

基于 TOPSIS 的灰色关联法在水资源安全评价中的应用研究

池静静, 陈彬

(北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

摘要: 水资源安全综合评价是近年来水资源管理研究领域的热点问题。构建了基于 TOPSIS 的水资源安全灰色关联综合评价模型, 并对北京市 1996—2006 年水资源安全状况进行了研究。结果表明, 北京市 1996—2006 年水资源和最优化评价集的灰色相对贴近度最小和最大值分别为 1999 年的 0.350 和 2006 年的 0.507; 评价期间北京市水资源安全状况极其严峻, 但总体呈现出改善的趋势, 水资源安全指标的因子分析显示北京市水资源所面临的压力不断增长, 而大部分状态和响应指标逐渐改善。根据北京市水资源安全评价及分析结果提出了针对性的改善水资源安全的建议, 为城市水资源管理和调控提供决策依据。

关键词: 水资源安全; TOPSIS; 灰色关联综合评价; 灰色相对贴近度; 因子分析

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2009)02—0155—05

中图分类号: P967, TV213

Application of TOPSIS Based Grey Correlation Analysis in Integrated Water Resource Security Evaluation

CHI Jing-jing, CHEN Bin

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Integrated water resource security evaluation has been a hot topic in the research of water resource management in recent years. The TOPSIS based grey correlation integrated evaluation model of water resource security was established and applied to the case study of Beijing City from 1996 to 2006. It was demonstrated that the grey relative closeness degrees of water resource security to the positive ideal solution were quite low, with the least one of 0.350 in 1999 and the largest one of 0.507 in 2006, which implied that the water resource of Beijing City was facing severer challenges, although its general situation had been improving slowly during the concerned time. The analysis of water resource security indices indicated that the supply insufficiency of water resource was increasing, while the values of state and response indices were improving gradually. Finally, suggestions were proposed to improve the water resource security status of Beijing according to the evaluation results, which will lay solid foundation for the urban water resource management and regulation.

Keywords: water resource security; TOPSIS; integrated grey correlation evaluation; grey relative closeness degree; factor analysis

社会、经济的飞速发展以及气候变化的影响,使人类面临水资源问题的严峻挑战。在这种背景下,水资源安全研究逐渐成为水资源领域的研究热点并不断深入,已经从概念和内涵的辨析^[1-2]及定性研究^[3-6]发展到通过综合的指标体系和评价方法对水资源安全状况进行定量评价和分析。目前运用较多的定量评价方法主要有系统动力学法^[7]、模糊数学法^[8]、集对分析法^[9]、物元分析法^[10]等。由于区域水资源系统是由资源、社会、经济子系统耦合而成的复杂巨系

统,具有信息不完全的灰色系统的特征,其它的数学方法在定量描述水资源这样一个复杂的灰色系统的时候丢失一定的不确定信息,而灰色关联分析理论则适宜对灰色系统进行较为准确、动态性的系统分析。因此,本文将基于 TOPSIS(technique for order performance by similarity to ideal solution)的灰色关联评价模型引入区域水资源安全综合评价,结合综合评价指标体系,对区域水资源安全状况、影响因子、政策响应进行综合评价和系统分析。

收稿日期:2008-10-26

修回日期:2008-12-12

资助项目:国家自然科学基金项目“流域生态水资源可用量评价理论与方法研究”(40701023)

作者简介:池静静(1984—),女(汉族),河南省漯河市人,硕士研究生,主要研究方向为水资源规划与管理。E-mail:jingjingchi@yahoo.cn.

