

基于 DEMATEL-ISM 的水资源管理水平 评价及障碍因素识别

李永芳¹, 任苏明², 王富强²

(1. 黄河水利委员会河湖保护与建设运行安全中心, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】为提高区域水资源管理水平, 识别影响水资源管理的障碍因素, 并对目前的管理水平进行评价, 对提高水资源管理水平、保障社会民生具有重要意义。【方法】以济源市为例, 构建了涵盖用水总量、万元 GDP 用水量、水功能区水质达标率等 18 个指标的评价指标体系, 采用改进 TOPSIS 方法进行区域水资源管理水平评价, 识别了影响水资源管理水平的主要障碍因素, 并运用 DEMATEL-ISM 分析主要障碍因素之间的关系。【结果】①在研究期内, 济源市水资源管理水平得分由 2013 年的 0.45 上升到 2021 年的 0.79, 济源市水资源管理水平总体呈上升趋势, 2021 年水资源管理水平处于较好等级。②影响水资源管理水平的主要障碍因素为地下水开发量、万元 GDP 用水量、水资源经费投入和水资源承载力预警机制完善度。③万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量和河流湖库生态激流保障率通过影响用水总量间接影响水资源管理目标。④水资源经费投入对用水总量、地表水供水量、地下水开发量和水资源承载力预警机制完善度均有直接影响且间接影响其他供水量以及人均水资源量。【结论】济源市水资源的开发利用以及提高水资源利用效率仍是水资源管理工作的重点, 要严控水资源开发强度, 完善水资源承载力预警机制。

关键词: 水资源管理; 障碍因素; DEMATEL-ISM; 水资源利用效率

中图分类号: TV213

文献标识码: A

水资源是人类和一切生物赖以生存的重要物质基础。随着社会的快速发展, 水资源紧缺等问题已经成为制约我国经济社会发展的重要因素, 同时, 近年来由人类活动造成的水体污染、过度开发等问题倍增, 可利用的水资源量逐渐减少, 严重影响了经济发展与人民生命安全。因此, 进行水资源管理评价有助于深入理解我国水资源短缺、水环境恶化等问题。

水资源管理不仅是对获取水资源的途径和水资源使用效率进行管理, 而且涵盖了对水生态、水环境、水安全等多方面全过程的协调管理^[1]。国内众多学者针对水资源管理开展了大量的研究, 其中具有代表性的是王浩等^[2]将水资源保护利用管理分为智慧管理、主动管理和被动管理, 认为水资源

管理要从单要素控制转向全面统筹控制。严子奇等^[3]基于模糊聚类方法研究不同年份水资源开发利用红线的适应性管理问题, 发现预报模型可以实现用水的弹性管理。王建华^[4]以经济社会用水需求为出发点, 提出了过程管控与属性管控, 全面地分析了长江流域水生态系统治理存在的问题, 并据此实施了水资源综合管理。刘俊国等^[5]考虑环境流量用水和生态服务耗水的需求, 提出新时期完善水资源管理指标的方法, 通过建立刚性约束保障水资源治理。国外对于水资源管理没有明确提出“三条红线”和“四项制度”, 但 ALJAWAD J Y 等^[6]使用多目标优化算法来解决流域水资源管理复杂和大规模的问题, SALAZAR D 等^[7]认为水资源管理旨在优化水资源管理杠杆, 建立灵活的综合水资源

收稿日期/Received: 2025-06-26

修回日期/Revised: 2025-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2443203, 52279014, 52109085); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102320257); 流域生态水文效应与水安全创新型科技团队培育项目(CXTDPY-3)。

第一作者: 李永芳(1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水资源管理方面的研究。E-mail: 184402563@qq.com。

通信作者: 王富强(1979—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事流域生态水文与水安全、区域水资源规划与管理等方面的研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn。

管理模型为水资源恢复提供建设性动力,最大限度地减少废水排放的环境影响。SHAMS A K 等^[8]通过综合水资源管理与水-能源-粮食对阿富汗水资源管理相关利益者进行研究,编制了水资源可持续管理路线图,明确了政府监管职责。水资源管理水平的提升对于经济发展、环境治理具有重要作用。我国在 2012 年实行了最严格水资源管理制度,对此许多专家学者都开展了大量的工作,但对于水资源管理水平评价的研究相对较少。其中,黄珊等^[9]运用多指标加权综合指数法计算石羊河流域集成水资源管理绩效,整体上实现了提高水资源利用效率和效益的目标。

