

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.007

区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型

尹志杰^{1,2,3}, 管玉卉⁴, 胡晓雪⁵

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 水利部水文局, 北京 100053; 4. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 5. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 总结评价区域水资源可持续利用水平的若干指标, 应用集对分析理论建立了区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型。用差异度系数分析所论集对的同异反联系, 从目标层、准则层、评价指标层等 3 个层次上系统阐明了集对分析理论在各层指标评价过程中的意义, 通过计算区域水资源可持续利用系统评价的 n 元联系数, 确定了某区域水资源可持续利用系统的综合评价级别, 评价结论为一般。

关键词: 区域水资源; 可持续利用; 集对分析; 模型分析

中图分类号: TV213.4; O221.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2010)06-0028-04

Set pair analysis model for assessment of regional water resources sustainable utilization system

YIN Zhi-jie^{1,2,3}, GUAN Yu-hui⁴, HU Xiao-xue⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 5. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The set pair analysis model for assessment of the regional water resources sustainable utilization system was established on the basis of summary of several indicators of regional water resources utilization assessment. The identity-discrepancy-contrary (IDC) connection degree of certain set pairs can be identified by processing variance coefficient analysis. The significance of set pair analysis for assessing indicators at different levels was systematically illustrated from the objective level, principle level, and indicator level. The comprehensive assessment level of a certain regional water resources sustainable utilization systems was determined through calculating the n -number connection of the system, and the assessment result turned out to be the general level.

Key words: regional water resources; sustainable utilization; set pair analysis; model analysis

目前, 区域水资源可持续利用系统评价最常用的方法有模糊集理论方法、神经网络理论方法、灰色系统理论法、数理统计方法等^[1-2]。但由于水资源可持续利用系统的复杂性, 这些方法不同程度地都存在筛选标准不明确, 难以反映评价系统的不同

层次与不同方面的状况, 以及建模复杂等缺陷^[3-4]。如模糊理论中隶属度的确定常常带有主观随意性, 往往丢弃了模糊不确定性在一定范围不确定的信息^[5]; 神经网络理论方法建模过程复杂, 且只有满足一定的建模条件才具有自学性、非线性逼近和

泛化能力^[6],灰色系统理论方法灰色关联分析法存在评价价值趋于均化、分辨率不高的缺点^[7],数理统计法往往需要大量的实测数据支撑,对样本容量较小情形则不适用^[8]等。

1989年,赵克勤^[9]提出了一种新的不确定性理论——集对分析理论(set pair analysis, SPA),把被研究客观事物的确定性与不确定性视作一个确定不确定系统,用联系度 $\mu = a + bi + cj$ 把对不确定性的辩证认识转换成具体的数学问题。笔者将集对分析理论用于水资源可持续利用系统评价过程中,在分析水资源可持续利用系统不确定性因素的基础上,把评价指标和评价标准构成一个集对去分析其同异反联系,并将多个系统指标表示成一个能从总体上衡量水资源可持续利用水平的 n 元联系数,从而定量计算出不同层次上的水资源可持续利用水平。

1 集对分析模型的概述

1.1 集对分析的基本原理^[9]

对于两个给定的集合组成的集对 $H=(A, B)$,在某个具体问题背景(设为 W)下,对集对 H 的特性展开分析,共得到 N 个特性,其中有 S 个为集对 H 中两个集合 A 和 B 共同具有的,有 P 个特性为两个集合对立的,其余的 $F = N - S - P$ 个特性既不相互对立又不为这两个集合共同具有,则有:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

令 $a = \frac{S}{N}, b = \frac{F}{N}, c = \frac{P}{N}$, 则式(1)可简写为

$$\mu = a + bi + cj \quad (2)$$

式中 $\mu \in [-1, 1]$ 称为 A, B 两个集合的联系度,可以全面、系统地刻画所要研究集对之间的同异反联系,所以又称为同异反联系度; a 为两个集合在问题 W 下的同一度; b 为两个集合在问题 W 下的差异度; c 为两个集合在问题 W 下的对立度; $a, b, c \in [0, 1]$ 为实数, a, c 相对确定, b 相对不确定,三者满足归一化条件 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$, 主要体现不确定性,根据实际情况的不同取值不同; j 为对立度系数,在一般情况下规定其值恒取 -1 , 以表示对立度 P/N 与同一度 S/N 相反。

