

基于水资源系统健康的区域水资源承载力评价

刘丹, 王丽萍, 李荣波, 张验科

(华北电力大学(北京) 可再生能源学院, 北京 102206)

摘要: 针对传统水资源承载力研究中评价标准比较单一、评价结果相对简化等问题, 提出了基于水资源系统健康的水资源承载力理念, 建立了与之相应的区域水资源承载力评价的指标体系; 吸取层次分析法蕴含决策经验意见的功能和离差最大化法反映客观标准的优点, 构建了一种组合赋权法; 依照属性识别理论的置信准则和评分准则建立基于组合权重的集对分析评价模型, 并对山西省大同市水资源承载力进行了评价。结果表明: 2005年-2012年间, 大同市水资源承载力指数在0.499~0.728之间, 随着大同市节水型城市建设的推进和绿色经济发展的转变, 水资源承载力水平在逐年增强; 但水资源系统长期处于亚健康状态, 应加大水资源管理、水环境保护及水污染控制的力度, 以改善未来水资源系统的健康状态。

关键词: 水资源系统健康; 水资源承载力; 集对分析; 组合权重; 大同市

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0214-06

Assessment of regional water resources carrying capacity based on the water resources system health

LIU Dan, WANG Li ping, LI Rong bo, ZHANG Yar ke

(School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The traditional water resources carrying capacity assessment standards and results are relatively simplified. In this paper, the concept of water resources carrying capacity (WRCC) based on the water resources system health was proposed, and the corresponding index system and evaluation standard for the regional WRCC were developed. In addition, the combination weighting approach was established to evaluate the WRCC based on the decision making function in analytic hierarchy process (AHP) and the advantage of objective standard reflected by the maximum deviation method. The set pair analysis model was developed based on the confidence rule and scoring rule of attribute recognition theory, and it was applied to analyze the WRCC in Datong of Shanxi Province. The results showed that the WRCC indicator varies between 0.499 and 0.728 from 2005 to 2012; the WRCC of Datong increases annually with the promotion of water saving city construction and green economic development; and the water resources system is in sub health status, so the measures of water resources management, water environment protection, and water pollution control should be taken to improve the water resources system health.

Key words: water resources system health; water resources carrying capacity; set pair analysis; combination weight; Datong City

区域水资源承载力^[1] (Water resources Carrying Capacity, WCC) 是指在一定经济技术水平和社会生产条件下, 水资源可最大供给社会经济发展和生态环境保护用水的能力, 区域水资源承载力评价是对该区域水资源系统及其开发利用状况的综合诊断, 包括自然资源、社会经济、生态环境、技术支持等方面的内容。鉴于 WCC 具有客观性、时间性、动态性、模糊性、可调控性等特点, 常用的量化模式为指标体系评

价方法, 即通过建立评价指标体系对水资源承载力进行综合评判, 该方法的关键在于建立客观的评价指标体系和合理的评价模型。国内学者研究了多个区域的水资源承载力, 取得了一定的成效^[2-5], 但仍存在两点不足: (1) 由于水资源承载力影响因素多、涉及范围广和研究内容复杂, 尚无一个准确反映水资源系统、社会经济系统和生态环境系统相互依存和相互作用对水资源承载力影响的评价指标体系; (2) 由于不

收稿日期: 2014-06-20 修回日期: 2015-02-04 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0937.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279062; 51179069; 41340022); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(13QN22; 13XS23; 13XS24; 2014XS51)

作者简介: 刘丹(1990-), 女, 山西大同人, 主要从事水(能)资源系统规划与管理方面的研究。E-mail: 993380124@qq.com

通讯作者: 王丽萍(1956-), 女, 云南昆明人, 教授, 博士生导师, 主要从事水(能)资源规划与管理、水资源经济与能源经济方面研究。E-mail: liping_w@163.com