目前,水资源管理的评价方法常见的有结构分解分析(Structural Decomposition Analysis, SDA)法、模糊综合评价法、灰色关联分析法、集对分析联系数、神经网络法等。但各种方法都存在着一定的不足:SDA 法^[10]分解的各因素之间未能与评价对象完全一一对应,仍深度解析;模糊综合评价法确定指标权重时的主观性较强;灰色关联分析法只适用于简单模型,不适用于对复杂系统的评价;支持向量机(Support Vector Regression, SVR)^[10]使得预测精度较低,容易出现较大偏差。而 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法能充分利用原始数据的信息,根据有限个评价对象与理性化目标的接近程度进行排序,结果能精确地反映各评价方案之间的差距。而对于指标之间的关系,现有的研究方法往往采用结构方程模型、相关性分析、地理探测器等方法总结出显著的影响因素,但未能深入揭示影响因素之间的关系,区分影响因素的重要性。决策实验与评价实验室(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)法和解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM)的核心在于将复杂的系统拆分为多个子系统,并识别各影响因素的相互作用关系,包括因果关系、相对重要程度,进而构建出可视化的层级图。DEMATEL-ISM 可以将复杂的系统转化为清晰明了、层级分明的结构模型,更好地识别重要因素在系统中的作用。

在此基础上,为了科学评价某地的水资源管理水平,本文从水资源开发利用、生态环境、经济发展等角度构建水资源管理水平评价指标体系,利用熵权法优化 TOPSIS 模型,使得评价结果更加真实有效,最大程度利用原始数据的信息来评价水资源管理水平,并利用障碍度模型识别出影响水资源管理

水平的主要障碍因素,利用 DEMATEL-ISM 分析主要障碍因素之间的层级关系,为区域水资源动态管理提供理论依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

济源市地处河南省西北部,全市面积 1 931 km²,位于东经 112°01′~112°45′,北纬 34°53′~35°16′,属于暖温带季风气候(图 1)。济源市境内河流均属于黄河流域,受气候变化、上游用水需求增加及引沁济蟒工程的影响,沁河地表径流量呈现不断减少趋势。《济源市水资源综合规划》显示,济源市多年平均水资源总量为 3.590 9 亿 m³,人均水资源量为 491.91 m³,仅为全国平均水平的 1/5,属于严重缺水城市。

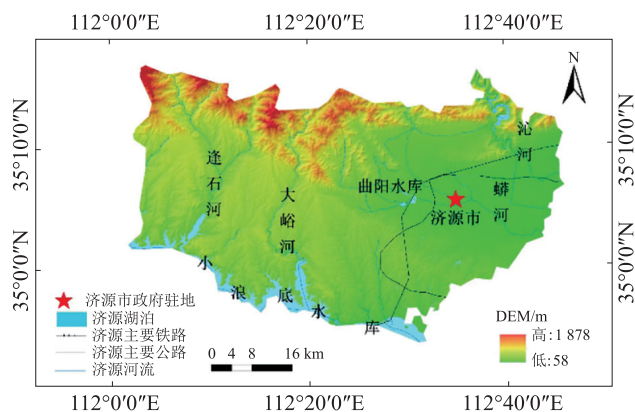


图 1 研究区域图

Fig. 1 Map of the study area

1.2 数据来源

数据主要来源于《水资源公报》、《济源统计年鉴》和《济源国民经济和社会发展统计公报》(2013—2021 年),并从高校、政府机构和企业中邀请 16 位专家、学者以及相关研究人员对各指标间的相互影响关系打分。

3 研究方法

3.1 指标体系构建

遵循指标科学性、合理性的选取原则,确定济源市水资源管理水平评价指标体系包含水资源开发利用、水资源利用效率、水生态环境质量、水资源管理能力四个子系统,并针对每一子系统筛选代表性指标,共 18 项^[12-15]。构建的水资源管理水平评价指标体系如图 2 所示。



图2 水资源管理水平评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system for water resources management level

3.2 熵权-TOPSIS 模型

本研究将用熵权法优化 TOPSIS^[16], 计算 2013—2021 年间济源市水资源管理水平评价指标值与理想值的贴进度, 并将归一化后的得分定义为各年份水资源管理水平, 进而对 2013—2021 年间济源市水资源管理水平进行相对优劣评价, 研究各年份水资源管理水平的变化趋势。