1 基于 TOPSIS 的灰色关联综合评价模型

1.1 TOPSIS 和灰色关联分析法

TOPSIS 是一种多属性决策方法。其基本思想是所选决策方案应和最优决策方案距离最近,同时距离最劣决策方案最远^[11-12]。灰色关联分析则通过评价对象和参考对象的关联程度来衡量评价对象,关联度越大,和参考对象越接近^[13]。灰色关联分析克服了回归分析和随机过程理论的不足,对数据要求低,计算量小,计算结果较为全面、客观,在生态环境、社会经济、工程管理、多属性评价等众多领域得到广泛应用^[13-15]。

TOPSIS 和灰色关联分析法的结合在实现对水资源这样一个灰色系统较为准确的系统分析的同时,能够从最优和最劣两个角度进行考虑,评价结果更具综合性,可提高系统评价贴切度。目前这两种方法有综合应用于经济、管理等领域的方案优选^[16-17],尚无用于区域水资源安全的综合评价案例。

1.2 基于 TOPSIS 的灰色关联综合评价模型

设水资源安全综合评价问题为 $Q = \{S, M, H\}$, 其中 $S = \{s_k\} (k=1, 2, \dots, i)$ 为评价时间集, s_k 为第 k 个评价时间; $M = \{m_r\} (r=1, 2, \dots, n)$ 为水资源安全综合评价指标集; 决策矩阵为 $H = \{H_{kr}\} i \times n$, H_{kr} 为评价时间 s_k 关于指标 m_r 的属性值。

记水资源安全评价时间集组成的比较序列为 $X_k = \{X_1(r), X_2(r), X_k(r) \dots X_i(r)\} (k=1, 2, \dots, i)$, 每一比较序列包括该年 n 个水资源安全评价指标值。各评价指标的最优值和最劣值分别组成最优参考序列 $M^* = \{M^*(1), M^*(2), M^*(r) \dots M^*(n)\}$ 和最劣参考序列 $M_0 = \{M_0(1), M_0(2), M_0(r) \dots M_0(n)\}$ 。基于 TOPSIS 的水资源安全灰色关联综合评价步骤如下:

步骤 1: 采用熵权法^[18]确定指标权重 $W = \{w_r\} (r=1, 2, \dots, 19)$ 。

步骤 2: 标准化评价矩阵。对比较数列和参考数列组成的矩阵数据采用极差方法进行标准化, 消除各个指标量纲影响。标准化后的比较序列记为 $Y_k = \{Y_1(r), Y_2(r), Y_k(r) \dots Y_i(r)\} (k=1, 2, \dots, i)$, 最优参考序列 $Y^* = \{Y^*(1), Y^*(2), Y^*(r) \dots Y^*(n)\}$, 最劣参考序列 $Y_0 = \{Y_0(1), Y_0(2), Y_0(r) \dots Y_0(n)\}$ 。

步骤 3: 计算比较序列和最优参考序列和最劣参考序列的灰色关联度 r_k^*, r_{k0} 。

首先计算评价时间 $X(k)$ 的 r 指标与最优参考序列和最劣参考序列对于 m_r 指标的灰色关联系数:

$$r(Y^*, Y_{kr}) = \frac{\min_{k \in i, r \in n} \min |Y^*(r) - Y_k(r)| + \epsilon \max_{k \in i, r \in n} \max |Y^*(r) - Y_k(r)|}{|Y^*(r) - Y_k(r)| + \epsilon \max_{k \in i, r \in n} \max |Y^*(r) - Y_k(r)} \quad (1)$$

$$r(Y_0, Y_{kr}) = \frac{\min_{k \in i, r \in n} \min |Y_0(r) - Y_k(r)| + \epsilon \max_{k \in i, r \in n} \max |Y_0(r) - Y_k(r)|}{|Y_0(r) - Y_k(r)| + \epsilon \max_{k \in i, r \in n} \max |Y_0(r) - Y_k(r)} \quad (2)$$

式中: ϵ ——分辨率, $0 < \epsilon < 1$, 一般取 $\epsilon = 0.5$ 。各评价对象与最优参考数列和最劣参考序列的灰色关联矩阵分别为 R_k^* 和 R_{k0} 。

