

区域用水水平评价中的集对分析方法研究

焦士兴^{1,2}, 王腊春^{1*}, 李 静³, 赵荣钦¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455002;
3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 集对分析是研究客观事物之间确定性与不确定性联系的系统理论和方法, 核心是计算事物之间的联系度。提出了根据区域用水情况, 利用实际指标值建立用水水平评价标准的方法。运用集对分析理论, 对黄河下游沿黄地区的用水水平进行定量研究。研究表明: 综合用水水平由高到低排序为艾山—洛口区段(区)、洛口—利津区段(区)、花园口—高村区段(区)、孙口—艾山区段(区)、高村—孙口区段(区), 总的评价结果与多层次灰关联综合评价模型一致。集对分析法具有简单实用、评价结果客观等特点, 文章所建立的评价标准与集对分析理论相结合有效地解决了区域用水水平的评价问题。

关键词: 用水水平; 集对分析法; 评价标准; 黄河下游沿黄地区

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 3037(2009)04 - 0729 - 08

区域用水水平是一个模糊系统, 存在大量确定与不确定性的联系; 用水水平又是水资源高效利用的主要表征之一, 具有较强的地域性。从国内外研究现状来看, 目前尚缺乏统一的评价方法和标准。针对区域用水水平评价的多层次性和系统性, 国内相关研究多采用灰关联综合评价方法和模糊综合评价方法^[1-3]; 与此同时, 也不断引入新的理论和方法处理系统中的不确定性问题^[4,5]。国外相关研究多集中在某个具体领域。2003年 Bindra S P^[6]采用问卷调查的方法, 从战略角度对利比亚工业用水水平进行分析与评价, 指出了存在的问题; 2007年 Theodore C^[7]研究认为农业用水水平较低的原因是环境、生物、工程、管理、社会和经济等多方面综合作用的结果, 提出了全面分析农业用水现状和提高用水水平的方法。

总的来看, 该领域的研究基础较为薄弱, 研究方法也有局限性, 还处于不断发展和完善的阶段。因此, 本文尝试引入重在解决系统中存在确定与不确定性问题的集对分析理论, 以黄河下游沿黄地区为例, 阐述集对分析方法在用水水平评价中的应用及特点。

1 集对分析的基本原理

自 1989 年赵克勤提出集对分析以来, 该理论和方法已经应用于科学技术和社会经济等众多研究领域^[8]。集对 (Set Pair) 是指由具有一定联系的两个集合所作成的对子, 核心思想是把客观事物的确定性联系与不确定性联系作为一个确定、不确定系统来分析和处理; 确定性联系分为同一性联系和对立性联系, 分别简称为“同联系”和“反联系”; 不确定联系称为

收稿日期: 2008-03-17; 修订日期: 2008-12-10。

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金资助研究项目 (2008A170001); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划 (教高 [2007]335 号); 中国科协咨询项目 (2007ZCYJ09-B)。

第一作者简介: 焦士兴 (1970-), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为水资源、水环境。E-mail: jiaoshixing@163.com

* 通讯作者, E-mail: wang6312@263.net.cn

差异性联系,简称为“异联系”,这两个集合的所有确定性联系和不确定性联系称为同异反联系,其联系程度称为“联系度”。

在某个具体的问题背景下,设两个集合 A 和 B 组成集对 $H = (A, B)$, 共有 N 个特性,其中:有 S 个特性为集对 H 中的 A 和 B 所共有,有 P 个特性为 A 和 B 相对立,其余的 $F = N - S - P$ 个特性既不相互对立,又不共同具有;则比值 S/N 为这两个集合的同一程度,简称同一度 (a), F/N 为这两个集合的差异程度,简称差异度 (b), P/N 为这两个集合的对立程度,简称对立度 (c);可用

$$\mu = a + bi + cj \tag{1}$$

加以表达,式中, μ 称为集合 A, B 的联系度,满足 $a + b + c = 1$ (图 1、图 2)。 i 和 j 一方面是差异度和对立度的标记,另一方面表示差异度和对立度的系数;其中, $i \in [-1, 1]$ 并视不同情况取值,而 j 在一般情况下规定其取值为 -1 。