运用熵权法对区域水资源管理水平评价指标确定权重。设有 n 个评价对象, m 个评价指标, 则原始判断矩阵(X)为:

$$X = (x_{ij})_{n \times m} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)。 (1)$$

1) 对原始矩阵中的数据进行正向化、标准化处理, 以消除不同指标量纲的影响, 得到标准化后的矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$ 。已知需要正向化处理的指标有: 用水总量、地表水供水量、地下水开发量、万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量和农田灌溉水有效利用系数。

2) 指标权重的确定。非负矩阵中每个指标的权重记为 P_{ij} , 则对第 j 个指标而言, 信息熵(e_j)的计算公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}。 (2)$$

信息效用值(d_j)为:

$$d_j = 1 - e_j。 (3)$$

将信息效用值归一化, 得到熵权(w_j):

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}。 (4)$$

3) 计算理想解。由第一步得到标准化矩阵:

$$Z = (z_{ij})_{n \times m}。 (5)$$

定义正理想解 $Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+)$, Z^+ 表示第 i 年中第 j 个指标的最大值, 即为最优方案。定义负理想解 $Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-)$, Z^- 表示第 i 年中第 j 个指标的最小值, 即为最劣方案。

4) 计算各年份中评价对象与正、负理想解之间的距离。计算中加入每个指标的权重来, 可最大限度地利用原始数据的信息, 使计算结果更加客观。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_j^+ - z_{ij})^2}, (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (Z_j^- - z_{ij})^2}。 (7)$$

式中 D_i^+ 、 D_i^- 分别表示评价对象到正、负理想解的欧式距离。 D_i^+ 越小,评价对象越接近正理想解; D_i^- 越小,则评价对象越接近负理想解。

5) 计算贴近度并归一化。计算贴近度 $S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$, S_i 表示第 i 年水资源管理水平与最优管理水平的接近程度。贴近度可用来衡量区域水资源管理水平,归一化后 S_i 取值范围为 $[0, 1]$ 。具体水资源管理水平等级划分见表 1。

表 1 水资源管理水平等级划分

Tab. 1 Grading of water resources management levels

S_i 得分	水资源管理水平等级	
(0.0, 0.2]	I	非常差
(0.2, 0.4]	II	较差
(0.4, 0.6]	III	中等
(0.6, 0.8]	IV	较好
(0.8, 1.0]	V	非常好

3.3 障碍度模型

本文引入障碍度模型,计算各指标的障碍度。这里同样加入每个指标的权重,依次计算并分析 2013—2021 年不同年份主要障碍因子,为水资源管理水平评价提供有力支撑。

$$I'_{ij} = 1 - X'_{ij}, \quad (8)$$

$$O_{ij} = \frac{I'_{ij} w_j}{\sum_{j=1}^n I'_{ij} w_j}. \quad (9)$$

式中: I'_{ij} 为指标偏离度,表示指标与目标值的差距; w_j 为各项指标的权重; O_{ij} 为指标障碍度。

根据障碍度模型识别出的主要障碍因素,邀请专家进行问卷调查及访谈。为了保证调研结果的可靠性,借助 SPSS 软件对专家学者的意见进行信度检验,得到克隆巴赫系数(α_{Cronbach})为 0.779(>0.7),说明调研结果的可信度较高。

3.3 DEMATEL-ISM

决策实验与评价实验室(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)法利用图论和矩阵工具识别复杂系统中因素间的关系,并确定各因素的重要程度。解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM)可以梳理复杂系统的层次结构,使各障碍因素的逻辑结构关系以层次分明的结构图清晰展现出来^[18]。首先采用 DEMATEL 方法识别出水资源管理水平评价指标体系中各障碍因素之间的相互关系,然后运用 ISM 建立障碍因素的多级层级关系。具体步骤如下:

步骤 1 从高校、政府机构和企业中邀请水资源、生态领域 16 位专家、学者以及相关研究人员,根据其对水资源、经济社会、生态系统三个维度框架和指标表征含义的理解对各指标间的相互影响关系打分。具体分值标准为:0 表示无影响,1 表示低影响,2 表示中影响,3 表示高影响,4 表示极高影响。

步骤 2 回收问卷数据,计算各影响分值的平均值,构建初始直接影响矩阵 A 。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (10)$$

式中: n 为障碍因素的数量; a_{ij} 为因素 i 对因素 j 的影响程度分值,即打分平均值;矩阵对角线上 a_{ii} 为因素对自身的影响,全部取值 0。