确定性因素的存在,评价指标与评价等级间存在复杂的非线性关系,至今仍没有统一的水资源承载力评价模型。

对水资源系统而言,社会经济系统是其承载对象,势必会对水资源系统带来压力,该压力与其自身的支持力作用相反,研究时应分清二者的区别,准确量化水资源系统对社会经济系统的承载能力。为解决上述问题,本文首先将“生态学”中“系统健康”概念引入水资源承载力研究中,提出基于水资源系统健康的水资源承载力(Water resources Carrying Capacity based on the Water resources System Health, WCCWSH)概念,建立与之相应的评价指标体系;其次,基于层次分析法蕴含决策经验意见,可表征系统层次结构的优点,对离差最大化客观权重法进行改进,在此基础上建立基于组合权重的集对分析评价模型;最后,以大同市为例,对其2005年-2012年水资源承载力进行评价,以期制约区域可持续发展的瓶颈等问题的解决和水资源承载力理论相关研究提供参考。

1 研究方法

1.1 基于水资源系统健康的水资源承载力

1.1.1 概念及内涵

目前尚无对水资源系统健康的描述,在分析前人在其它领域相关研究^[6-8]的基础上,笔者总结水资源系统健康包含两个内涵:能自我维持和自我更新;可提供合乎自然和人类需求的服务功能。考虑到水资源承载力的影响因素,WCCWSH应该是在一定社会经济条件下,水资源系统保持其自身健康和维持其服务功能的潜在能力,体现了一定社会经济外力作用下水资源系统健康遭受威胁的程度,以及水资源系统对社会经济发展强度的承受能力。

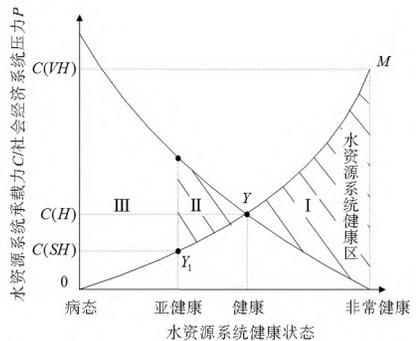
WCCWSH由资源弹性力和人类支持力两部分组成。资源弹性力即水资源抵抗外界的压力,是水资源系统本身固有的自然属性,一般认为其大小与水资源系统本身的结构功能复杂程度正相关,且受区域年降水量、森林覆盖率、过境水量利用、地下水更新能力等水资源系统自身条件影响。人类支持力是指水资源系统服务人类活动及承受人类活动作用的能力,受社会发展(人均GDP、GDP增长率)、管理建设水平(生活污水处理能力、工业污水处理达标率、地下水开采状况、污染治理投资)和人口状况(人口密度、文盲率)等方面因素影响。

1.1.2 水资源系统健康与水资源承载力的关系

对于相对独立的水资源系统,水资源系统健康状态与水资源承载力水平存在一一对应关系。当 P 不变时,随着水资源保护及水环境治理工作力度的加大,水资源系统趋于健康状态,即水资源系统健康状况与水资源承载力成正比;当 C 不变时,随着经济发展带来的压力加大,水资源系统趋于生病状态,即水资源系统健康状况与社会经济系统压力成反比。杨志峰等人^[9]提出:系统健康的必要条件为系统承受的压力和系统的承载力均处于健康状态及以上,此时压力和承载力曲线相交。依照该准则,本文用图1描述水资源系统健康与水资源承载力 C 之间的关系,同时引入社会经济系统压力 P (经济发展规模对水资源系统的胁迫作用)加以说明,则图1中点 Y 处是水资源系统健康的临界点, Y_1 为水资源系

统亚健康的临界点。据此,将水资源承载力评价标准分为三个等级: \bar{N} 级属较好,表示本区域水资源承载潜力较强,水资源供给情况较为乐观,此时水资源系统处于绝对健康的状态(水资源系统健康区),可完全保证人口的增加和社会经济发展; $\bar{0}$ 级属一般,表明水资源已有相当规模的开发利用,系统承受着一定的压力,但这种压力在水资源可承受的范围之内,水资源仍能一定程度上支撑社会的发展; $\bar{0}$ 级属病态与亚健康之间人过渡状态,即将发生水资源危机。

当水资源系统处于亚健康与健康状态之间时,管理者应意识到系统有遭受“生病”的风险,应及时采取相应的水资源保护与水环境改善的治理措施,保证水资源系统朝健康的状态发展,否则将极可能地降至 $\bar{0}$ 级。为使水资源可持续利用,水资源承载力应保持在 $\bar{0}$ 级标准及以上。