随后计算评价时间 $X(k)$ 与最优参考序列和最劣参考序列的综合灰色关联度:

$$r_k^* = r(M^*, X_k) = \sum_r W_r r(Y^*, Y_{kr}) \quad (3)$$

$$r_k^0 = r(M_0, X_k) = \sum_r W_r r(Y_0, Y_{kr}) \quad (4)$$

步骤 4: 计算评价时间序列水资源安全状况与最优评价集的灰色关联相对贴切度 q_k , ($0 < q_k < 1$), q_k 越大, 表明其与最优评价集越接近, 状况越好。

$$q_k = r_k^* / (r_k^* + r_k^0) \quad (5)$$

2 北京市水资源安全综合评价

北京是我国资源性缺水最为严重的城市之一。近年来, 北京市人口、经济、社会的快速增长, 使其水资源面临更加严峻的挑战。因此对北京市的水资源安全状况进行时间序列 (1996—2006 年) 的综合评价, 深入探讨水资源安全的限制因子和响应机制, 具有重要的现实意义。

2.1 指标体系和权重确定

水资源安全概念和内涵的明晰是建立评价指标体系的基础。本文在深入研究相关文献^[1-3, 5]的基础上把水资源安全定义为某一区域水资源对其社会、经济、生态环境可持续发展的持续支持状态。

在内涵上水资源安全包括 3 个方面。(1) 水质安全。水资源的质量不应影响其利用价值, 这是水资源安全最基本的层次。(2) 水量安全。水资源量能满足区域社会经济发展和生态环境保持良好状态的需要。水量安全是水资源安全的基础保障。(3) 社会调控力安全。有限的水资源在无限的人类需求压力下其状况只能逐渐恶化, 但是人类可通过自身的不断调整适应水资源状态, 保证其处于相对安全状态。水资源安全的社会调控力指人类社会在有限的水资源条件下通过自身行为的调整、完善、不断改善水资源安全状况的能力。

总的来说, 对水资源系统这样一个由资源、社会、经济子系统耦合而成的复杂巨系统的分析, 应综合考虑各个子系统的行为特征, 而不是仅仅着眼于某一子系统。

据此,本文根据压力 (pressure)—状态 (state)—响应 (response) 概念模型,在对初选指标进行相关性分析的基础上,综合考虑北京市实际情况,指标的全面性,数据可获得性等原则构建北京市水资源安全综合评价指标体系(表 1)。为保证指标权重的客观性,选取熵权法确定指标权重。

2.2 最优评价集及最劣评价集确定

最优评价集和最劣评价集的确定综合考虑了北京市的现实情况,相关指标的国家、国际现状、及指标的拓展可能性,并参考相关研究确定方法^[18]。(1) 参考国家生态省市建设标准或相关的国际标准,如每

1 hm² 耕地化肥施用量最优值等。(2) 参考指标目前的国内或国际较优值。如人均 GDP 参考 2005 年发达国家和低收入国家值分别作为最优值和最劣值。(3) 参考现有研究结果。如水费支出占家庭人均可支配收入比例最优值依据水费支出占家庭人均可支配收入 3%~5% 时对水资源节约效果明显而定^[19]。(4) 依据指标可能达到的最优和最劣值,如污水处理率等指标最优值。(5) 对最优和最劣值确定有很大困难和模糊性的指标,在参考相关文献和标准取值范围的前提下,参考评价期内最优或最劣值。最优评价集和最劣评价集具体取值见表 2—4。