联系度主要特点有:①层次性。差异度系数 i 是在 μ 中的 a, b, c 确立之后才确定的,目的在于使“ bi ”项能同时体现不确定性联系在一定条件下的可确定性和在一般条件下的不确定性的特征。②可展性。在运算分析时,联系度 μ 又可以看成是一个数,如公式(1)(2)中的联系度亦可称为三元联系数。根据不同的研究对象将式(1)作不同层次的展

开,可得到 n 元联系数:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}i_1 + \frac{F_2}{N}i_2 + \dots + \frac{F_{n-2}}{N}i_{n-2} + \frac{P}{N}j \quad (3)$$

可简写为

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_{n-2}i_{n-2} + cj \quad (4)$$

1.2 建立集对分析模型

将集对分析理论用于水资源可持续利用系统评价,就是将评价指标和既定的评价标准一起构成一个集对,若评价指标处于最优评价级别以上,则认为是一同性联系,此时 $\mu = 1$;处于最劣的评价级别以下,则认为是对立性联系,此时 $\mu = -1$;处于最优最劣评价级别范围之间,则认为差异性联系,此时的评价指标对水资源可持续利用状况而言具有不确定性,如公式(1)(2)所示。而在多标准评价体系中, μ 应进行相应程度的展开,如公式(3)(4),从而得到 n 元联系数。

1.2.1 指标体系的建立

指标体系是从系统角度对研究对象进行抽象和刻画的概念模型。区域水资源可持续利用系统评价指标体系包括目标层、准则层、评价指标层 3 个层次。选择区域水资源可持续利用水平作为评价指标体系的最高层,即目标层 A ;准则层 B 的指标则反映了与水资源可持续利用水平密切相关的 4 个主要影响因素:水资源禀赋 B_1 、水资源利用水平 B_2 、社会经济发展水平 B_3 和生态环境状况 B_4 。这 4 个指标分别从不同角度体现了整个水资源可持续利用系统的主要特征和状况;在 B 层的基础上经过分析,分别提出了影响准则层 4 个指标的 20 个子指标,形成了评价指标层 C 。评价标准分为 5 个等级,1 级、2 级、3 级、4 级、5 级分别对应于“优”、“良”、“一般”、“差”和“很差”。区域水资源可持续利用系统评价指标体系见表^[10-15]。其中 $B_p(1 \leq p \leq 4)$ 表示准则层 B 的某一指标, $C_{pq}(1 \leq q \leq 6)$ 表示评价指标层 C 中对应于准则层 B 层第 p 个指标的第 q 个子指标,评价标准的等级为 n (此处 $n = 5$)。评价指标层 C 中的子指标分为成本型指标和效益型指标两类,即现状值越小对应的评价级别越优的为成本型指标,现状值越大对应的评价级别越优的为效益型指标。

1.2.2 指标权重的确定

采用层次分析法构建各层评价指标的判断矩阵,最终得出这些指标的权重。本文只对准则层 B 的指标 $B_p(1 \leq p \leq 4)$ 进行专家咨询,通过两两比较法建立判断矩阵,计算其权重 W_p ,见表 2。对评价指标层 C 的指标 $C_{pq}(1 \leq q \leq 6)$ 的权重 W_{pq} ,为了简便起见,采用算术平均法按等权重处理。