注: $C(SH)$ 、 $C(H)$ 、 $C(VH)$ 值为水资源系统处于亚健康、健康、非常健康状态下的水资源承载力标准值,也即水资源承载力评价等级临界值。

曲线 OY_1 、 OY 和 YM 为不同评价等级下的水资源承载力范围。

图1 水资源系统健康与水资源承载力关系示意图

Fig. 1 Relationship between the water resources system health and water resources carrying capacity level

1.2 评价指标体系及评价标准

评价研究区域水资源承载力前需先建立全面、客观、合理的评价指标体系。根据WCCWSH理念,本文以大同市水资源系统为例,从资源弹性力和人类支持力两方面确定指标体系,侧重考虑人类对水资源的开发利用、污染控制及污染治理。图2为所建的评价指标体系。

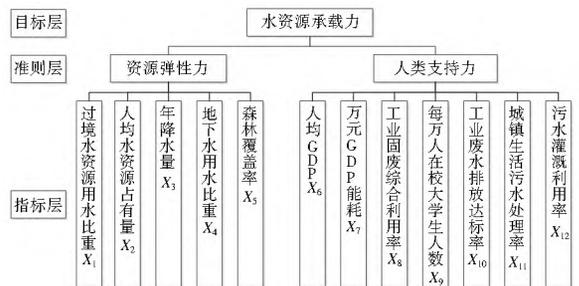


图2 基于水资源系统健康的水资源承载力评价指标体系

Fig. 2 The assessment indicator system of water resources carrying capacity based on water resources system health

本文把水资源系统健康标准分为非常健康、健康、亚健康、病态四个状态(表1),把水资源承载力水平按图1分为三级评判标准,然后以水资源承载力指数来衡量水资源系统健康状态和水资源承载力水平,建立了基于水资源系统健康的

水资源承载力评价标准(表 2)。

表 1 水资源系统健康状态的含义

Tab. 1 Meaning for standards of water resources system health status

水资源系统健康等级	含义
非常健康	活力、恢复力和服务功能非常强
健康	活力强, 恢复力和服务功能较强
亚健康	活力、恢复力、服务功能一般
病态	活力非常弱, 恢复力和服务功能非常差

表 2 基于水资源系统健康的水资源承载力评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria of water resources carrying capacity based on the water resources system health

水资源承载力等级	水资源承载力指数	水资源系统健康状态
\bar{N}	E_1	非常健康
$\bar{0}$	E_2	健康
$\bar{0}$	E_3	亚健康
$\bar{0}$	E_4	病态

注: E_1 至 E_4 分别为水资源系统健康状态为非常健康至病态时对应的水资源承载力指数, 相应的水资源承载力等级位于二者间, 即指数大于 E_2 小于 E_1 , 为 \bar{N} 级。

1.3 基于组合权重的集对分析水资源承载力评价模型

1.3.1 水资源承载力评价的集对分析方法

集对分析是一种不确定性分析方法, 由我国学者赵克勤于 1989 年提出, 目前已广泛应用于社会科学和自然科学的多个领域。水资源承载力评价的实质^[11]是一个具有确定性的评价指标的评价标准与具有不确定性的评价因子相结合的分析过程。基于集对分析的水资源承载力评价是将表征水资源开发利用情况的评价指标与既定的评价标准构成一个集对, 通过两者间的分析比照, 即可实现水资源承载力的量化评估。

将 m 个评价样本 $x_l(l=1, 2, \dots, m)$ 视为集合 X , 相应的评价标准(三级)视为集合 $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, 则 X 和 Y 便构成一个集对 $H(X, Y)$ 。集对 $H(X, Y)$ 的联系度 μ_l 可表示为:

$$\mu_l = a_l + b_l i + c_l j \quad (1)$$

式中: a_l 表示指标 x_l 隶属于 \bar{N} 级标准的可能性; b_l 表示指标 x_l 隶属于 $\bar{0}$ 级标准的可能性; c_l 表示指标 x_l 隶属于 $\bar{0}$ 级标准的可能性。

进行水资源承载力评价时, 关键在于确定式(1)中的 μ_l 。借助模糊分析法^[12], μ_l 由下式确定:

对经济型指标

$$\mu_l = \begin{cases} 1 + 0i + 0j & x_l \in [S_1, \infty] \\ \frac{S_2 - x_l}{S_2 - S_1} + \frac{x_l - S_2}{S_2 - S_1} i + 0j & x_l \in [S_2, S_1] \\ 0 + \frac{S_3 - x_l}{S_3 - S_2} i + \frac{x_l - S_2}{S_3 - S_2} j & x_l \in [S_3, S_2] \\ 0 + 0i + 1j & x_l \in [0, S_3] \end{cases} \quad (2)$$

对成本型指标

$$\mu_l = \begin{cases} 1 + 0i + 0j & x_l \in [0, S_1] \\ \frac{S_2 - x_l}{S_2 - S_1} + \frac{x_l - S_2}{S_2 - S_1} i + 0j & x_l \in [S_1, S_2] \\ 0 + \frac{S_3 - x_l}{S_3 - S_2} i + \frac{x_l - S_2}{S_3 - S_2} j & x_l \in [S_2, S_3] \\ 0 + 0i + 1j & x_l \in [S_3, \infty] \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中的联系度可用图 3 来描述。

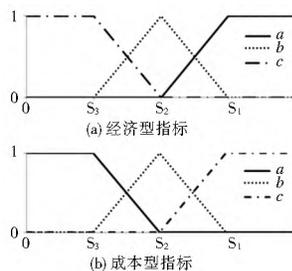


图 3 经济型指标、成本型指标联系度示意图

Fig. 3 Connection degree of evaluation indexes: beneficial index (a) and cost index (b)

1.3.2 组合权重确定

赋权的方法很多, 大体上分为主观赋权法(层次分析法、专家调查法、二项系数法等)和客观赋权法(熵权法、离差最大化法、主成分分析法等)两类。两类方法各有特点, 前者可体现决策者的经验判断, 属性间的相对重要程度一般不会违反人们的常识, 缺点是随意性较大、准确性和可靠性较差; 后者遵循客观标准, 但忽视了决策者的经验等主观偏好信息, 有时会导致权重系数不合理。

粗糙集理论认为属性集合 A 由表征客观标准的条件属性和代表主观意识的决策属性两部分组成, 那么, 可建立两者的关系式来确定组合属性权重:

$$w = \alpha q + (1 - \alpha)p \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (4)$$

式中: w 为组合权重; α 为经验因子, 反映决策者对主、客观权重的偏好程度; q 为主观权重; p 为客观权重。

根据上述思路, 本文提出一种组合赋权方法, 即基于层次分析法的蕴含决策经验意见、表征系统层次结构的功能, 对现有离差最大化客观赋权法进行改进, 使指标权重达到主观与客观的统一并全面反映指标数据的效用值。对于离差最大化定权法^[13], 设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times m}$ 表示方案集 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ 对指标集 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ 的决策矩阵。将 A 进行规范化处理, 得 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。假设指标权重向量为 $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, 且满足约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m p_j^2 = 1 \\ p_j \geq 0, j \in M \end{cases} \quad (5)$$

设 $V_{ij}(P)$ 表示第 j 个指标的第 j 个方案与其他方案间的离差, 则可定义

$$V_{ij}(P) = \sum_{k=1}^n |r_{ij} p_j - r_{kj} p_j|, \quad i \in N, j \in M \quad (6)$$

$$V_j(P) = \sum_{i=1}^n V_{ij}(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} p_j - r_{kj} p_j| p_j, j \in M \quad (7)$$

则 $V_j(P)$ 表示对指标 g_j 而言, 所有方案与其他方案的总离差。根据离差最大化的思想, 加权向量 P 的选择应使所有指标对所有方案的总离差最大。为此, 构造最优模型:

$$\begin{cases} \max V(P) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| p_j \\ s. t. \quad p_j \geq 0, \sum_{j=1}^m p_j^2 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

解此最优化模型, 作 Lagrange 函数

$$L(P, \zeta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| p_j + \frac{1}{2} \zeta (\sum_{j=1}^m p_j^2 - 1) \quad (9)$$

求其偏导数,并令

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial p_j} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| + \zeta p_j = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \zeta} = \sum_{j=1}^m p_j^2 - 1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

求得最优解

$$p_j^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - r_{kj}|^2}} \quad (11)$$

