J]. China Water Resources, 2020(13): 19-21. (in Chinese))
- [7] Wang Zhuanlin, Deng Hongbo, Wang Jinxia, et al. Sustainable seasonal land fallowing policy to combat groundwater overdraft in China: insights from a choice experiment[J]. Water Resources and Economics, 2025, 51:100261.
- [8] Zhao Yong, Wang Lizhen, Li Haihong, et al. Evaluation of groundwater overdraft governance measures in Hengshui City, China[J]. Sustainability, 2020, 12(9):3564.
- [9] 于翔,解建仓,姜仁贵,等. 河北省地下水超采治理效果过程化评价[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(4):364-371. (Yu Xiang, Xie Jiancang, Jiang Rengui, et al. Process evaluation for governance effect of groundwater over-exploitation in Hebei Province[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(4):364-371. (in Chinese))
- [10] Okot N, Amadi A N, Kujjo C P, et al. Deciphering prolific zones of groundwater using geospatial techniques and Analytical Hierarchy Process (AHP) in Obbo and Magwi Payams, South Sudan [J]. Journal of African Earth Sciences, 2025, 230:105737.
- [11] 焦玉婷. 基于多层次综合评价法的河道治理工程综合效益评价[J]. 水利科技与经济, 2025, 31(1):124-129. (Jiao Yuting. Comprehensive Benefit evaluation of river governance engineering based on multi-level comprehensive evaluation method[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2025, 31(1):124-129. (in Chinese))
- [12] 李黎,吕洪涛,兰恒星,等. 石窟寺工程地质环境分区与劣化失稳分析[J]. 工程地质学报, 2026, 34(1):304-318. (Li Li, Lyu Hongtao, Lan Hengxing, et al. Analysis of engineering geological environmental zoning and degradation instability of Grotto Temples[J]. Journal of Engineering Geology, 2026, 34(1):304-318. (in Chinese))
- [13] Jibrin A M, Al-Suwaiyan M, Yaseen Z M, et al. New perspective on density-based spatial clustering of applications with noise for groundwater assessment[J]. Journal of Hydrology, 2025, 661:133566.
- [14] 杜明亮,刘全明,吴彬,等. 巴州地下水超采区综合治理成效评估[J]. 新疆农业大学学报, 2021, 44(5):367-374. (Du Mingliang, Liu Quanming, Wu Bin, et al. Evaluation of comprehensive management effect of groundwater over-exploitation area in Bazhou[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(5):367-374. (in Chinese))
- [15] 刘宽,翟家齐,赵勇,等. 面向生态健康的农业节水潜力评价框架[J]. 水资源保护, 2025, 41(6):217-226. (Liu Kuan, Zhai Jiaqi, Zhao Yong, et al. Assessment framework of agricultural water-saving potential for ecological health [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6):217-226. (in Chinese))
- [16] 雷米,周金龙,魏兴,等. 干旱区绿洲城市地下水超采区综合治理评估[J]. 人民黄河, 2021, 43(2):100-105. (Lei Mi, Zhou Jinlong, Wei Xing, et al. Assessment of comprehensive control of groundwater over-exploitation areas of oasis city in arid [J]. Yellow River, 2021, 43(2):100-105. (in Chinese))
- [17] 赵勇,董义阳,翟家齐,等. 考虑生态耗水的干旱区绿洲灌溉用水效率评价指标与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3):78-89. (Zhao Yong, Dong Yiyang, Zhai Jiaqi, et al. A new evaluation indicator and method for oasis irrigation water use efficiency in arid regions considering ecological water consumption [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3):78-89. (in Chinese))
- [18] 潘伯宁,李文轩,徐力刚,等. 苏州河湖系统浮游植物完整性指数构建及水生态健康评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5):73-80. (Pan Boning, Li Wenxuan, Xu Ligang, et al. Construction of phytoplankton index of biotic integrity and evaluation of water ecological health of lake and river systems in Suzhou City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5):73-80. (in Chinese))
- [19] Saidin M S, Lee L S, Marjugi S M, et al. Fuzzy method based on the removal effects of criteria (MEREC) for determining objective weights in multi-criteria decision-making problems[J]. Mathematics, 2023, 11(6):1544.
- [20] Zhao Wenbin, Xiao Changlai, Chai Yunxu, et al. Application of a new improved weighting method, ESO method combined with fuzzy synthetic method, in water quality evaluation of Chagan Lake [J]. Water, 2021, 13(10):1424.