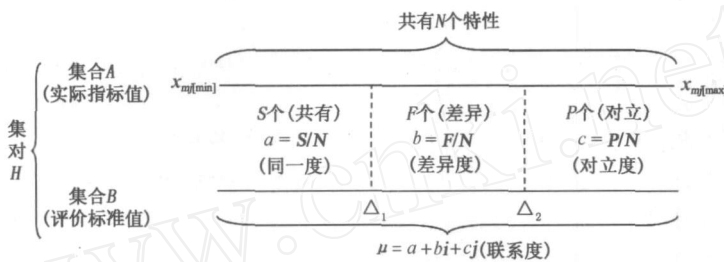


图 1 成本型指标的集对分析原理

Fig. 1 Principle of set pair analysis of cost indexes

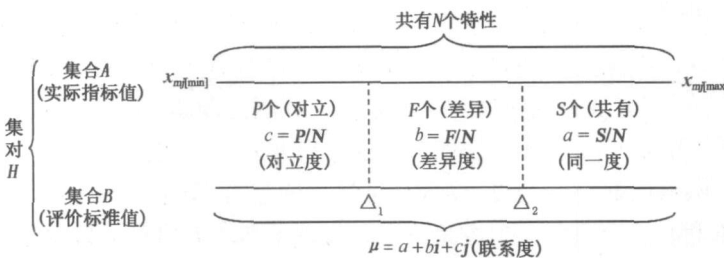


图 2 效益型指标的集对分析原理

Fig. 2 Principle of set pair analysis of efficiency indexes

2 区域用水水平中评价标准的建立

在区域用水水平评价中,由于用水水平差异较大,且涉及的评价指标类型和数量较多,所以有关评价标准的研究相对薄弱。本文尝试以区域用水指标中的最大值、最小值及其差值来建立评价标准,以突出区域用水的特点。

设有 n 个区域用水样本组成样本集 X , 每个样本有 m 项评价指标,组成 $m \times n$ 阶用水指标矩阵 $X_m \times n = (x_{ij}) (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。

对于每项评价指标 $x_{mj} = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mj}) (j = 1, 2, \dots, n)$ 有最大值 $x_{mj\max_j}$ 和最小值 $x_{mj\min_j}$ 及其差值 $x_{mj\max_j} - x_{mj\min_j}$ 。由此,建立评价标准方程为

$$x = x_{mj\min_j} + \cdot (x_{mj\max_j} - x_{mj\min_j}) \tag{2}$$

式中, α 表示分级标准值, β 表示评价标准系数,且 $0 < \beta < 1$ 。随着 α 的变化, β 也随之变化并形成不同的评价标准值,进而形成评价区间。一般情况下, α 的变化导致的 β 变化并不影响集对分析法的评价结果,但是 β 的不适当取值所形成的不同评价标准值 β 则容易形成区分度较差的评价结果,如两个评价区域的同一度 (a)、差异度 (b)和对立度 (c)均相等时,就不能判定评价结果的优先顺序,这时可通过改变 β 的取值来改变评价标准值,从而得到区分度较高的评价结果。

3 集对分析方法在区域用水水平评价的应用

集对的构建。将集对分析方法用于区域用水水平评价,就是将区域用水指标集合 (A) 和评价标准集合 (B) 一起构成一个集对 (H)。通过集合 A 中每项指标的数值与集合 B 中的评价标准范围进行比较,以评价区域用水水平的高低。

同异反联系的确定。设根据实际指标建立的评价标准区间为 $[\alpha_1, \alpha_2]$,可在区分指标类型 (包括成本型和效益型)的基础上确定系统的“同异反”联系,对于越小越优的成本型指标 (如用水定额)则是小于较低标准值 (α_1)的为“同”,大于较高标准值 (α_2)的为“反”;介于二者之间的为“异”(图 1);对于越大越优的效益型指标 (如用水效率)大于较高标准值 (α_2)的为“同”,小于较低标准值 (α_1)的为“反”;介于二者之间的必然为“异”(图 2)。