对 w^* 进行归一化处理,由此得到

$$p_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}|} \quad (12)$$

因此,确定组合权重的具体方法如下:(1)收集评价样本,基于层次分析法的权重 q_j 计算, q_j 表示主观权重;(2)按式(12)计算基于离差最大化的权重 p_j , p_j 表示客观权重;(3)采用专家打分法确定经验因子 α ,按式(4)计算指标 x_j 的组合权重 w_j 。

1.3.3 基于组合权重的集对分析评价模型

将新的组合赋权法与集对分析模型进行耦合,设第 S 个评价样本的综合关联度为 $\bar{\mu}_s$,构造基于组合权重的集对分析评价模型为

$$\bar{\mu}_s = \sum_{l=1}^m w_l \mu_{sl} = \sum_{l=1}^m w_l a_{sl} + \sum_{k=1}^n w_k b_{sk} i + \sum_{j=1}^n w_j c_{sj} = f_1 + f_2 i + f_3 j \quad (13)$$

式中: w_l 为第 l 个指标的组合权重值; μ_{sl} 为第 s 个样本中第 l 个指标的关联度。

采用置信度准则^[12]

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda \quad k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中: λ 为置信度,取值范围一般为 $[0.5, 0.7]$,取值越大表示

评价结果越保守。

目前研究中,评价的终点多为某一评价年水资源承载力隶属某个评价等级,即样本 s 属于 h_k 对应的 k 级。实际上,简单的等级划分较难直观反映水资源承载力的实际情况及变化趋势;特别是若 f_1, f_2, f_3 三个数值相差不大,采用置信度准则确定等级隶属问题时显得论据不足,较难客观反映评价年份所处的真实状况,也难以作为决策部门提供合理的决策意见。为此,本文引入文献^[14]中的评分准则

$$Z_i = \sum_{k=1}^3 f_k \times d_k \quad (15)$$

式中: Z_i 为第 i 个样本的等级分值; d_k 为第 k 级标准的分值,本文采用水资源承载力指数表征 Z 和 d 。比照分析各样本 Z 的值即可获知评价区域水资源承载力在评价时间内的变化程度。

2 实例分析

大同市位于山西省北部,素有“煤都”之称,为全国缺水最严重的城市之一,水资源的短缺已经成为制约当地经济发展的“瓶颈”。大同市在全国率先提出“转型发展、绿色崛起”的发展战略,目的在于推进经济结构调整、加快经济增长方式转变,使大同市从“黑色经济”走向“绿色经济”的发展之路,同时也期望实现水资源同生态环境、社会经济协调发展,促使水资源优化配置及其可持续利用。

2.1 大同市水资源承载力评价指标体系

依据图2,从《大同市水资源公报》和《中国城市统计年鉴》中获取数据建立评价样本,同时参考相关水资源评价标准^[15-16],将分级标准划分为 \bar{N} 、 $\bar{0}$ 、 $\bar{0}$ 级(表3),各级的水资源承载力指数^[17]见表4。

表3 大同市水资源承载力评价指标值及分级标准

Tab.3 Evaluation index values and standards for water resources carrying capacity of Datong City

评价 指标	评价样本									分级标准		
	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	\bar{N}	$\bar{0}$	$\bar{0}$	
X_1	25.37	26.87	28.17	25.21	25.20	22.25	25.41	23.95	20	40	60	
X_2	377.30	348.18	319.14	344.18	287.41	328.65	269.54	322.70	389.5	322.5	270	
X_3	368.6	325.4	391.4	428.9	312.3	428.7	358.8	450.1	659.1	532.7	406.4	
X_4	72.34	74.51	75.73	75.92	69.24	73.00	64.19	70.03	50	70	90	
X_5	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1	19.1	20.1	21.1	60	30	25	
X_6	11 913	12 970	15 581	17 974	18 710	21 918	25 341	27 741	20 000	12 400	4 800	
X_7	2.54	2.46	2.32	2.10	1.76	1.66	1.60	1.54	1.762	2.554	2.890	
X_8	40.60	41.00	42.16	57.44	68.36	68.94	62.20	78.69	100	80	60	
X_9	87	91	97	109	119	108	109	110	500	300	100	
X_{10}	83	85	93	97	93	93	90	91	100	90	80	
X_{11}	69.20	67.59	72.64	77.58	81.69	79.85	82.53	83.98	100	65	20	
X_{12}	31.38	26.72	25.10	9.28	17.89	18.10	88.00	57.42	50	30	15	