表 1 北京市水资源安全综合评价指标体系

目标层	准则层	要素层	指标层	权重		
水资源安全综合评价指标体系	压力指标	水资源压力 P ₁	人均水资源量 P ₁₁	0.095 9		
			地均水资源量 P ₁₂	0.060 7		
			水资源开发利用 P ₁₃	0.023 6		
		水环境压力 P ₂	每公顷耕地化肥施用量(折纯) P ₂₁	0.037 7		
			废水排放负荷 P ₂₂	0.025 8		
			人均日生活用水量 P ₃₁	0.063 0		
		社会经济压力 P ₃	万元 GDP 水耗 P ₃₂	0.029 0		
			状态指标	水资源状态 S ₁	水资源供需比 S ₁₁ , (水资源总量/总供水量)	0.045 7
					单位面积农田灌溉用水量 S ₁₂	0.052 4
	水环境状态 S ₂	达标水库库容百分比 S ₂₁		0.019 9		
		达标湖泊库容百分比 S ₂₂		0.044 8		
		水质达标河段百分比 S ₂₃		0.022 9		
	社会经济状态 S ₃	污水达标处理率 S ₃₁		0.060 2		
		工业废水排放达标率 S ₃₂	0.039 4			
		工业用水重复利用率 S ₃₃	0.039 3			
响应指标	水资源管理、投资、政策、社会响应 R _i	人均 GDP(S ₃₄)	0.009 5			
		第三产业比重 R ₁₁	0.026 5			
		环境保护投资占 GDP 比重 R ₁₂	0.042 7			
		水费支出占家庭人均可支配收入比例 R ₁₃	0.021 9			
		再生水回用率 R ₁₄	0.195 0			
		节水器具推广率 R ₁₅	0.044 1			

注:①水资源开发利用=(总供水量-外流域调水量)/水资源总量。

表 2 不同压力指标时最优和最劣评价集指标值

压力指标	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₂₁	P ₂₂	P ₃₁	P ₃₂
最优值	364.2	272 909.01	0.4	200	5591.67	105.10	25
最劣值	95.5	84 603.58	2.916	700	63979.66	281.84	300

表 3 不同状态指标时最优和最劣评价集指标值

状态指标	S ₁₁	S ₁₂	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃	S ₃₁	S ₃₂	S ₃₃	S ₃₄
最优值	1.146	235	100	100	100	100	100	100	287 783
最劣值	0.343	401	49	35	36	20	28	30	4 751

表 4 不同响应指标时最优和最劣评价集指标值

响应指标	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅
最优值	80.0	4.70	3.0	100	100
最劣值	29.3	0.71	0.1	0	0

2.3 结果与讨论

2.3.1 北京市 1996—2006 年水资源安全状况 根据前文所述方法,计算 1996—2006 年北京市水资源和最优评价集的灰色相对贴近度 q 以及和最优最劣评价指标的灰色关联度 r^* 和 r^0 如表 5 所示。由如表 5 可见,北京市 1996—2006 年水资源安全对最劣

表 5 基于 TOPSIS 的灰色关联综合评价模型所得的北京市水资源安全状况

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
r^*	0.527	0.410	0.467	0.420	0.445	0.447	0.447	0.450	0.468	0.501	0.558
r^0	0.702	0.741	0.685	0.780	0.723	0.706	0.729	0.715	0.638	0.594	0.543
q	0.429	0.356	0.405	0.350	0.381	0.388	0.380	0.386	0.423	0.458	0.507

从 1999 年开始,北京市经历了连续 7 a 的干旱期,水库蓄水入不敷出,同时期常住人口增长了 300 多万,GDP 增长了 3 倍,其水资源安全状况在多重压力下没有出现急剧恶化反而呈现改善趋势,这表明北京市多角度多层次的水资源保护和政策调控在发挥作用。为了缓解严重的水资源压力,北京市采取了一系列外流域调水,水资源保护,节约用水,产业结构调整措施。比如通过加强节水型社会建设力度和水价调整等措施促进节约使用;加快高耗水行业退出,优化产业结构;2006 年北京市使用再生水 $3.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计 2010 年再生水使用率将达到 50%;另外,北京市也积极通过加强水土保持,生态环境建设和清洁小流域建设等改善水资源状况。

2.3.2 北京市 1996—2006 年水资源安全影响因子动态分析 评价时间段内各评价指标和最优及最劣评价集的灰色关联度可用来分析水资源安全影响因

评价集的灰色关联度远远高于对最优评价集的灰色关联度,灰色相对贴近度 1999 年达到最低值的 0.350,最大值也仅为 0.507,显示出北京市水资源在评价时期面临着极其严峻的水资源压力。同时也可以看出,评价期水资源安全状况整体呈改善趋势,尤其是从 2003 年起改善较为明显。

子的动态变化情况,寻找影响水资源安全的关键制约因子。本文选取 1996,2000,2003,2006 年 4 a 水资源安全评价指标和最优评价集的灰色关联度进行详细分析。