联系度的计算与比较。对于区域用水水平的 N 个评价指标体系,若有 S 个指标属于“同”, P 个指标属于“反”,则必有 $N - S - P$ 个指标属于“异”,据此可建立该评价对象的联系度表达式。分析 a, b, c 三者之间的定量关系,就可以判断区域用水水平的高低。由于 a 值表示的结果优于较好评价标准值, c 值劣于较差评价标准值,所以排序的依据是比较 a 值的大小, a 值越大越靠前,反之靠后;如果 a 值相等,比较 c 值的大小,由于 c 值表示对立度,所以 c 值越小越靠前,反之靠后。

4 集对分析法在黄河下游沿黄地区的用水水平评价

本文以文献 [1] 的研究区域——黄河下游沿黄地区为例,说明集对分析法在区域用水水平评价中的应用。研究区域是从黄河桃花峪到入海口之间,以黄河干流水量为主要灌溉水源的地区,总面积 $4.43 \times 10^4 \text{ km}^2$,涉及黄河、海河、淮河三大流域,辖焦作、菏泽等 15 个地(市)、83 个县(区);根据各河段特征,划分为花园口—高村(区)、高村—孙口(区)、孙口—艾山(区)、艾山—洛口(区)、洛口—利津(区)5 个子区,建立涉及工业用水、农业用水、生活用水等 25 项指标在内的多层次区域用水水平评价体系^[1]。

4.1 用水水平评价标准的确定

依据用水水平评价标准的建立方法,自下而上确定各层次评价指标标准值。

现以工业用水效益系数来说明评价标准值的计算方法。5 个区域的工业用水效益系数组成样本集 $_{11}X_4$,每个样本有 4 项评价指标,组成 4×5 阶用水指标矩阵 (数据见文献 [1])。

$$_{11}X_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.85 & 1.89 & 0.3 & 0.61 & 1.39 \\ 0.13 & 0.95 & 0.4 & 1.09 & 0.7 \\ 0.1 & 0.007 & 0.1 & 0.26 & 0.4 \\ 1 & 0.36 & 2.5 & 5.17 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

对于重工业用水标准 $x_{1j} = (x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}) = (0.85, 1.89, 0.3, 0.61, 1.39)$ 有最大

值 1.89和最小值 0.3及其差值 1.59,因此建立的评价标准方程为 $_{11}x = 0.3 + _{11} \cdot 1.59$, 当 $_{11} = 0.4, _{12} = 0.7$ 时有 $_{11} = 0.94, _{12} = 1.41$,组成的评价标准区间为 $[0.94, 1.41]$; 同样可以得到轻工业、能源工业和其他工业的用水标准 ($_{11}B$)。

$$_{11}B = \begin{bmatrix} 0.94 & 0.51 & 0.16 & 2.28 \\ 1.41 & 0.80 & 0.28 & 3.73 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

同样,可得到农业用水效益系数 ($_{12}X$)的评价标准 ($_{12}B$),这样工、农业用水效益系数的标准共同组成了用水效益的评价标准 ($_1B$)。

类似地,在用水定额中评价标准系数₂取(0.4, 0.8),用水效率中评价标准系数₃取(0.2, 0.8),可得到涉及工业用水、农业用水、生活用水等 25项指标的评价标准 (B) (表 1)。在各指标的分级标准中, 级为较好,表明区域用水效益、用水效率较高,用水定额较低; 级为一般,表明区域用水水平一般,仍有一定的节水潜力; 级为较差,表明区域用水效益、用水效率较低,用水定额较高,进一步节水的潜力较大。

表 1 基于实际指标值计算的黄河下游沿黄地区用水水平评价标准

Table 1 Computed evaluation criterions of water utilization level based on actual index values in the region along the lower Yellow River