表4 水资源承载力指数分级

Tab.4 Classification standards for water resources carrying capacity index

等级	水资源承载力指数	水资源承载力
\bar{N}	0.6~1	较强
$\bar{0}$	0.2~0.6	一般
$\bar{0}$	0~0.2	较弱

2.2 大同市水资源承载力评价的集对分析

采用集对分析法,根据式(2)、式(3)计算各年各指标与评价标准的联系度 μ_l (表5)。经验因子 α 取 0.6,利用组合赋权法确定各指标的权重值为 $W = (0.062, 0.065, 0.042, 0.113, 0.037, 0.098, 0.142, 0.088, 0.038, 0.093, 0.101, 0.121)$ 。基于组合权重的集对分析模型计算各年样本与评价标准的综合联系度 $\bar{\mu}$ (表5),依照评分准则计算各年水

源承载力指数(表 6), 绘制评价年份大同市水资源承载力变化趋势(图 4)。

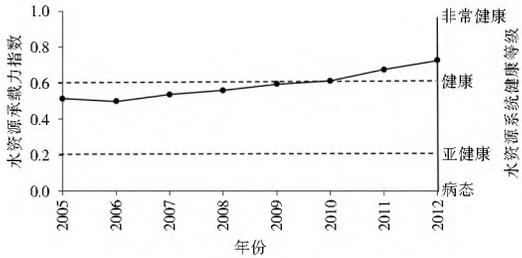


图 4 大同市水资源承载力变化趋势

Fig. 4 Tendency of water resources carrying capacity index of Datong City

置信度取 0.6, 依据置信度准则, 表 5 显示, 2005 年-2007 年水资源承载力的等级均为 0 级, 属一般情况, 与评分准则(表 6)结果一致; 2008 年-2012 年因 f_1, f_2, f_3 差值不大, 难以根据置信度准则给出准确合理的判定结果, 故采用评分准则。表 6 显示, 2008 年、2009 年水资源承载力为 0 级(一般), 2010 年-2012 年为 N 级(较强)。图 4 直观给出了评价年份大同市水资源承载力的变化趋势, 2005 年-2012 年大同市水资源承载力指数在 0.499~0.728 之间。

分析评价结果发现: 随着万元 GDP 能耗的降低, 工业废水排放达标率、城镇生活污水处理率和污水灌溉利用率指标的提高, 除 2006 年水资源承载力指数下降外, 大同市水资源承载力指数在逐年增大, 承载力水平也在逐年增强。特别是

表 5 联系度计算

Tab. 5 Connection degree results

评价样本 联系度	2005 年			2006 年			2007 年			2008 年		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
μ_1	0.732	0.268	0	0.656	0.344	0	0.591	0.409	0	0.740	0.260	0
μ_2	0.818	0.182	0	0.383	0.617	0	0	0.936	0.064	0.324	0.676	0
μ_3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0.178	0.822
μ_4	0	0.883	0.117	0	0.774	0.226	0	0.713	0.287	0	0.704	0.296
μ_5	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
μ_6	0	0.936	0.064	0.075	0.925	0	0.419	0.581	0	0.733	0.267	0
μ_7	0.018	0.982	0	0.119	0.881	0	0.295	0.705	0	0.573	0.427	0
μ_8	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
μ_9	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0.044	0.956
μ_{10}	0	0.300	0.700	0	0.500	0.500	0.328	0.672	0	0.719	0.281	0
μ_{11}	0.120	0.880	0	0.074	0.926	0	0.218	0.782	0	0.359	0.641	0
μ_{12}	0.069	0.931	0	0	0.782	0.218	0	0.673	0.327	0	0	
$\bar{\mu}$	10.107	0.569	0.324	0.088	0.571	0.341	0.161	0.516	0.323	0.297	0.304	0.399

