

# 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法

沈珍瑶, 杨志峰

(北京师范大学 环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 基于定性分析结果初步建立了黄河流域水资源可再生性评价指标体系, 该指标体系共有 32 个指标, 分别反映水资源可再生性的天然、天然—人为复合及社会三大特性。对黄河流域 9 个行政分区、19 个流域二级分区的所有 32 个指标值进行了获取工作, 获取了其中大部分指标值。针对黄河流域的实际资料, 利用灰色关联方法与主成分分析方法对定性分析所得的指标体系进行了筛选, 最终确定 19 个指标作为评价指标。同时, 探讨了水资源可再生性评价标准的建立问题, 建立了以黄河流域资料为基准及以全国资料为基准的两个评价标准, 认为在进行实际评价时, 应利用以全国资料为基准的评价标准。利用主成分赋权法进行了 19 个评价指标权重的确定工作。最后利用灰关联分析方法与模糊综合评判法对黄河流域 9 个行政分区、19 个流域二级分区的水资源可再生性进行了评价, 总的结论为黄河流域水资源总体上可再生能力较弱, 不同行政分区与流域二级分区的水资源可再生能力在弱—中等之间。

关键词: 水资源可再生性; 指标体系; 评价标准; 权重; 评价方法

中图分类号: TV213 文献标识码: A 文章编号: 1000-3037(2002)02-0188-10

## 1 引言

黄河流域水资源短缺, 其开发利用面临较大的压力。这主要与该流域水资源短缺有关。如何用好现有水资源, 并避免环境恶化是研究的关键之一。在此, 确定水资源的天然、天然—人工及社会可再生能力是一项重要的基础工作, 也是后续工作的基础。考虑到实际情况下很难用一个系统指标来反映水资源的可再生性, 本研究通过建立一套较为完整的指标体系来比较这种可再生能力的相对强弱。下述探讨实际上并未将水资源可再生性与水资源利用切实结合起来, 因为在天然情况下, 水资源具有一定可再生能力, 这种可再生能力可以用单位面积的水资源可更新量来表示, 但考虑到它是一个多年平均的概念, 遂将其与不同保证率情况下的单位面积的水资源可更新量结合起来; 同时, 由于目前已不存在纯粹的天然水资源系统, 故人类活动的影响需要叠加, 即要预测人类活动影响下水资源可再生能力的变化。在此基础上, 探讨人类开发利用水资源与水资源可再生能力之间的关系, 显然, 人类开发利用水资源不能超过水资源可再生能力。另外还要留有余地, 以确保生态环境需水量及部分人类无法利用的水资源量, 因此, 实际开发利用的阈值应小于水资源的可再生能力。基于此认识, 在水资源可再生性评价时, 将很少涉及水资源利用方面的问题, 即使涉及, 也只是与水资源可再生性有较大关系的因素, 也即影响水资源可再生能力的因素。

## 2 水资源可再生性评价指标体系的建立

### 2.1 水资源天然可再生性的评价指标体系

天然情况下, 可以以某地区或流域的水资源更新量除以该地区或流域占据的面积来反映水资源的天然可再生能力, 但由于目前给出的水资源量一般均是多年平均值, 不作补充说明可能不合适, 在此建议考虑不同保证率情况下水资源可再生能力的变化问题。另外, 由于目前已经很难知道天然情况下的水质状况,

收稿日期: 2001-08-20; 修订日期: 2001-10-15。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043605)。

第一作者简介: 沈珍瑶 (1967-), 男, 浙江省鄞县人, 副教授, 博士, 主要从事水环境、水资源、核环境及三废治理等研究工作。E-mail: z.y.shen@263.net, z.y.shen@163.com

在此简单认为讨论的水资源其水质能达到用水要求,因此不将之作为其中一个指标。

在仅考虑主要指标的情况下,水资源天然可再生性的评价指标为:①单位面积的水资源量(多年平均),此值在较大区域可以利用水资源评价数据,在小区域可以由水资源更新速率及水资源占据的体积获得;②不同保证率情况下的单位面积水资源量,以丰水年与枯水年单位面积水资源量表示。