指标类型		分级标准			指标类型		分级标准			
效益指标	用水效益系数	重工业	>1.41	0.94 ~ 1.41	<0.94	用水重复率	重工业	>68.1	32.0 ~ 68.1	<32.0
		轻工业	>0.80	0.51 ~ 0.80	<0.51		轻工业	>60.9	29.1 ~ 60.9	<29.1
		能源工业	>0.28	0.16 ~ 0.28	<0.16		能源工业	>88.9	63.3 ~ 88.9	<63.3
		其他工业	>3.73	2.28 ~ 3.73	<2.28		其他工业	>46.4	11.6 ~ 46.4	<11.6
	用水效益系数	小麦灌溉	>0.59	0.50 ~ 0.59	<0.50	利用系数	渠系水	>0.70	0.59 ~ 0.70	<0.59
玉米灌溉	>0.93	0.75 ~ 0.93	<0.75	田间水	>0.83		0.73 ~ 0.83	<0.73		
棉花灌溉	>0.71	0.51 ~ 0.71	<0.51	灌溉水	>0.55		0.45 ~ 0.55	<0.45		
	其他作物灌溉	>0.54	0.40 ~ 0.54	<0.40						
定额指标	万元产值	重工业	<228	228 ~ 395	>395	灌溉定额	小麦	<6 030	6 030 ~ 6 810	>6 810
		轻工业	<432	432 ~ 692	>692		玉米	<2 820	2 820 ~ 3090	>3 090
		能源工业	<562	562 ~ 922	>922		棉花	<3 330	3 330 ~ 3510	>3 510
		其他工业	<173	173 ~ 316	>316		其他作物	<1 950	1 950 ~ 2 550	>2 550
	城市生活	<193	193 ~ 250	>250	农村生活	<1 395	1 395 ~ 1 560	<1 560		

注:单位:用水效益系数(元/m³),灌溉定额(m³/hm²),万元产值用水量(m³/10⁴元),用水定额(L/(人·d))。

4.2 集对分析法联系度的确定

设 A 为 区 ~ 区 25项指标 ($N = 25$)组成的用水水平集合(数据见文献 [1]), B 为用水水平 25项指标 ($N = 25$)组成的评价标准集合(表 1),这样 (A, B)构成了集对 $H = (A, B)$ 。根据区域用水水平评价中的集对分析法,确定同异反联系,即实际指标值符合 级、 级和 级标准的分别为“同”、“异”和“反”,据此计算各指标的集对联系度 μ 。

现以用水效益指标说明联系度的计算方法。在工业用水效益系数指标中,花园口—高村(区)重工业、轻工业、能源工业和其他工业用水效益系数分别为 0.85、0.13、0.1和 1,均符合相应的 级标准,四项指标均为“反”,即 $P = 4$,由于 $N = 25$,则有工业用水效益系数联系度 $\mu_1 = a + bi + cj = 0 + 0i + \frac{4}{25}j = 0.16j$ 在农业用水效益系数中, 区的小麦、玉米和棉

花的灌溉系数分别为 0.61、1.11 和 0.91,均符合相应的 级标准,三项指标均为“同”,即 $S=3$,其他作物灌溉系数 0.22,符合相应的 级标准,属于“反”,即 $P=1$,则农业用水效益系数联系度 $\mu_2 = a + bi + cj = \frac{3}{25} + 0i + \frac{1}{25}j = 0.12 + 0.04j$ 。这样工、农业用水效益联系度之和组成了 区的用水效益联系度,即 $\mu = a + bi + cj = 0.16j + 0.12 + 0.04j = 0.12 + 0.2j$ 。类似地,可以计算出其他区域的用水效益联系度,进而计算出 5 个区域的用水定额、用水效率联系度以及总的联系度(表 2)。

表 2 各区域用水水平联系度计算结果

Table 2 The result about relation degree of regional water utilization level

分区	区域用水水平			用水定额 (0.4, 0.8)			用水效率 (0.2, 0.8)			用水效益 (0.4, 0.7)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
区	0.36	0.08	0.56	0.12	0.04	0.24	0.12	0.04	0.12	0.12	0	0.2
区	0.28	0.16	0.56	0.12	0.04	0.24	0.08	0.12	0.08	0.08	0	0.24
区	0.28	0.32	0.40	0.12	0.16	0.12	0.16	0.12	0	0	0.04	0.28
区	0.64	0.24	0.12	0.32	0.04	0.04	0.2	0.08	0	0.12	0.12	0.08
区	0.52	0.2	0.28	0.28	0.04	0.08	0.08	0.04	0.16	0.16	0.12	0.04