评价样本 联系度	2009 年			2010 年			2011 年			2012 年		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
μ_1	0.740	0.260	0	0.888	0.112	0	0.730	0.271	0	0.802	0.198	0
μ_2	0	0.332	0.668	0.092	0.908	0	0	0	1	0.003	0.997	0
μ_3	0	0	1	0	0.177	0.823	0	0	1	0	0.346	0.654
μ_4	0.038	0.962	0	0	0.850	0.150	0.291	0.709	0	0	0.998	0.002
μ_5	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
μ_6	0.830	0.170	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
μ_7	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
μ_8	0	0.418	0.582	0	0.447	0.553	0	0.110	0.890	0	0.935	0.066
μ_9	0	0.093	0.907	0	0.038	0.962	0	0.044	0.956	0	0.052	0.948
μ_{10}	0.269	0.731	0	0.269	0.731	0	0	1	0	0.100	0.900	0
μ_{11}	0.477	0.523	0	0.424	0.576	0	0.501	0.499	0	0.542	0.458	0
μ_{12}	0	0.193	0.807	0	0.207	0.793	1	0	0	1	0	0
$\bar{\mu}$	0.322	0.338	0.339	0.342	0.344	0.313	0.476	0.242	0.282	0.459	0.402	0.139

表 6 大同市水资源承载力指数计算结果

Tab. 6 Calculation results of water resources carrying capacity index of Datong City

评价样本	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
水资源承载力指数	0.514	0.499	0.535	0.559	0.593	0.612	0.677	0.728
水资源承载能力	0	0	0	0	0	N	N	N

自 2009 年起, 市政府实施了《大同市规划市区水资源现状及配置规划》、《大同市创建国家节水型城市工作实施方案》、

《大同市“十二五”城镇污水处理及再生利用设施建设实施方案》、《关于进一步促进全市煤炭经济转变发展方式实现可持

续增长的实施意见》等诸多关于合理配置水资源、完善水资源管理体系以及提高水资源综合利用率的措施,可以看出已取得一定的成效。但是,大同市历年人均水资源占有量不足 400 m^3 (远低于国际公认 $1\ 000\text{ m}^3/\text{人}$ 的缺水警戒线^[18])、地下水开采比重高,致使水资源系统长期处于健康与亚健康状态间,承载力指数不高,承载力水平不强。所以,大同市通过产业转型、结构调整、技术改进等来继续缩小水资源需求和消耗的潜力依然很大;同时,在推进节水型社会建设的基础上,可采取一定的措施(加大外流域调水、加强政策法规执法力度、推广再生水使用、提高公众节水意识等),进一步加大水资源管理、水环境保护以及水污染控制的力度,实现水资源承载力水平的提高和水资源系统健康状态的改善。

3 结论

本文提出的基于水资源系统健康的水资源承载力由资源弹性力和人类支持力构成,反映了水资源系统在一定条件下维持自身健康和供给社会经济发展的能力;在此基础上,建立的基于组合权重的集对分析评价模型实现了评价过程中主观与客观的统一,评价结果采用置信度准则和评分准则双重判别标准,既可动态显示水资源承载力的变化趋势,又可解决关联度相近时评价结果失真的问题。实例研究表明,基于水资源系统健康的水资源承载力评价结果与实际相符,验证了模型方法的可操作性和合理性,为水资源承载力研究提供了一条新途径。

参考文献(References):