步骤 3 计算标准化直接影响矩阵 N 与综合影响矩阵 T 。

$$N = (n_{ij})_{n \times n} = A/x, \quad (11)$$

$$x = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \right), \quad (12)$$

$$T = N(E - N)^{-1}. \quad (13)$$

式中 E 为单位矩阵。

步骤 4 计算中心度(Z_i)和原因度(D_i)。

$$r_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad (14)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad (15)$$

$$Z_i = r_i + c_i, \quad (16)$$

$$D_i = r_i - c_i. \quad (17)$$

其中,原因度大于 0 的因素被称为原因因素,原因度小于 0 的因素被称为结果因素。中心度越高,表示该因素在耦合系统中的作用越关键;原因度越高,表示该因素对其他因素的影响越大。

步骤 5 构建邻接矩阵 $B = (b_{ij})_{(n+1) \times (n+1)}$ 和可达矩阵 M 。

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & b_{ij} < \lambda; \\ 1, & b_{ij} \geq \lambda; \end{cases} \quad (18)$$

$$M = (B + E)^{n+2} = (B + E)^{n+1} \neq (B + E)^n \neq B + E. \quad (19)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n+1$; $j = 1, 2, \dots, n+1$; 阈值 λ 用来剔除一些影响程度偏小的因素,通过综合影响矩阵中的所有值调试决定。

步骤 6 依据可达矩阵 M , 计算 $R(S_i)$ 、 $A(S_i)$ 、 $C(S_i)$ 、 $B(S_i)$ 和 $E(S_i)$, $i = 1, 2, \dots, n+1$ 。

$$R(S_i) = \{s_i \in S | m_{ij} = 1\}, \quad (20)$$

$$A(S_i) = \{s_i \in S | m_{ji} = 1\}, \quad (21)$$

$$C(S_i) = R(S_i) \cap A(S_i), \quad (22)$$

$$B(S_i) = \{s_i \in S | A(S_i) = C(S_i)\}, \quad (23)$$

$$E(S_i) = \{s_i \in S | R(S_i) = C(S_i)\}. \quad (24)$$

步骤 7 按照层次划分准则, $C(S_i) = R(S_i)$ 为第一层次, 然后删除使用的元素并重复按照 $C(S_i) = R(S_i)$ 划分下一层次, 直到所有元素被分类到不同的层次结构级别, 得到多层次 ISM。

4 结果与分析

4.1 权重计算

本研究采用熵权法计算指标权重。权重大于 10% 的指标为影响水资源管理水平的主要因素, 权重小于 10%、大于 5% 的指标为影响水资源管理水平的次要因素。经计算, 影响区域水资源管理水平的主要因素及权重为: 地下水开发量 (17.21%)、万元 GDP 用水量 (15.66%)、生态环境需水满足率 (11.45%) 和水资源承载力预警机制完善度 (11%)。次要因素及权重为: 农田灌溉水有效利用系数 (6.83%)、人均水资源量 (6.81%) 和用水总量 (5.42%)。水资源开发利用准则层 (37.46%) 与水资源利用效率准则层 (27.03%) 的指标权重占比大, 说明水资源开发利用以及利用效率在区域水资源管理水平评价中占据着重要地位。

基于熵权-TOPSIS 模型计算出各年份水资源管理水平的最后得分, 进行归一化处理后将其定义为各年份水资源管理水平。对 2013—2021 年济源市水资源管理水平进行优劣评价, 如图 3 所示。

从图 3 可知, 2013—2021 年济源市水资源管理水平总体得分由 2013 年的 0.45 上升到 2021 年的 0.79; 水资源管理水平与正理想解的距离从 2013 年的 0.509 0 下降到 2021 年的 0.268 4, 与负理想

解的距离则由 2013 年的 0.180 2 上升到 0.452 4。这表明济源市在最严格水资源管理制度背景下“三条红线”的实施效果较好, 主要表现为 2013—2021 年间济源市水资源管理水平总体上呈上升趋势, 2021 年水资源管理水平处于较好等级。