考虑到许多因素对水资源天然可再生性直接有关,因此,下述指标也应包括在指标体系中:①单位面积地表水水资源量;②单位面积地下水水资源量;③蒸发量(或干旱指数),黄河流域必须对此予以考虑而其它流域可以不考虑;④降水量,它是水资源的来源,其大小变化直接影响到水资源量的大小;⑤水源涵养指标(暂以植被覆盖率代替),主要是由于径流的形成与植被覆盖率密切相关;⑥过境水资源量(以客水利用率表示),它是水资源短缺地区水资源的一个良好补充,宁夏自治区是比较典型的利用过境水资源的地区。

## 2.2 水资源天然—人工复合可再生性的评价指标体系

由于水资源天然—人工复合可再生性是水资源可再生性的本质特点,因此,其研究相对较为复杂。同时,由于在定义中将水资源利用时的可再生性作为其社会可再生性进行探讨,因此本节不包括这部分内容。

在上节中探讨的水资源天然可再生性评价指标将作为水资源天然—人工复合可再生性的评价指标体系中的自然特性来对待,同时其自然特性中尚需包括水质方面的指标,这里暂用水质现状达标率这个指标。对于流域或地区较大范围内水质可恢复性评价,目前还没有找到合适指标,后续我们将结合生态环境方面的指标来综合反映水质可恢复性。另外,在本指标体系中,拟用水质恢复半衰期这个概念来反映水资源质的可恢复性,至于其具体获得方法,正在研究中,水质恢复半衰期数值越大,越不利于水质恢复。

其它方面的特性包括水资源天然—人工复合可再生性的经济特性、工程技术特性及生态环境特性。经济特性主要指人类的经济活动会对水资源的形成及可利用水资源量产生影响,工程技术特性主要对可利用水资源产生影响,生态环境特性则主要对水资源形成影响。其它间接影响因素在此暂不考虑。

经济特性:①GDP年增长率;②农业总产值年增长率;③工业总产值年增长率;④水利工程投资增长率。

工程技术特性:①地表水控制率,地表水控制率为当地地表水蓄水工程入库水量与当地地表水水资源量之比,控制率越大,人类就可能多利用地表水,同时水库也可能改变局地气候;②渠系水利用系数,指的是渠首引水量减去渠系渗漏补给量与渠首引水量之比,此值越大,渠系渗漏补给量越小,则利用率越高;③水利设施灌溉保证率,有效灌溉的耕地面积占总耕地面积的百分比,灌溉的耕地会改变地区水分与热量条件,因此,有可能对气候产生影响。

生态环境特性:①土地利用情况(暂以土地退化治理率表示),不同的土地利用方式对水资源再生是有影响的,目前尚难以找到合适的指标;②水土保持情况(以水土流失治理率表示),水土流失的治理对水资源的影响尚有不同看法,但其确实减少了汛期地表水水量,但同时却增加了地下水水量,因此,在评价时肯定水土流失治理的作用,其值越大,越有利于水资源再生;③污水处理率,越高则越有利于水资源再生;④单位面积废气排放量,排放量越大,特别是其中的温室气体越大,越易改变气候,但对水资源的影响情况难以判断,在此仅作为一个应考虑的因素,不参与实际评价。

## 2.3 水资源社会可再生性的评价指标体系

水资源的社会可再生性指的是人们在利用水资源时引起的水资源可再生性,从技术、社会及人口三方面建立指标体系。

水资源社会可再生性的技术指标:①工业用水循环利用率,原则上该值越高,则水的利用率越高;②污水处理率(污水回用率),污水处理且回用,则使不是水资源的污水转变为水资源,且有利于水质恢复;③单位面积污水排放量,此值越小越好。

水资源社会可再生性的经济指标:①万元产值工业耗水率,在保证产值的情况下耗水率越低越好;②万元产值农业耗水率,在保证产值的情况下,耗水率越低越好;③万元产值第三产业耗水率,在保证产值的情况下,耗水率越低越好;④农业用水价格,黄河流域水资源主要为农业灌溉用水,因此,该指标可反映水资源可再生性的一个方面,农业用水价格增加,则用水浪费相应就减少,有利于水资源再生。