从图 1 可以看出,从 1996 到 2006 年北京市水资源安全评价指标体系中压力指标如人均水资源量 (P_{11})、地均水资源量 (P_{12})、每 1 hm^2 耕地化肥施用量 (P_{21})、废水排放负荷 (P_{22}) 与最优评价集的灰色关联度逐渐变小,表明评价期水量和水质压力都在增加;人均日生活用水量 (P_{31}) 和万元 GDP 水耗 (P_{32}) 的灰色关联度持续增加,显示出水资源利用效率的提高,此方面的压力有所减轻。同时,水资源安全的一些状态和响应指标的灰色关联度逐渐变大,表明水资源利用效率、调控的效果和力度有所改善。但是,湖泊和河流水质指标的灰色关联度处于下降趋势,表明北京市水资源的水质污染在加剧。

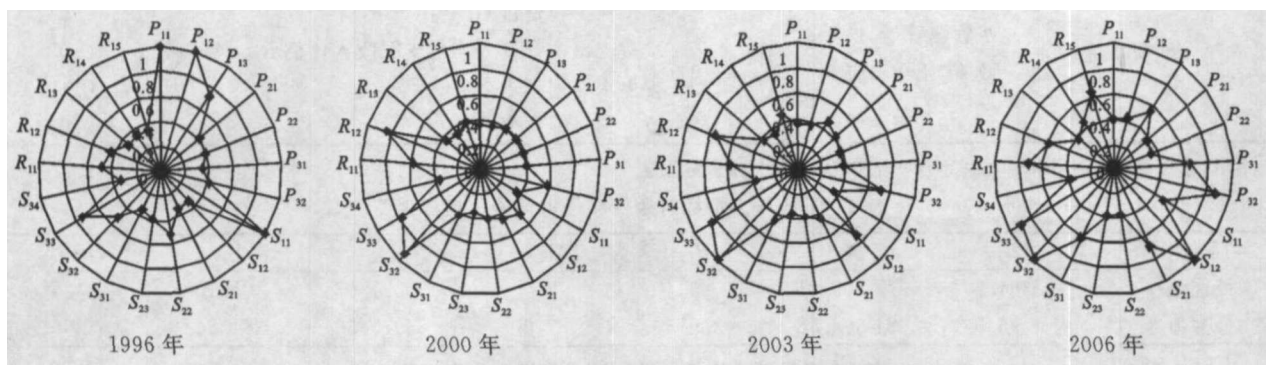


图 1 北京市水资源安全评价指标与最优评价集灰色关联度

到 2006 年,北京市万元 GDP 水耗 (P_{32})、工业废水排放达标率 (S_{32})、工业用水重复利用率 (S_{33})、第三产业比重 (R_{11}) 等指标和最优评价集的灰色关联度已经分别达到 0.881,0.981,0.897,0.717,处于较高水平。同期灰色关联度较低的指标有每 1 hm^2 耕地化肥施用量 P_{21} (0.363)、废水排放负荷 P_{22} (0.333)、

水质达标湖泊库容百分比 S_{22} (0.354)、水质达标河段长度百分比 S_{23} (0.375)、水资源开发利用效率 (P_{13})、水资源供需比 (S_{11}),表明目前北京市承受着严峻的面源污染排放以及废水排放压力,境内河湖的水质状况较差,存在严重的水质污,并且水资源超采严重。因此北京市水资源状况的改善应着重从控制污染源排

放,增加非常规水源供给,提高水资源利用率,节约用水等措施入手。

从响应指标来看,水费占家庭人均可支配收入百分比(0.369)的灰色关联度较低,表明北京市水价还有较大的提升空间,可通过建立合理的水价体系促进水资源节约利用。另外,2006 年北京市再生水回用率和最优评价集的灰色关联度为 0.449,虽然目前北京市再生水使用在国内已经处于较高水平,但是鉴于其严峻的水资源状况,应不断提高再生水使用水平,使其在今后成为北京市的一个重要水源。从图 1 中也可以看出北京市人均 GDP 的灰色关联度不甚理想,主要原因在于采用的最优评价集标准参考了高收入国家的平均水平,这也说明北京市还可通过提高经济实力从而为水资源保护提供更为坚实的经济基础。