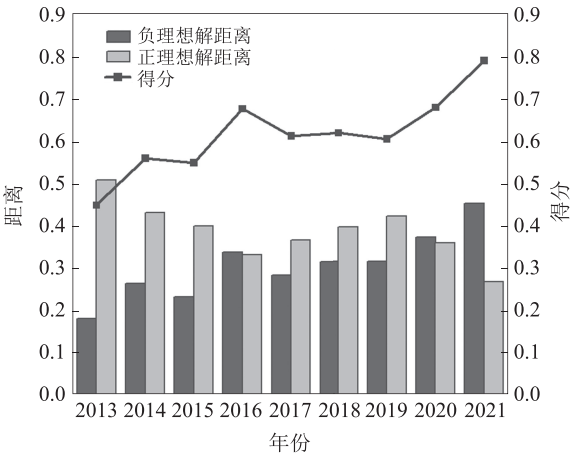


图 3 2013—2021 年济源市水资源管理水平 D_i^+ , D_i^- 变化趋势及得分

Fig. 3 D_i^+ and D_i^- change trend and the level of water resources management level in Jiyuan City in 2013—2021

4.2 障碍因素分析

障碍度分析通过计算出评价指标体系中各评价指标的障碍度, 进一步找出限制水资源管理水平的关键因素, 明确关键因素的影响程度, 为制定科学、合理的政策提供理论依据。本文通过计算得出 2013—2021 年济源市各年份水资源管理水平障碍指标, 见表 2。为了便于观察, 仅列出障碍度排序前五的指标, 括号中表示障碍因子的障碍度, 值越大表明该因子对水资源管理水平的影响越大。

表 2 2013—2021 年济源市水资源管理水平障碍因子分析

Tab. 2 Analysis of obstacle factors of water resources management level in Jiyuan City in 2013—2021

年份	障碍度因子排序				
	1	2	3	4	5
2013	$d_1(0.25)$	$c_4(0.21)$	$d_3(0.21)$	$a_3(0.09)$	$b_1(0.06)$
2014	$d_1(0.29)$	$d_3(0.26)$	$c_4(0.12)$	$b_1(0.08)$	$a_3(0.07)$
2015	$d_3(0.30)$	$d_1(0.26)$	$a_3(0.11)$	$c_4(0.11)$	$b_1(0.08)$
2016	$d_3(0.35)$	$d_1(0.25)$	$b_1(0.09)$	$c_4(0.08)$	$a_3(0.06)$
2017	$d_3(0.32)$	$d_1(0.32)$	$a_3(0.14)$	$b_1(0.05)$	$a_5(0.04)$
2018	$d_3(0.39)$	$d_1(0.25)$	$a_3(0.18)$	$a_5(0.05)$	$b_1(0.04)$
2019	$a_3(0.60)$	$a_5(0.17)$	$b_1(0.11)$	$c_3(0.03)$	$b_3(0.03)$
2020	$a_3(0.58)$	$a_5(0.29)$	$a_4(0.05)$	$b_3(0.03)$	$c_3(0.02)$
2021	$b_1(0.92)$	$b_2(0.04)$	$a_1(0.02)$	$c_2(0.01)$	$a_2(0.01)$

由表 2 可知,不同年份中影响水资源管理水平的主要障碍因子有所不同。 a_3 (地下水开发量)、 b_1 (万元 GDP 用水量)为高频指标,均出现了 8 次,占比达 36%; d_1 (水资源经费投入)、 d_3 (水资源承载力预警机制完善度)均出现了 6 次,占比 27%。并且,这些主要障碍因子的权重较高,说明影响水资源管理水平的主要因素集中在水资源开发利用与水资源利用效率这两个子系统。

2015 年 d_3 (水资源承载力预警机制完善度)成为第一障碍因子。济源市在发展工业的同时着手建立水资源承载力预警机制,实现了以有限的水资源支撑经济发展,同时要求工业积极贯彻落实绿色转型发展。2019 年后,第一障碍因子集中在水资源开发利用层面。随着水资源承载力预警机制的完善,地下水开采受到有效控制,济源市将持续实施水资源用水总量与强度双控行动,有效落实双控措施,全面完成双控目标。

自 2019 年开始,障碍因子增加了 c_3 (生态环境需水满足率)。近年来,政府加强了环境治理,将生态环境用水纳入考核内容,生态保护与经济发展结合起来,生态环境得以改善。结合指标权重的分析结果可知,万元 GDP 用水量、地下水开发量、生态环境需水满足率和水资源承载力预警机制完善度为主要障碍因素。这与以往水资源评价的研究结果一致^[20],济源市水资源管理水平总体上呈上升趋势。水资源开发利用与水资源利用效率两个子系统的指标对水资源管理水平的影响较大^[21]。