表 1 区域水资源可持续利用系统评价指标体系

目标层 (A层)	准则层 (B层)	评价指标层 (C层)	不同级别标准分割点					评价指标 现状值
			1级	2级	3级	4级	5级	
区域水资源 可持续利用水平	B ₁ 水资源 禀赋	C ₁₁ 年均降水量/mm	1200	1000	800	600	400	1057.0
		C ₁₂ 年均径流深/mm	500	400	300	200	100	380.5
		C ₁₃ 人均水资源量/m ³	2500	2000	1500	1000	500	623.0
		C ₁₄ 单位耕地水资源量/(万 m ³ ·hm ⁻²)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	1.3
	B ₂ 水资源 利用水平	C ₂₁ 水资源开发利用率/%	20	30	40	50	60	59.7
		C ₂₂ 综合用水耗水率/%	30	40	50	60	70	36.7
		C ₂₃ 单方水 GDP/元	60	50	40	30	20	36.2
		C ₂₄ 单方水粮食产量/kg	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	1.0
		C ₂₅ 耕地灌溉率/%	55	50	45	40	35	42.6
		C ₂₆ 灌溉水利用系数	0.6	0.55	0.50	0.45	0.40	0.5
	B ₃ 社会经济 发展水平	C ₃₁ 人均 GDP/万元	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	4.3
		C ₃₂ 人均用水量/m ³	350	400	450	500	550	448.0
		C ₃₃ 工业用水重复利用率/%	75	70	65	60	55	50.0
		C ₃₄ 万元工业增加值用水量/m ³	50	100	150	200	250	80.9
	B ₄ 生态环境 状况	C ₃₅ 城市化率/%	70	60	50	40	30	54.0
		C ₄₁ 污水处理率/%	80	70	60	50	40	56.6
		C ₄₂ 水功能区水质达标率/%	70	60	50	40	30	55.6
		C ₄₃ 生态环境用水比例/%	50	40	30	20	10	42.9
		C ₄₄ 植被覆盖率/%	14	12	10	8	6	12.1
			C ₄₅ 地下水开采率/%	20	30	40	50	60

表 2 准则层判断矩阵及相关数据

B _p	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重 W _p	参数值
B ₁	1	1/2	2	1/2	0.0954	λ _{max} = 4.0310 C. R. = 0.011 < 0.1 通过一致性检验
B ₂	2	1	3	1	0.4673	
B ₃	1/2	1/3	1	1/3	0.1601	
B ₄	2	1	3	1	0.2772	

1.2.3 模型的建立^[16]

根据公式(4),可以建立评价指标层 C 中各指标综合评价的 n 元联系数:

$$\mu_{pq} = r_{pq1} + r_{pq2}i_1 + \dots + r_{pq}i_{l-1} + \dots + r_{pq(n-1)}i_{n-2} + r_{pq}i_n \quad (5)$$

式中: r_{pql} 表示评价指标 C_{pql} 相对于级别 l (1 ≤ l ≤ n) 的同异反联系数分量, r_{pql} ∈ [0, 1], ∑_{l=1}ⁿ r_{pql} = 1。设区域水资源可持续利用各个评价指标的现状值为 x, 评价级别 l 的阈值为 S_l (1 ≤ l ≤ n), 对于不同类型的指标, r_{pql} 的具体计算式见表 3。

表 3 评价指标层 C 各指标联系数分量 r_{pql} 计算

n 元联系数分量 r _{pql}	成本型指标	效益型指标
r _{pq1} = 1, r _{pqm} = 0 (2 ≤ m ≤ n)	x ∈ (0, S ₁]	x ∈ [S ₁ , +∞)
r _{pql} = \frac{ x - S_{l+1} }{ S_{l+1} - S_l }, r_{pq(l+1)} = \frac{ x - S_l }{ S_{l+1} - S_l }, r_{pqn} = 0 (1 ≤ m ≤ n-1, m ≠ l, m ≠ l+1)}	x ∈ [S _l , S _{l+1}]	x ∈ [S _{l+1} , S _l]
r _{pqn} = 1, r_{pqm} = 0 (1 ≤ m ≤ n-1)}	x ∈ [S _n , +∞)	x ∈ (0, S _{n}]}

同样, 准则层 B 中各指标综合评价的 n 元联系数为:

$$\mu_p = r_{p1} + r_{p2}i_1 + \dots + r_{pl}i_{l-1} + \dots +$$

$$r_{p(n-1)}i_{n-2} + r_{pn}i_n \quad (6)$$

式中: r_{pl} 表示指标 B_p 相对于级别 l (1 ≤ l ≤ n) 的同

异反联系数分量, r_{pl} ∈ [0, 1], r_{pl} = \sum_{q=1}^6 w_{pq} r_{pql}}

$$\sum_{l=1}^n r_{pl} = 1。$$

同样, 目标层 A 区域水资源可持续利用水平综合评价的 n 元联系数为:

$$\mu = r_1 + r_2i_1 + \dots + r_l i_{l-1} + \dots + r_{n-1}i_{n-2} + r_n i_n \quad (7)$$