水资源社会可再生性的人口指标:①城镇生活用水定额;②农村生活用水定额;③牲畜用水定额;④人

表1 水资源可再生性评价指标体系

Table 1 Assessment index system of water resources renewability

	基本特性	特性归类	指标		
水资源可再生性评价指标体系	水资源天然可再生性	自然特性	(1) 单位面积的水资源量 (2) 单位面积地表水水资源量 (3) 单位面积地下水水资源量 (4) 丰水年单位面积水资源量 (5) 枯水年单位面积水资源量 (6) 蒸发量 (或干旱指数) (7) 降水量 (8) 水源涵养指标 (以植被覆盖率代替) (9) 过境水资源量 (以客水利用率表示)		
			水资源天然—人工复合可再生性	自然特性	(1) 单位面积的水资源量 (2) 单位面积地表水水资源量 (3) 单位面积地下水水资源量 (4) 丰水年单位面积水资源量 (5) 枯水年单位面积水资源量 (6) 蒸发量 (或干旱指数) (7) 降水量 (8) 水源涵养指标 (以植被覆盖率代替) (9) 过境水资源量 (以客水利用率表示) (10) 水质现状达标率 (11) 水质恢复半衰期
	经济特性	(12) GDP 年增长率 (13) 农业总产值增长率 (14) 工业总产值增长率 (15) 水利工程技术投资增长率			
		工程技术特性			(16) 地表水控制率 (17) 渠系利用系数 (18) 水利设施灌溉保证率
					生态环境特性
	水资源社会可再生性	技术特性		(23) 工业用水循环利用率 (21) 污水处理率 (24) 单位面积污水排放量	
				经济特性	(25) 万元产值工业耗水率 (26) 万元产值农业耗水率 (27) 万元产值第三产业耗水率 (28) 农业用水单价
					人口特性

口年增长率。前 3 个指标在保证正常用水情况下,低则表示减少了浪费。

表 1 给出了黄河流域水资源可再生性的指标体系,共 32 个指标(扣除重复指标)。

### 3 指标的筛选

对于建立的指标体系,选取方法有定性分析和定量分析二种<sup>[1]</sup>。在建立指标体系时已考虑到定性分析,因此,本节主要采用定量分析来筛选指标体系。

#### 3.1 利用灰色关联方法筛选指标

以黄河流域 9 个行政区及 19 个流域二级分区为单位(9 个行政区及 19 个流域二级分区的名称见表 6、表 7,下同),利用灰色关联方法<sup>[2]</sup>进行了指标体系的初选工作。有关情况说明如下:

(1)根据文献[3~9],试图获得黄河流域 9 个行政区及 19 个流域二级分区的 32 个指标值。但由于有些指标值难以获得,因此,这些指标暂不参加下述的定量评价。9 个行政区共获得 32 个指标中的 19 个指标值,19 个流域二级分区共获得 32 个指标中的 17 个指标值,其中 16 个指标在 9 个行政区及 19 个流域二级分区均获取了,获取数据的指标名称见表 2(包括作为参考指标的单位面积水资源量这个指标)。

(2)考虑到天然情况下水资源的可再生能力是进行一切工作的基础,选定单位面积的水资源量作为参考序列(母序列),其它列入指标体系表中(表 1)的指标组成的序列即为比较序列。

(3)在对参考序列与比较序列进行无量纲化处理时,对于指标值越大越好的情况,处理方法为以各序列中最大值为 1,其余均以此值相除;对于指标值越小越好的情况,以最小指标值除以其它指标值。

(4)分辨系数取 0.5。

通过计算,得到的关联度计算结果如表 2 所示,表中仅列出有具体数据,因而获得其相应关联度的指标。

由该表筛选如下指标进行水资源可再生性评价:单位面积的水资源量、单位面积地表水水资源量、单位面积地下水水资源量、丰水年单位面积水资源量、枯水年单位面积水资源量、干旱指数、降水量、水源涵养指标、水质现状达标率、农业总产值增长率、万元产值工业耗水率、万元产值农业耗水率作为评价指标,同时由于相当一部分指标没有实际数据,而这些指标的水资源可再生性影响较大,故先给予补充,它们是水质恢复半衰期、地表水控制率、工业用水循环利用率与污水治理率等,评价指标共 16 个。