4.3 基于 DEMATEL-ISM 的障碍因素层次关系划分

由图 4 可以看出,水资源利用效率、水生态环境质量和水资源管理能力子系统因素多为原因因素,水资源开发利用子系统中多为结果因素。中心度排名前五的因素分别为:用水总量(a_1)、地表水供水量(a_2)、地下水开发量(a_3)、水资源承载力预警机制完善度(d_3)、水资源经费投入(d_1),表明这 5 个因素在指标体系中处于核心地位。原因度排名前五的因素分别为:水资源经费投入(d_1)、河流湖库生态基流保障率(c_2)、地表水供水量(a_2)、水资源承载力预警机制完善度(d_3)、农田灌溉水有效利用系数(b_3),表明这 5 个因素对其他因素影响最大。其中,水资源经费投入的中心度和原因度都最高,表示其有很强的制约性和带动性,在整个体系中处于核心地位,是最关键的因素。在各行各业的水资源管理中,如何有效进行管网改造、节水器具推广等是目前管理工作中的重点。

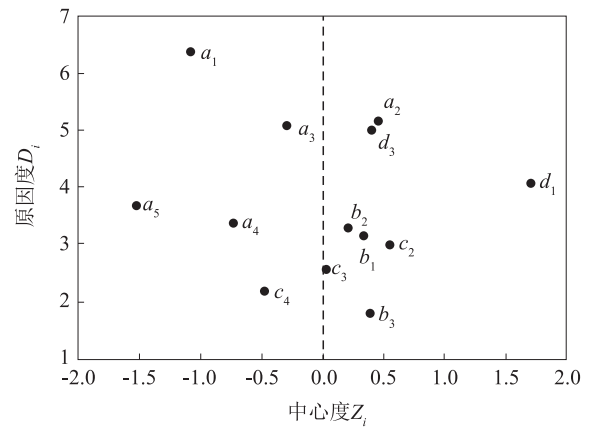


图 4 中心度-原因度散点图

Fig. 4 Scatter plot of centrality-causality

经过反复调试、多次计算,确定阈值 $\lambda = 0.23$ 。根据层次划分结果绘制 ISM 层次划分模型,如图 5 所示。L1 为底层因素,L2 为过渡因素,L3 为表层因素。底层、过渡和表层因素间接或直接作用于水资源管理目标。

从图 5 中可以看出,底层因素 L1 包括万元 GDP 用水量、工业增加值用水量、河流湖库生态基流保障率、水资源经费投入、农田灌溉水有效利用系数和生态环境需水满足率。同时,底层因素为原因度较高的障碍因素,底层因素变化会导致上层因素变化,进而影响管理目标。这些底层因素对水资源管理目标的实现有多方面的影响,但基本不受其他要素影响。万元 GDP 用水量、工业增加值用水量、河流湖库生态基流保障率通过影响用水总量间接影响水资源管理目标。而水资源经费投入对 L2 层的因素均有直接影响且间接影响其他供水量以及人均水资源量。这是因为水利工程建设以及输水管网的建设减少了“跑冒滴漏”现象的发生,提高了水资源开发利用效率。

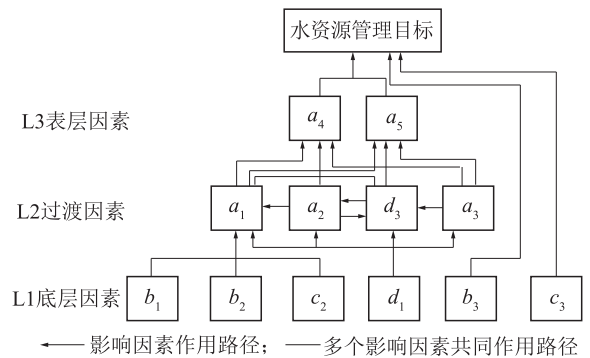


图 5 解释结构模型 ISM 层次划分

Fig. 5 ISM Hierarchical Classification Model

L2 为过渡因素,包括用水总量、地表水供水量、地下水开发量和水资源承载力预警机制完善

度。过渡因素为中心度较高的因素,处于层级结构的核心地位,依托于底层因素的表现与变化,将底层因素的影响通过阶梯关系向上传递给表层因素,与复杂系统中的其他因素有着较强的相互作用关系。