4.3 评价结果的分析与对比

依据集对分析的评价方法,区域用水水平评价中同一度 (a) 值越大,用水水平越高;若 a 值相等,则比较对立度 (c) 值的大小, c 值越小用水水平越优。

4.3.1 第一层次评价结果的对比与分析

在总的用水水平评价中,依据同一度 (a) (表 2) 对研究区从大到小排序为:艾山—洛口区段 (区)、洛口—利津区段 (区)、花园口—高村区段 (区)、孙口—艾山区段 (区)、高村—孙口区段 (区),排序结果与多层次灰关联综合评价结果一致(表 3)。孙口—艾山区段 (区)、高村—孙口区段 (区) 的 a 值相等,应根据 c 值大小来排序。

对于综合用水水平最高的艾山—洛口区段 (区),同一度 (a)、差异度 (b) 和对立度 (c) 分别为 0.64、0.24 和 0.12,则表明评价指标中,64%、24% 和 12% 的指标分别符合相应的 级标准、级标准和 级标准。从用水情况来看,艾山—洛口区段 (区) 用水工艺高,工业万元产值用水定额和农业灌溉定额低,所以水资源利用率高;但是重工业用水标准高,农村生活用水定额高,棉花灌溉效益低。因此,要大力推广重工业节水新技术、新工艺、新器具、新设备的使用;引进棉花膜下滴灌技术,提高棉花用水效益;强化农村水资源有偿使用意识,降低农村生活用水定额。

对于综合用水水平最低的高村—孙口区段 (区),同一度 (a)、差异度 (b) 和对立度 (c) 分别为 0.28、0.16 和 0.56,则表明评价指标中,分别有 7 个、4 个和 14 个指标分别符合相应的 级标准、级标准和 级标准。从用水情况来看,高村—孙口区段 (区) 农业灌溉定额以及能源工业和其他工业用水定额高,轻工业和重工业用水重复率低,区域总体用水效益较低。因此,要不断提高农业灌溉技术,加强水、肥、土壤等综合措施的应用研究,提高农业用水效益;通过调整工业结构和布局,开发并推广节水工业技术,改进生产工艺,提高工业用水重复率和降低工业万元产值用水定额。

对于综合用水水平排序居中的洛口—利津区段 (区)、花园口—高村区段 (区)、孙口—艾山区段 (区),用水效益的对立度 (c) 分别为 0.04、0.2 和 0.28,用水定额的对立度

(c)分别为 0.08、0.24和 0.12,所占比重较大,区域用水定额较高、用水效益较低;今后要提高用水、节水管理水平,改进灌溉技术,降低农业业用水定额,提高用水效益;同时引进新的工业生产技术,以降低工业万元产值用水量,综合提高用水效率。

4.3.2 第二层次评价结果的对比与分析

在用水定额评价中,依据同一度(a) (表 2)对 5 个区域从大到小排序为艾山—洛口(区)、洛口—利津(区)、孙口—艾山(区)、高村—孙口(区)、花园口—高村(区),评价结果和灰关联评价一致(表 3)。

在用水效率评价中,艾山—洛口(区)区段最好,其次是孙口—艾山(区)区段,洛口—利津(区)区段最差。运用灰关联评价,洛口—利津(区)区段为第二,而集对评价则为第五,其他区域的顺序相对不变(表 3)。从实际情况来看,在用水效率 7 项指标中,洛口—利津(区)区段的 4 项工业用水效率指标为区域中最低,而灌溉水有效利用率中的 3 项指标分别居于前三位;之所以在灰关联评价中排在第二位,原因在于灌溉水有效利用率的权重高达 0.9,而工业用水效率的权重则为 0.1;而在运用集对方法评价时,依据的是原始指标数据,所以排序明显下降。

表 3 集对分析方法和灰关联法的评价结果对比

Table 3 The comparison of evaluation result about set pair analysis and grey - relation method