表 2 评价指标灰关联分析结果表

Table 2 The result of gray associate analysis method with assessment indexes

参考指标	单位面积水资源量	
	由行政区数据得到的关联度	由流域分区数据得到的关联度
比较指标		
单位面积地表水水资源量	0.925	0.881
单位面积地下水水资源量	0.833	0.816
丰水年单位面积水资源量	0.963	0.956
枯水年单位面积水资源量	0.949	0.918
干旱指数	0.798	0.731
降水量	0.636	0.690
植被覆盖率	0.676	0.666
水质现状达标率	-	0.718
GDP 年增长率	0.538	-
农业总产值增长率	0.646	0.709
工业总产值增长率	0.611	0.618
水利设施灌溉保证率	0.610	0.639
水土流失治理率	0.590	-
万元产值工业耗水率	0.678	0.680
万元产值农业耗水率	0.703	0.683
城镇生活用水定额	0.547	0.591
农村生活用水定额	0.598	0.623
牲畜用水定额	0.663	0.609
人口增长率	0.657	-

### 3.2 利用主成分分析方法筛选指标

主成分分析方法的步骤可参考文献 [10], 在此不再具体给出。需要说明的是在求得特征值及主成分后, 需要进行精度分析, 求累计贡献率, 一般要求取累计贡献率>80%的最小主超平面的维数  $m$  值, 从而可对  $m$  个主成分进行综合分析。

通过对黄河流域 10 个行政分区的指标值进行主成分分析, 得到如下结果: 计算所得的前 4 个特征根为  $\lambda_1=8.63$ ,  $\lambda_2=4.12$ ,  $\lambda_3=2.33$ ,  $\lambda_4=2.10$ , 其累计贡献率  $E=(8.63+4.12+2.33+2.10)/19=90.42\%$ , 因此, 取此 4 个特征根对应的特征向量  $u_1, u_2, u_3, u_4$ 。在获得特征向量与特征值, 并确定主超平面的维数之后, 计算正交旋转后的主因子载荷矩阵, 其结果如表 3 所示。

由正交旋转后的主因子载荷矩阵 (表 3) 及据此作的图 1 可知:

主成分 (1) 中各因子载荷值, 从正方向看, 最大的是万元产值农业耗水率与干旱指数, 分别为 0.865

表 3 正交旋转后的主因子载荷矩阵

Table 3 The principle component load matrix after orthogonal circumgyration

	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	指标 5	指标 6	指标 7	指标 8	指标 12	指标 13
主成分 (1)	-0.936	-0.901	-0.897	-0.946	-0.904	0.804	-0.950	-0.414	-0.169	0.149
主成分 (2)	0.198	0.334	-0.002	0.172	0.244	-0.078	-0.065	-0.757	0.764	-0.019
主成分 (3)	-0.279	-0.245	-0.216	-0.237	-0.322	-0.380	-0.025	0.460	0.384	-0.708
主成分 (4)	0.061	0.091	0.152	0.066	0.059	-0.033	-0.214	-0.042	0.310	-0.614
	指标 14	指标 18	指标 20	指标 25	指标 26	指标 29	指标 30	指标 31	指标 32	
主成分 (1)	-0.578	0.412	-0.719	0.239	0.865	-0.546	-0.625	-0.168	0.330	
主成分 (2)	-0.577	-0.867	-0.440	0.724	-0.040	0.177	-0.216	-0.930	0.147	
主成分 (3)	0.136	-0.404	0.354	0.266	-0.171	0.467	-0.543	0.252	-0.021	
主成分 (4)	0.109	0.005	-0.389	-0.588	0.080	-0.544	-0.223	-0.136	-0.807	

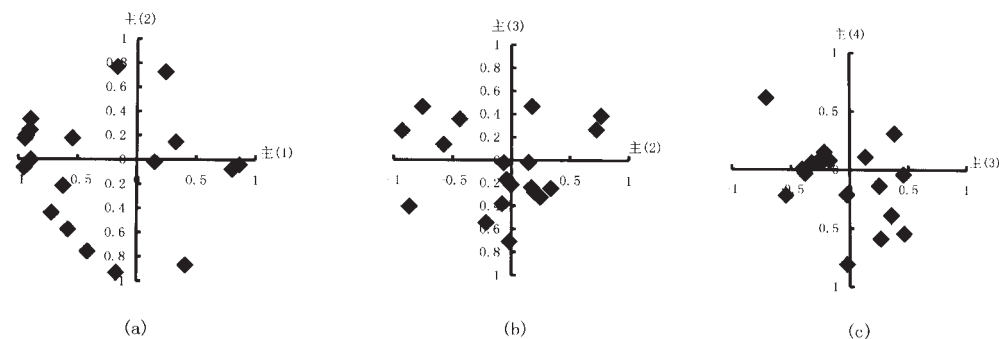


图 1 指标关系图

Fig.1 The relationship between indexes

与 0.804; 从负方向看, 主要为降水量、丰水年单位面积水资源量、单位面积水资源量、枯水年单位面积水资源量、单位面积地表水水资源量及单位面积地下水水资源量, 其载荷值很大, 说明与上述二指标正好相反; 另外从负方向看, 水土流失治理率、农村生活用水定额、工业生产年增长率、城镇生活用水定额等与主成分 (1) 也有密切关系, 只是载荷值小一些而已。