式中: r_l 表示目标层 A 总指标相对于级别 l (1 ≤ l ≤

n) 的同异反联系数分量, r_l ∈ [0, 1], r_{l} = \sum_{p=1}^4 w_p r_{pl}}

$$\sum_{l=1}^n r_l = 1。$$

根据集对分析理论, 差异度系数 i ∈ [-1, 1], 当指标越接近最优评价级别时, i 越接近 1; 越接近最劣评价级别时, i 越接近 -1^[17-18]。为了便于确定 i 的取值, 考虑到 j = -1, 利用“均分原则”将 [-1, 1] 均分为 n-1 等分, 令 i 取均分点的值, 如本文中 n = 5 则 i₁ = 0.5, i₂ = 0, i₃ = -0.5。另外, 集对分析性质有 μ ∈ [-1, 1], 即评价标准 n 个等级所涵盖的取值范围为 [-1, 1], 根据“均分原则”将 [-1, 1] 均分为 n 等分, 分别对应于 1 级、2 级、...、n 级的取值范围, 如本文中 n = 5 则评价标准 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级, 即“优”、“良”、“一般”、“差”和“很差”5 个级别所对应的取值范围分别为 (0.6, 1]、(0.2, 0.6]

$(-0.2, 0.2](-0.6, -0.2](-1, -0.6]$ 也就是说,当 $r_{i,j}$ 确定之后,根据公式(5)(6)(7)就可得到目标层 A 总指标的综合评价 n 元联系数 μ ,即区域水资源开发利用水平综合评价的取值,从而可以确定区域水资源开发利用系统的评价等级。 μ 取值越接近 1 表明等级越优,越接近 -1 表明等级越劣。

2 应用举例

根据所建立的区域水资源可持续利用系统评价指标体系以及某区域的实测现状值(表 1),运用公式(5)(6)(7)对该区域水资源可持续利用系统进行综合评价。准则层 B 和目标层 A 的五元联系数表达式见表 4。以水资源禀赋 B_1 的联系数 μ_1 为例,其中 0.0713、0.380、0.0488、0.1865、0.3135 分别代表 B_1 在 1~5 个级别上的联系数分量。同样,目标层 A 的联系数 μ 中的 0.0956、0.3233、0.3105、0.1331、0.1375 则分别代表总目标对于 1~5 个级别的联系数分量。

表 4 准则层、目标层的五元联系数表达式

	准则层 B 的五元联系数 μ_p	目标层 A 的五元联系数 μ
B_1	$\mu_1 = 0.0713 + 0.38i_1 + 0.0488i_2 + 0.1865i_3 + 0.3135j$	
B_2	$\mu_2 = 0.055 + 0.2783i_1 + 0.3567i_2 + 0.1483i_3 + 0.1617j$	$\mu = 0.0956 + 0.3233i_1 + 0.3105i_2 + 0.1331i_3 + 0.1375j$
B_3	$M_3 = 0.2764 + 0.2116i_1 + 0.312i_2 + 0i_3 + 0.2j$	
B_4	$\mu_4 = 0.068 + 0.444i_1 + 0.322i_2 + 0.166i_3 + 0j$	

根据“均分原则”,令 $i_1 = 0.5, i_2 = 0, i_3 = -0.5, j = -1$,则可计算出各联系数的值。另外,“优”、“良”、“一般”、“差”和“很差”5 个级别所对应的取值范围分别为 $(0.6, 1] (0.2, 0.6] (-0.2, 0.2] (-0.6, -0.2] (-1, -0.6]$,所以可得到各联系数对应的评价级别,见表 5。

表 5 各联系数的计算值及对应的评价级别

准则层 B 的五元联系数 μ_p	评价级别	目标层 A 的五元联系数 μ	评价级别
B_1	$\mu_1 = -0.1455$		
B_2	$\mu_2 = -0.0417$	$\mu = 0.0532$	一般
B_3	$\mu_3 = 0.1822$		
B_4	$\mu_4 = 0.2070$		良

从评价结果来看,研究区域的水资源禀赋 B_1 处于“一般”级别,且靠近“差”,表明该地区水资源禀赋并不好,应注重节水,尽量避免耗水项目的开发;水资源利用水平 B_2 处于“一般”级别,有略微偏“差”的趋势,说明该区域的水资源利用效率一般,应注重提高水资源利用效率;社会经济发展水平 B_3