L3 为表层因素,包括其他供水量和人均水资源量,直接影响着水资源管理目标,同时受到底层因素和过渡因素的影响,可控性最强。

4 结论

本研究以济源市为例,在确保指标可涵盖水资源管理工作的关键部分的前提下,运用熵权-TOPSIS 模型以及障碍度模型建立了包含 4 个准则层和 18 个指标层的水资源管理水平评价指标体系,评价了济源市 2013—2021 年水资源管理水平,并分析了主要障碍因素之间的层级关系。主要结论如下:

1) 济源市 2013—2021 年水资源管理水平总体上呈上升趋势,并在 2021 年达到最高点。

2) 济源市地下水开发量占比 17.21%,万元 GDP 用水量占比 15.66%,水资源承载力预警机制完善度占比 11%;影响水资源管理水平的主要障碍因素为地下水开发量和万元 GDP 用水量,共占比 36%。

3) 在 DEMATEL-ISM 中,底层因素包括万元 GDP 用水量、工业增加值用水量、河流湖库生态基流保障率、水资源经费投入、农田灌溉水有效利用系数和生态环境需水满足率。万元 GDP 用水量、工业增加值用水量、河流湖库生态基流保障率通过影响用水总量间接影响水资源管理目标。而水资源经费投入对上层因素均有直接影响且间接影响其他供水量以及人均水资源量。

参 考 文 献

- [1] ZHOU J R, LI X Q, YU X, et al. Exploring the ecological security evaluation of water resources in the Yangtze River Basin under the background of ecological sustainable development[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 15475.
- [2] 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. [WANG H, XU X F, CHENG J Q, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 1-7.]
- [3] 严子奇, 王浩, 桑学锋, 等. 基于模糊聚类预报与序贯决策的水资源开发利用总量动态管理模式[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, 15(3): 161-169. [YAN Z Q, WANG H, SANG X F, et al. Dynamical management for total amount control of water resources utilization based on fuzzy cluster analysis and sequential decision[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, 15(3): 161-169.]
- [4] 王建华. 生态大保护背景下长江流域水资源综合管理思考[J]. *人民长江*, 2019, 50(10): 1-6. [WANG J H. Discussion on integrated water resources management in Yangtze River Basin under background of ecological protection[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(10): 1-6.]
- [5] 吴炳方, 曾红伟, 马宗瀚, 等. 完善新时期水资源管理指标的方法[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 553-566. [WU B F, ZENG H W, MA Z H, et al. Methods to improve management indicators to ensure the implementation of new water governance in China[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 553-566.]
- [6] ALJAWAD J Y, ALSAFFAR H M, BERTRAM D, et al. A comprehensive optimum integrated water resources management approach for multidisciplinary water resources management problems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 239: 211-224.
- [7] SALAIAR D, ESCOBAR M, YATES D, et al. Advancing water sustainability in Bahrain through water resource management knowledge platforms[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2022, 263: 265-266.
- [8] SHAMS A K, MUHAMMAD N S. Toward sustainable water resources management: critical assessment on the implementation of integrated water resources management and water-energy-food nexus in Afghanistan[J]. *Water Policy*, 2022, 24(1): 1-18.
- [9] 黄珊, 冯起, 王耀斌, 等. 石羊河流域集成水资源管理绩效评价[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 67-74. [HUANG S, FENG Q, WANG Y B, et al. The evaluation of integrated water resource management performance in Shiyang River Basin, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 67-74.]
- [10] JU H R, LIU Y X, ZHANG S R. Interprovincial agricultural water footprint in China: spatial pattern, driving forces and implications for water resource management[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 43: 264-277.
- [11] MORTEZAZADEH F, POURMOHAMMADI M H, KHOSHNAVAZ S, et al. Water resources carrying capacity to achieve a sustainable ecosystem using support vector regression[J]. *Water Supply*, 2024, 24(3): 665-672.
- [12] 罗浩, 周维博, 白洁芳, 等. 基于 GC-TOPSIS 模型的水资源管理绩效评价及障碍度分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 26-31. [LUO H, ZHOU W B, BAI J F, et al. Performance evaluation and obstacle degree analysis of water resources management based on GC-TOPSIS Model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(4): 26-31.]