主成分 (2) 中各因子载荷值, 从正方向看, 最大的是 GDP 年增长率与万元产值工业耗水率, 分别为 0.764 与 0.724; 从负方向看, 牲畜用水定额、水利设施灌溉保证率及植被覆盖率, 其载荷值很大; 而工业生产年增长率与主成分 (2) 也有密切关系。

主成分 (3) 中各因子载荷值, 从正方向看, 最大的是城镇生活用水定额、植被覆盖率, 但其值较小, 仅为 0.467 与 0.460; 负方向上与之相关的为农业总产值增长率与农村生活用水定额。

主成分 (4) 中各因子载荷值, 从正方向看, 载荷值均较小, 负方向上人口增长率、农业总产值增长

率、万元产值工业耗水率较大。

根据上述分析,筛选如下指标进行水资源可再生性评价:单位面积的水资源量、单位面积地表水水资源量、单位面积地下水水资源量、丰水年单位面积水资源量、枯水年单位面积水资源量、干旱指数、降水量、水源涵养指标、GDP 年增长率、水利设施灌溉保证率、万元产值工业耗水率、万元产值农业耗水率、牲畜用水定额。同样,增加水质恢复半衰期、地表水控制率、工业用水循环利用率与污水治理率作为评价指标,共 17 个指标。

### 3.3 指标筛选结果

根据上述两种方法得到的结果,筛选如下指标进行下述水资源可再生性评价:单位面积的水资源量、单位面积地表水水资源量、单位面积地下水水资源量、丰水年单位面积水资源量、枯水年单位面积水资源量、干旱指数、降水量、水源涵养指标、水质现状达标率、水质恢复半衰期、GDP 年增长率、农业总产值增长率、水利设施灌溉保证、万元产值工业耗水率、万元产值农业耗水率、牲畜用水定额、地表水控制率、工业用水循环利用率与污水治理率共 19 个指标作为评价指标。

## 4 水资源可再生性评价标准的建立

分别以黄河流域数据与全国数据为基准建立了评价标准,表 4 给出的评价标准是以全国数据为基准,表中将水资源可再生能力分成强、较强、中等、较弱、弱五等。由于反映水质恢复情况的合适指标(在上节暂以水质恢复半衰期代替)尚未找到,因此表中列出了其中 18 个指标的情况。

评价标准建立时采用的方法如下:

表 4 评价标准的建立(以全国为基准)

Table 4 Assessment standard based on data of the whole China

指 标	单 位	强 (I)	较强 (II)	中等 (III)	较弱 (IV)	弱 (V)	标志
单位面积的水资源量	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	>0.85	0.45~0.8	0.17~0.45	0.05~0.17	<0.05	$X_1$
单位面积地表水水资源量	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	>0.85	0.45~0.8	0.15~0.45	0.05~0.17	<0.05	$X_2$
单位面积地下水水资源量	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	>0.20	0.13~0.20	0.08~0.13	0.04~0.08	<0.04	$X_3$
丰水年单位面积水资源量	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	>1.5	1.0~1.5	0.4~1.0	0.15~0.4	<0.15	$X_4$
枯水年单位面积水资源量	$m^3 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	>0.5	0.3~0.5	0.1~0.3	0.03~0.1	<0.03	$X_5$
干旱指数	倍比	<0.5	0.5~3.0	3.0~15.0	15.0~20.0	>20.0	$X_6$
降水量	mm	>1500	1 000~1 500	500~1 000	100~500	<100	$X_7$
植被覆盖率	%	>80	60~80	40~60	20~40	<20	$X_8$
水质现状达标率	%	>95	80~95	65~80	50~65	<50	$X_9$
GDP 年增长率	%	>8.25	7.75~8.25	7.25~7.75	6.75~7.25	<6.75	$X_{10}$
农业总产值增长率	%	>10	8~10	6~8	4~6	<4	$X_{11}$
地表水控制率	%	>50	25~50	15~25	5~15	<5	$X_{12}$
水利设施灌溉保证率	%	>60	45~60	30~45	15~30	<15	$X_{13}$
工业用水循环利用率	%	>90	70~90	50~70	30~50	<30	$X_{14}$
污水处理率	%	>80	60~80	40~60	20~40	<20	$X_{15}$
万元产值工业耗水率	$m^3/\text{万元}$	<200	200~400	400~600	600~1000	>1000	$X_{16}$
万元产值农业耗水率	$m^3/\text{万元}$	<500	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	>2 000	$X_{17}$
牲畜用水定额	$m^3/\text{头}$	<3.5	3.5~5.5	5.5~7.5	7.5~9.5	>9.5	$X_{18}$