处于“一般”级别,靠近“良”,说明该区域的社会经济发展有一定实力,但用水效率不高,应在提高用水效率上多做些工作;生态环境状况 B_4 虽处于“良”的级别,但十分接近于“一般”,说明生态环境状况并不乐观,有恶化趋势,应引起足够重视。对目标层 A 来说,该区域水资源可持续利用系统的综合评价结论为“一般”,表明该区域的水资源可持续利用状况只有中等水平,这与研究区域的实际情况基本相符,在实际工作中需有针对性地采取一些措施以提高当地的水资源可持续利用水平。

3 结语

笔者建立了一套较完善的水资源可持续利用系统评价指标体系,并在此基础上结合集对分析理论提出了区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型,从 3 个层次阐明了集对分析理论应用在各级指标评价中的意义。该方法充分利用了研究对象中所包含的不确定性信息,将对研究对象的辩证认识与系统性定量描述有机结合起来,并综合处理研究对象不同层次上的系统信息,引入差异度系数刻画所论集对的同一性、差异性、对立性联系,定量计算得出不同层次意义上的水资源可持续利用水平,并给出相应的评价等级,进而计算区域水资源可持续利用系统总指标的 n 元联系数,最后确定区域水资源可持续利用系统的综合评价级别。该方法的评价结果相对于模糊集理论分析方法更能精细地反映出准则层的情况,而且使用差异度系数避免了模糊理论中隶属度确定中的主观随意性。算例表明,用这种方法分析得到的评价结果与研究区域的实际情况基本一致。但文中为了简便,对指标层各指标权重的确定采用了等权重分配,这可能会造成各等级联系数分量的差异,从而影响评价结果的精度。

参考文献:

- [1] 陈守煜,柴春岭.区域水资源可持续利用评价的模糊可变评价方法[J].水利水电科技进展,2007,27(5):1-5.
- [2] 卞戈亚,董增川,陈康宁,等.区域水资源综合规划可持续发展评价研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):254-257.
- [3] 杨晓华,沈珍瑶.智能算法及其在资源环境系统建模中的应用[M].北京:北京师范大学出版社,2005:11-15.
- [4] 杨纶标,高英仪.模糊数学原理及其应用[M].广州:华南理工大学出版社,2001:31-36.
- [5] 白希孟,满春生.模糊图的最大树聚类法在环境质量评价中的应用[J].中国环境科学,1985,8(6):38-42.
- [6] 楼文高,刘遂庆.区域水资源可持续利用评价的神经网络方法[J].农业系统科学与综合研究,2004,20(2):113-119.

(下转第 61 页)

表 6 不同调控方案的工程累计静态投资估算结果 亿元

方案号	节水投资	污水处理 厂及配套 管网投资	供水工程			合计	污水处 理厂运 行费
			石佛寺 西线工程	石佛寺 东线工程	水源置换 工程		
方案 I	0.92	2.65	0.71	4.92	0.26	9.46	0.83
方案 II	1.94	2.15	0.71	3.98	0.19	8.97	0.70
方案 III	0.85	1.67	0.71	3.42	0.15	6.80	0.58
方案 IV	1.79	1.32	0.71	2.00	0.19	6.01	0.49
方案 V	1.02	4.29	0.71	6.91	0.29	13.22	1.24
方案 VI	2.16	3.57	0.71	6.20	0.26	12.90	1.06

表 7 推荐调控方案的规划工程设计规模 万 m³/d

年份	石佛寺水库 给水工程		石佛寺自来水厂		五水厂增供 “于洪区马— 平镇”输水工程	新建 污水 处理厂
	西线	东线	一期	二期		
2010	6	30	4	26	0.25	5
2020	10	30	4	26	1.25	20
2030	10	56	10	46	2.50	35