排序 结果	第一层次		第二层次						
	区域用水水平		用水定额		用水效率		用水效益		
	灰关联	集对	灰关联	集对	灰关联	集对	灰关联	集对	
第一	区	区	区	区	区	区	区	区	V区
第二	V区	V区	V区	V区	V区	区	V区	V区	区
第三	区	区	区	区	区	区	区	区	区
第四	区	区	区	区	区	区	区	区	区
第五	区	区	区	区	区	V区	区	区	区

在用水效益评价中,洛口—利津(区)区段最好,其次是艾口—洛口(区)区段,孙口—艾山(区)区段最差(表 3)。运用灰关联评价,花园口—高村(区)为第一,而集对评价则为第三,其它区域的顺序相对不变,成因和用水效率评价中的洛口—利津(区)区段有相似之处。

4.4 集对分析方法和多层次灰关联综合评价模型比较

在建立评价指标体系的基础上,集对分析方法的核心理念是评价标准的建立,同异反联系和联系度的计算;而灰关联综合评价模型的核心是确定理想指标集,指标集的规范化处理,权重的确定和关联度的计算。相比而言,集对分析方法步骤少,计算方法简单,尤其是不需要人为赋予指标权重值,使评价结果更具有客观性。

5 结果与讨论

(1) 采用集对分析方法以黄河下游沿黄地区为例进行了研究,综合用水水平由高到底排序为艾山—洛口区段(区)、洛口—利津区段(区)、花园口—高村区段(区)、孙口—艾山区段(区)、高村—孙口区段(区),总的评价结果和灰关联综合评价方法具有一致性(表 3),基本上符合实际情况。

(2) 由于缺乏黄河下游沿黄地区用水水平的评价标准,提出了利用实际评价指标值建

立评价标准的方法,对于构建其他领域的评价标准具有一定的指导和参考意义。在利用集对方法建立区域用水评价标准时,评价标准系数()的变化必然引起评价标准(集合 B)的变化,进而引起同一度(a)、差异度(b)和对立度(c)的变化。由于这种变化是系统整体上的变动,所以正常情况下,并不影响评价的结果。

(3) 将集对分析方法引入到区域用水水平的综合评价中,丰富和改进了区域用水水平的评价理论和方法。与多层次灰关联综合评价模型相比,集对分析法以联系度为核心,在处理不确定性问题时,具有计算方便、方法简单,评判结果客观、合理等特点;不足之处在于“集对”的数学本质、“联系度”的确定等理论问题仍需要进行更深入的研究,如差异度系数 i 和对立度系数 j 的取值问题等。此外,集对分析法还可应用于大气环境质量评价^[9]、水安全评价^[10]、生态承载能力评价^[11]和城市生态系统健康^[12]等评价中,总之在资源学科和环境学科评价中具有一定的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 阮本清,梁瑞驹,王浩,等.流域水资源管理[M].北京:科学出版社,2001.114~134. [RUAN Ben-qing, LIANG Rui-ju, WANG Hao, et al. Water Resources Management in River Basins. Beijing: Science Press, 2001. 114 - 134.]
- [2] 詹子胜,李会安,李清杰,等.引黄灌区用水水平分析与评价[J].人民黄河,2002,24(1):39~41. [ZHAN Zi-sheng, LI Hui-an, LI Qing-jie, et al. Water utilization level analysis and evaluation in the Yellow River. *Yellow River*, 2002, 24(1): 39 - 41.]
- [3] 陈红梅.关于区域综合节水水平评价方法的研究[J].广东水利水电,2006,(2):62~65. [CHENG Hong-mei. Study on evaluation method about regional comprehensive water saving. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2006, (2): 62 - 65.]
- [4] 张文鸽.引黄灌区用水水平评价的属性识别模式[J].水资源与水工程学报,2005,16(1):15~18. [ZHANG Wen-ge. Attribute recognition model to evaluate water utilization level in Yellow River water diversion irrigated areas. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2005, 16(1): 15 - 18.]
- [5] 聂相田,王志良,邱林.组合评价方法及其在多属性决策中的应用[J].人民黄河,2006,28(8):5~7. [NIE Xiang-tian, WANG Zhi-liang, QIU Lin. Assembled evaluation method and application in multi-attributes decisive. *Yellow River*, 2006, 28(8): 5 - 7.]
- [6] Bindra S P, Moh 'd Muntasser, Manjri EL Khweldi, et al. Water use efficiency for industrial development in Libya[J]. *Desalination*, 2003, 158: 167 - 178.
- [7] Theodore C Hsiao, Pasquale Steduto, et al. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture[J]. *Irrig. Sci.*, 2007, 25: 209 - 231.
- [8] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.9~29. [ZHAO Ke-qin. Set Pair Analysis and Its Preliminary Application. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. 9 - 29.]
- [9] 张文艺,方华,蔡建安,等.利用集对分析法马鞍山市大气环境质量进行综合评价方法[J].南京理工大学学报,2003,27(4):426~430. [ZHANG Wen-yi, FANG Hua, CAI Jian-an, et al. Assessment for air environment quality of Ma'an shan city by set pair analysis method. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(4): 426 - 430.]
- [10] 卢敏,张展羽,石月珍.集对分析法在水安全评价中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(5):506~508. [LU Min, ZHANG Zhan-yu, SHI Yue-zhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2006, 34(5): 506 - 508.]
- [11] 邓红霞,李存军,朱兵,等.基于集对分析法的生态承载能力综合评价方法[J].长江科学院院报,2006,23(6):35~38. [DENG Hong-xia, LI Cun-jun, ZHU Bing, et al. Integrative assessment of eco-carrying capacity based on set pair analysis. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(6): 35 - 38.]
- [12] Su M R, Yang Z F, Chen B. Set pair analysis for urban ecosystem health assessment[J]. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2007, doi 10.1016/j.cnsns.2007.07.019.