- [1] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载能力综合评价—主成分分析法的应用[J].长江流域资源与环境,1999(2):168-173.(FU Xiang,JI Chang ming. A comprehensive evaluation of the regional water resource carrying capacity—Application of main component analysis method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,1992(2):168-173.(in Chinese))
- [2] 龙腾锐,姜文超.水资源(环境)承载力的研究进展[J].水科学进展,2003(2):249-253.(LONG Teng rui,JIANG Wen chao. Advances in water resources and water environment carrying capacity[J]. Advances in Water Science,2003(2):249-253.(in Chinese))
- [3] 卜楠楠,唐德善,尹笋.基于AHP法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J].水电能源科学,2012(3):42-44,41.(BU Nan nan,TANG De shan,YIN Sun. Fuzzy comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhejiang Province based on AHP method[J]. Water Resources and Power,2012(3):42-44,41.(in Chinese))
- [4] 曾现进,李天宏,温晓玲.基于AHP和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J].环境科学与技术,2013(6):200-205.(ZENG Xian jin,LI Tian hong,WEN Xiao ling. Analysis on carrying capacity of water environment in Yichang City based on AHP and vector norm method[J]. Environmental Science and Technology,2013(6):200-205.(in Chinese))
- [5] 林占东,郝佩,刘正坤.城市水资源承载力综合评价的DEPPIM[J].中国农村水利水电,2008(12):59-62.(LIN Zhan dong,ZHENG Kan,LIU Zheng kun. Comprehensive evaluation of water resource carrying capacity Based on DEPPIM[J]. China Rural Water and Hydropower,2008(12):59-62.(in Chinese))
- [6] 王丽萍,郑江涛,周晓蔚,等.水电梯级开发对生态承载力影响的研究[J].水力发电学报,2011(1):12-16,23.(WANG Li ping,ZHENG Jiang tao,ZHOU Xiao wei,et al. Evaluation of the ecosystem carrying capacity impact caused by the cascade hydropower development[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2011(1):12-16,23.(in Chinese))
- [7] 罗跃初,周忠轩,孙轶,等.流域生态系统健康评价方法[J].生态学报,2003(8):1606-1614.(LUO Yue chu,ZHOU Zhong xuan,SUN Yi,et al. Assessment methods of watershed ecosystem health[J]. Acta Ecologica Sinica,2003(8):1606-1614.(in Chinese))
- [8] 郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态系统健康评价初探[J].中国环境科学,2002(6):46-50.(GUO Xiurui,YANG Jurong,MAO Xian qian. Primary studies on urban ecosystem health assessment[J]. China Environmental Science,2002(6):46-50.(in Chinese))
- [9] 杨志峰,隋欣.基于生态系统健康的生态承载力评价[J].环境科学学报,2005(5):586-594.(YANG Zhi feng,SUI Xin. Assessment of the ecological carrying capacity based on the ecosystem health[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005(5):586-594.(in Chinese))
- [10] 王志良,李楠楠,张先起,等.基于集对分析的区域水资源承载力评价[J].人民黄河,2011(4):40-42.(WANG Zhi liang,LI Nan nan,ZHANG Xian qi,et al. Evaluation of the regional water resource carrying capacity based on set pair analysis method[J]. Yellow River,2011(4):40-42.(in Chinese))
- [11] 王文圣,金菊良,丁晶,等.水资源系统评价新方法—集对评价法[J].中国科学(E辑:技术科学),2009(9):1529-1534.(WANG Wen sheng,JIN Jiliang,DING Jing,et al. A new approach to water resources system assessment—Set pair analysis method[J]. Sci China Ser E Tech Sci,2009(9):1529-1534.(in Chinese))
- [12] 徐泽水.不确定多属性决策方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2004.(XU Ze shui. Uncertain Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications[M]. Tsinghua University Press,2004.(in Chinese))
- [13] 程乾生.属性识别理论模型及其应用[J].北京大学学报:自然科学版,1997(1):14-22.(CHENG Qian sheng. Attribute recognition theoretical model with application[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,1997(1):14-22.(in Chinese))
- [14] 向红梅.区域水安全评价指标体系的构建与应用研究[D].广州:暨南大学,2011.(XIANG Hong mei. Research on construction and application of index system for regional water security assessment[D]. Guangzhou: Jinan University.(in Chinese))
- [15] 潘建波,张修宇,赵焕平.区域水资源可持续利用评价熵理想物元模型[J].人民黄河,2011(7):69-72.(PAN Jian bo,ZHANG Xiuyu,ZHAO Huan ping. Based entropy weight ideal fuzzy matter element model for assessment of regional water resources sustainable utilization system[J]. Yellow River,2011(7):69-72.(in Chinese))
- [16] 宰松梅,温季,仵峰,等.河南省新乡市水资源承载力评价研究[J].水利学报,2011(7):783-788.(ZAI Song mei,WEN Ji,WU Feng,et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinxiang City[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011(7):783-788.(in Chinese))
- [17] 贾玥.北京缺水已破国际警戒线的1/10[EB/OL].http://politics.people.com.cn/GB/99014/14670416.html.2011-05-18.(JIA Yue. Beijing has broken 1/10 of international warning line of water[EB/OL].http://politics.people.com.cn/GB/99014/14670416.html.2011-05-18.(in Chinese))