- [13] 纪静怡,方红远,徐志欢. 基于组合赋权云模型的水资源管理综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 40–45, 56. [JI J Y, FANG H Y, XU Z H. Comprehensive Evaluation of Water Resource Management Based on Combined Weighted Cloud Model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(12): 40–45, 56.]
- [14] 潘护林,陈惠雄. 可持续水资源综合管理定量评价: 基于 IWRM 理论的实证研究[J]. 生态经济, 2014, 30(11): 145–150. [PAN H L, CHEN H X. Quantitative assessment on the sustainable comprehensive water resources management: an empirical research based on the theory of IWRM[J]. Ecological Economy, 2014, 30(11): 145–150.]
- [15] 黄显峰,钟婧玮,方国华,等. 基于物元分析法的水资源管理现代化评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 22–28. [HUANG X F, ZHONG J W, FANG G H, et al. Evaluation on water resources management modernization based on matter element analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 22–28.]
- [16] LI P, ZHOU C J, DU X X. Evaluation and prediction of surface water pollution in China based on improved entropy-weighted TOPSIS algorithm and metabolism GM(1,1) grey model[J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2025, 21(2): 1600–1629.
- [17] AI X S. Multilayer entropy-weighted TOPSIS method and its decision-making in ecological operation during the subsidence period of the Three Gorges Reservoir[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2954.
- [18] YU L G, LI D I, SONG J B, et al. Intelligent pathways for driving wastewater treatment efficiency: an integrated analysis approach[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025, 27(5): 1–30.
- [19] TRIVEDI A, JAKHAR S K, SINHA D. Analyzing barriers to inland waterways as a sustainable transportation mode in India: a dematel-ISM based approach[J]. Journal of cleaner production, 2021, 295: 126301.
- [20] 徐晨光,杨柳,曹连海. 基于多准则决策模型的许昌市水资源承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 69–75, 81. [XU C G, YANG L, CAO L H. Evaluation of water resources carrying capacity in Xuchang City based on multi-criteria decision model[J]. Journal of North China university of water resources and electric power (natural science edition), 2022, 43(1): 69–75, 81.]
- [21] 王飞,张东萌,于超. 沁蟒河流域(河南段)水生态承载力评价[J]. 中国地质调查, 2023, 10(2): 103–110. [WANG F, ZHANG D M, YU C. Water ecological carrying capacity evaluation of Qinmang River Basin (Henan Section)[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(2): 103–110.]
- [22] 赵林清. 基于物元可拓分析法的节水型社会建设评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 76–81. [ZHAO L Y. Evaluation of water-saving society construction based on matter-element extension analysis[J]. Journal of North China university of water resources and electric power(natural science edition), 2022, 43(1): 76–81.]

Evaluation of Water Resources Management Level and Identification of Obstacle Factors Based on DEMATEL-ISM

LI Yongfang¹, REN Suming², WANG Fuqiang²

(1. The River and Lake Protection and Construction Operation Safety Center of the Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450046, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: [Objective] Comprehensively evaluating the management level of water resources and identifying the obstacles that affect the management level of water resources are of great significance for improving the management level of water resources and ensuring social well-being. [Methods] Taking Jiyuan City as an example, an evaluation index system covering 18 indicators such as total water consumption, water consumption per unit of GDP, and water quality compliance rate in water function zones was constructed. The regional water resources management level was evaluated using the improved TOPSIS method, and the main obstacles affecting the water resources management level were identified. The DEMATEL-ISM model was used to analyze the relationships among the main influencing factors. [Results] During the study period, the overall score of water resources management level in Jiyuan City increased from 0.4500 in 2013 to 0.7900 in 2021, and the level of water resources management in Jiyuan City is generally seen as a rising trend year by year, and the level of water resources management is in a better grade in 2021. The main obstacles affecting the level of water resources management are the amount of groundwater exploitation, water consumption per 10,000 yuan of GDP, investment in water resources and the water resource carrying ca-

capacity early warning mechanism maturity. Water consumption of 10,000 yuan GDP, water consumption of 10,000 yuan value added by industry, and ecological torrent security rate of rivers, lakes and reservoirs indirectly affect the water resources management target by influencing the total amount of water consumption. Investment in water resources has a direct impact on the total water consumption, surface water supply, groundwater exploitation, and the improvement of the water resources carrying capacity early warning mechanism, and it also directly affects other water supplies and per capita water resources. **【 Conclusion】** The development and utilization of water resources in Jiyuan City, as well as the improvement of water resource utilization efficiency, remain the key points of water resource management. It is necessary to strictly control the intensity of water resource development and improve the early warning mechanism for water resource carrying capacity.

Keywords: water resource management; analysis of obstacles; DEMATEL-ISM model; water resource utilization efficiency