- [21] 周倩,王兰,王甜甜,等. 危险废物资源化技术四维综合评价:以废有机溶剂及含重金属废物为例[J]. 环境工程学报, 2025, 19(3):539-547. (Zhou Qian, Wang Lan, Wang Tiantian, et al. Four-dimensional comprehensive evaluation of hazardous Waste resource utilization technologies: a case study on waste organic solvent and heavy metal contained waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(3):539-547. (in Chinese))
- [22] 廖迎娣,顾忙,崔泽凯,等. 基于博弈论组合赋权法的生态护岸对河流生态系统影响评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4):65-71. (Liao Yingdi, Gu Mang, Cui Zekai, et al. Evaluation of ecological revetment's impact on river ecosystem by combinatorial weighting method based on game theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(4):65-71. (in Chinese))
- [23] 邓乐乐,郭生练,王俊,等. 基于博弈论-云模型的湖北

- 省汉江中下游地区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 200-208. (Deng Lele, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Water resources carrying capacity assessment for Middle-Lower reaches of the Hanjiang River in Hubei Province based on game theory-cloud model[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 200-208. (in Chinese))
- [24] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 兼顾序信息和强度信息的主客观组合赋权法研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(12): 179-187. (Li Gang, Li Jianping, Sun Xiaolei, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighting based on the ordered information and intensity information[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(12): 179-187. (in Chinese))
- [25] Merkepçi H. Impact of the objective attribute weighting on five popular multi-criteria decision-making methods: an empirical study [J]. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering, 2024, 25(3): 456-470.
- [26] 田晨智, 宋敏, 田继伟, 等. 基于组合赋权和 FCE 的指控系统人机交互效能评估方法[J]. 电光与控制, 2024, 31(7): 87-96. (Tian Chenzhi, Song Min, Tian Jiwei, et al. Combination weighting and FCE based evaluation for human-computer interaction effectiveness of command and control system[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(7): 87-96. (in Chinese))
- [27] 姜体胜, 杨忠山, 黄振芳, 等. 北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 33-37. (Jiang Tisheng, Yang Zhongshan, Huang Zhenfang, et al. Tendency and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(4): 33-37. (in Chinese))
- [28] 张伟, 王璇, 孙慧超, 等. 基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 123-132. (Zhang Wei, Wang Xuan, Sun Huichao, et al. Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 123-132. (in Chinese))
- [29] 邹家祥, 段存存, 陈彬, 等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 85-94. (Zou Jiaxiang, Duan Cuncun, Chen Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 85-94. (in Chinese))
- [30] 张宇航, 渠晓东, 彭文启, 等. 北京市河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5478-5489. (Zhang Yuhang, Qu Xiaodong, Peng Wenqi, et al. Health assessment of the stream ecosystem in Beijing [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5478-5489. (in Chinese))
- [31] Wang Shiyu, Ma Zhaohui, Chang Miao, et al. Hydrochemical characteristics and mechanism analysis of shallow groundwater in Beijing Plain Area [J]. Environmental Science, 2025, 46(2): 833-842.
- [32] 罗小林, 尹长文, 张国新, 等. 北京市水环境现状及流域综合治理措施[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 140-146. (Luo Xiaolin, Yin Changwen, Zhang Guoxin, et al. Water environment status and comprehensive management measures of watershed in Beijing [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 140-146. (in Chinese))
- [33] 郭亚雄, 马琼, 张芷豪, 等. 基于层次分析-灰色关联法的某化工园区地下水水质评价分析[J]. 环境保护科学, 2026, 52(2): 165-174. (Guo Yaxiong, Ma Qiong, Zhang Zhihao, et al. Evaluation and analysis of groundwater quality in a chemical industry park based on AHP and grey correlation method [J]. Environmental Protection Science, 2026, 52(2): 165-174. (in Chinese))
- [34] 高泽茂. 基于 AHP-灰色关联分析的既有建筑安全性评价方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [35] Chen Yuan, Zeng Ying, Luo Feng, et al. A new algorithm to optimize maximal information coefficient [J]. PLOS One, 2016, 11(6): e0157567.
- [36] 尚敏, 王殿鹏, 易庆林, 等. 基于最大信息系数法的卧沙溪滑坡变形相关性分析及预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 572-580. (Shang Min, Wang Dianpeng, Yi Qinglin, et al. Research on correlation analysis and Early warning model for Woshaxi landslide deformation based on maximum information coefficient [J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 572-580. (in Chinese))
- [37] Liu Cheng, Yu Shuang. Power transformer fault diagnosis based on MIC feature extraction and INGO-SVM [J]. Engineering Research Express, 2025, 7(4): 045347. (收稿日期: 2025-12-05 编辑: 王芳)