3 结论

本文构建了基于 TOPSIS 的灰色关联综合评价模型,对北京市水资源安全状况进行了综合评价。其中,最优、最劣评价集是目前自然、经济和技术条件下水资源复合系统的最优和最劣值。一方面,水资源安全状况的指标综合成一个与最优评价集的灰色关联相对贴适度,用来评价水资源安全状况。这种方法不仅能够客观全面地反映水资源安全状况的动态变化,更减少了采用其它方法时需要主观确定各级评价标准的干扰。另一方面,灰色关联分析方法所得到的不同评价年份各指标与最优评价集的灰色关联度可用来分析其对水资源安全影响的变化情况,进行关键因子分析并据之提出响应政策。因此,基于 TOPSIS 的灰色关联分析法在水资源安全综合评价中具有一定的优越性和较高的应用价值。

本文的研究结果定量描述了北京市 1996 到 2006 年水资源安全的状况,主要表现在:自然状况不佳,遭遇长期干旱;面源污染和废水排放加剧,水质较差;水资源保护投资力度尚需提高。同时部分水资源系统的状态和响应指标如工业废水达标排放率,工业废水重复利用率、第三产业比重、再生水回用率等指标的改善一定程度上缓和了北京市严峻的水资源状况,使评价期内水资源安全呈改善趋势。但是北京市水资源难题的实质性缓和尚需在对其深入研究分析的基础上,采取针对性的水资源管理和调控措施,提高水资源保护的力度和效率。

[参 考 文 献]

[1] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.

- [2] 方红远. 区域水资源安全概念浅析[J]. 人民长江,2007,38(6):29-32.
- [3] 姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展,2001,12(1):66-71.
- [4] 闵庆文,于贵瑞,余卫东. 西北地区水资源安全的生态系统途径[J]. 水土保持研究,2003,10(4):272-307.
- [5] 夏军,刘梦雨,贾绍凤,等. 华北地区水资源及水安全问题的思考与研究[J]. 自然资源学报,2004,19(5):550-560.
- [6] 冯凤玲,成杰民,杨圣军. 济南市水安全问题成因分析及防治对策[J]. 水土保持研究,2006,13(4):57-60.
- [7] 张巧显,欧阳志云,王如松,等. 中国水安全系统模拟及对策比较研究[J]. 水科学进展,2002,13(5):569-577.
- [8] 韩宇平,阮本清,解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学,2003,25(4):37-42.
- [9] 卢敏,张展羽,石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-508.
- [10] 李凤英,王让会,黄俊芳,等. 中国西部地区水安全的多指标物元综合评价[J]. 干旱区研究,2006,23(2):269-274.
- [11] Wang T C, Chang T H. Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 33: 870-880.
- [12] Hsu S S, Shyurb H J, Lee E S. An extension of TOPSIS for group decision making[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2007, 45: 801-813.
- [13] He R S, Hwang S F. Damage detection by a hybrid real-parameter genetic algorithm under the assistance of grey relation analysis[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007,20:980-992.
- [14] Lin S J, Lu I J, Lewis C. Grey relation performance correlations among economics, energy use and carbon dioxide emission in Taiwan[J]. Energy Policy, 2007, 35: 1948-1955.
- [15] Wang Y J. Combining grey relation analysis with FM-CGDM to evaluate financial performance of Taiwan container lines[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36:2424-2432.
- [16] Chen M F. Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2004, 40: 1473-1490.
- [17] Zhan J J, Wu D S, Olson D L. The method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2005, 42: 991-998.
- [18] 左伟,王桥,王文杰,等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究,2002,18(1):67-71.
- [19] 范英英,刘永,郭怀成,等. 北京市水资源政策对水资源承载力的影响研究[J]. 资源科学,2005,27(5):113-119.