4 结 语

提出基于地表水与地下水联合调控的石佛寺水库集中供水水源复合式布井开采新模式。利用所研制的水资源配置模型和软件系统进行不同组合方案长系列逐月调算,通过对各方案的缺水率、总投资及综合效益进行分析,最后优选出水资源配置推荐方案和规划工程规模。

a. 2010 年、2020 年和 2030 年多年平均条件下全区总供水量分别为 3.85 亿 m³、4.34 亿 m³、5.07 亿 m³; 特枯年份(P = 95%)全区总供水量分别为 4.31 亿 m³、4.75 亿 m³、5.43 亿 m³。

b. 水资源配置工程累计静态总投资为 9.46 亿元(方案 I),其中污水处理厂投资 2.65 亿元、石佛寺西线工程 0.71 亿元、石佛寺东线工程 4.92 亿元、水源置换工程 0.26 亿元。

c. 提出了推荐的石佛寺供水系统地表水与地下水联合优化调控模式和设计供水规模,2030 年石佛寺水库给水工程的设计规模达到 66 万 t,突破了原规划最大供水规模为 20 万 t 的限制。

这些成果不仅对沈北地区未来 25 年时间跨度上安全供水保障工程体系建设产生重大而深远的影响,而且可推动我国地表水与地下水联合优化调控理论研究和生产实践,并提高沈阳市城市安全供水保证程度,使“可持续发展水利”和“民生水利”理念落实到具体行动,进一步丰富了我国在供水系统优化调控和供水风险分析等领域的研究内涵,同时对辽宁省水资源优化配置和高效利用、科学管理具有重要的借鉴和参考、应用价值。

参考文献:

[1] 谢新民,符传君,王彤,等.水系规划理论与实践[M].北

京:黄河水利出版社,2003.

[2] 赵勇,裴源生,王建华.水资源合理配置研究进展[J].水利水电科技进展,2009,29(3):78-84.
 [3] 魏婧,梅亚东,杨娜,等.现代水资源配置研究现状及发展趋势[J].水利水电科技进展,2009,29(4):73-77.
 [4] 吴丹,吴凤平,陈艳萍.水权配置与水资源配置的关系剖析[J].水资源保护,2009,25(6):76-80.
 [5] 蒲志仲.水资源配置市场机制研究[J].水利经济,2008,26(4):9-12.
 [6] 罗利民,谢能刚,仲跃,等.区域水资源合理配置的多目标博弈决策研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):72-76.
 [7] 李少华,董增川,李玉荣.水资源统筹配置综述与展望[J].水利经济,2007,25(2):1-5.
 [8] 康瑛,陈志刚.平原河网地区水资源配置仿真模拟模型研究[J].水资源保护,2007,23(5):31-34.
 [9] 王福林,谢新民,杨丽丽,等.辽河干流控制性枢纽工程供水系统调控模式与供水风险分析[R].沈阳:辽宁省石佛寺水库工程建设管理局,北京:中国水利水电科学研究院,等,2007.
 [10] 许新宜,王浩,甘泓,等.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997.
 [11] 粟晓玲,邢大韦.关中地区规划供水工程配置方案研究[J].水利水电科技进展,2000,20(6):8-8.

(收稿日期:2009-10-23 编辑:高渭文)

(上接第 31 页)

[7] 慕金波,侯克复.灰色聚类法在水环境质量评价中的应用[J].环境科学,1991,12(2):86-90.
 [8] 王晓鹏.多元统计分析在河流污染状况综合评价中的应用[J].系统工程理论与实践,2001,21(9):118-123.
 [9] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科技出版社,2000:7-11,24-32.
 [10] 左东启,戴树生,袁汝华,等.水资源评价指标体系研究[J].水科学进展,1996,7(4):367-373.
 [11] 刘毅,贾若祥,侯晓丽.中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J].环境科学,2005,26(1):42-46.
 [12] 李朝霞.区域水资源可持续利用体系研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):81-85.
 [13] 刘恒,耿雷华,陈晓燕,等.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.
 [14] 沈晓娟,徐向阳.基于三标度法的区域水资源综合评价[J].水资源保护,2006,22(4):36-39.
 [15] 郦建强,陆桂华,杨晓华,等.区域水资源承载能力综合评价的 GPPIM[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):1-4.
 [16] 胡晓雪,杨晓华,郦建强,等.系统健康评价的集对分析模型[J].系统工程理论与实践,2005(5):164-176.
 [17] 赵克勤,宜爱理.集对论:一种新的不确定理论与应用[J].系统工程,1996,14(1):18-23.
 [18] 余国祥.对联系数中的不确定数 i 的研究[J].辽宁师范大学学报:自然科学版,2002,25(4):349-352.

(收稿日期:2009-09-22 编辑:高渭文)