Study on the Application of Set Pair Analysis Method in the Evaluation of Regional Water Utilization Level

JIAO Shi-xing^{1,2}, WANG La-chun¹, LI Jing³, ZHAO Rong-qin¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREER I, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The water resource is the foundation that mankind depends on for his existence and development. Water resource shortage, however, has already become a serious problem faced by the whole world because of human's unreasonable utilization. In order to realize the sustainable development of the society and economy of China, we must reinforce the comprehensive evaluation about regional water utilization level. The method of set pair analysis is to study the certain and uncertain relationship among different things and the core of this method is to compute the connection degree of these things. At present, set pair analysis can be applied for such comprehensive evaluations as atmospheric environmental quality evaluation, water safety evaluation and ecological carrying capacity and has certain application prospects in evaluations of resources and environment subjects. According to the actual conditions of regional water utilization, this paper puts forward a new method to build the evaluation standards for estimating the regional water utilization level, which is to build the standards based on the regional actual index values. With the application of the set pair analysis method, this paper, taking the region along the lower Yellow River as the research objective, studies quantitatively the water utilization level in the region. Study areas refer to the regions from Taohuayu to the estuaries of the Yellow River which are irrigated by the Yellow River main stream, covering an area of $4.43 \times 10^4 \text{ km}^2$. The areas involve the Yellow River basin, Haihe River basin and Huaihe River basin, and govern 83 counties (districts), 15 prefectures (cities), such as Jiaozuo and Heze. The areas, with fast development and centralized politics and economy in Henan and Shandong provinces, hold an important place in domestic economic construction. The result indicates the five regions are sorted as Aishan-Luokou region (region), Luokou-Lijin region (region), Huayankou-Gaocun (region), Sunkou-Aishan region (region) and Gaocun-Sunkou region (region) in descending order according to the identity degree. The comparison result shows the overall results of the set pair analysis method are consistent with that of multi-level grey relation comprehensive evaluation model, and the set pair analysis method has its advantages-simple, practical and impersonal. The evaluation standards built in this paper, which combined with the set pair analysis method, can solve the evaluation problem of regional water utilization level effectively.

Key words: set pair analysis method; water utilization level; evaluation standard; the region along the lower Yellow River