(1) 以黄河流域数据为基准的评价标准,是黄河流域 9 个行政分区及 19 个流域二级分区有关实际指标数值的统计结果,利用的是 5 个级别平均分布法。

(2) 以全国数据为基准的评价标准,主要采用下述方法进行:①对绝大多数指标,可以找到其以省为单位的或以较大二级流域区为单位的资料,同样采用统计结果,如单位面积水资源量、单位面积地表水水资源量、单位面积地下水水资源量 3 个指标是根据文献[3、4]中 77 个流域二级区的有关水资源量资料进行计算获得的。②部分指标由于极难获得统计数据或数据不够,则采用参考黄河流域数据及西北地区研究数据<sup>[11]</sup>与文献<sup>[12]</sup>的资料。

考虑到利用黄河流域数据构造的评价标准仅具相对意义,下述评价则利用全国数据构造的评价标准。

## 5 指标权重的确定

指标权重的确定方法有很多,此处利用主成分赋权法,它是以实际指标信息来确定权重,不存在因人而异的缺点。

仍以黄河流域行政分区的实际数据为例,前部分与主成分分析方法一样,在获得主因子载荷矩阵之后,需进一步计算权重的合成方法。注意到本次主要考虑参与评价指标的情况,因此,评价指标的主因子载荷矩阵与表3不同。在重新获得主因子载荷矩阵之后,需求出指标对主成分分量的贡献,然后可获得某个具体评价指标的权重值,将之进行归一化处理,即可获得标准权重,根据上述方法获得的指标权重如表5所示。

表5 各指标权重计算结果

Table 5 Weight of various indexes

指标	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
权重值	0.060	0.065	0.078	0.061	0.062	0.070	0.070	0.080	-
指标	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$
权重值	0.080	0.072	-	0.080	-	-	0.080	0.075	0.066

下面评价时将利用表5所示的权重,表中有4个指标无权重值,其原因是未在黄河流域行政分区获取其实际数据,评价时需要这些指标权重时,可采用平均值代之,但仍应保持各指标权重之和为1。

## 6 水资源可再生性评价方法研究及实际应用

关于评价方法,目前有许多,在此利用了灰关联分析方法与模糊综合评判法两种评价方法。考虑到实际情况,将黄河流域总体水资源可再生性,以黄河流域行政分区数据及二级流域数据进行评价。

在利用灰关联分析方法时,考虑到评价标准是区间的概念而非点的概念,对传统的基于点到点距离的灰关联分析方法进行改进,使之适应点到区间距离<sup>[13]</sup>,具体的改进方法是在计算某个指标的绝对差时利用下式代替  $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 。

$$\Delta_i(k) = \begin{cases} a_i(k) - X_0(k) & X_0(k) \leq a_i(k) \\ 0 & a_i(k) < X_0(k) < b_i(k) \\ X_0(k) - b_i(k) & X_0(k) \geq b_i(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta_i(k)$  为绝对差;  $X_0(k)$  为参考序列(母序列);  $X_i(k)$  为比较序列(子序列);  $a_i(k)$ 、 $b_i(k)$  为级别区间的上、下限,上述情况适合指标值越小越好的情况;对应指标值越大越好的情况,  $a_i(k)$  作为级别区间下限,  $b_i(k)$  作为级别区间的上限即可。

另外,在实际评价中,以样本的各指标值组成母序列,以评价标准各级别的指标值组成子序列,讨论母序列与子序列的关联情况,取关联度最大的子序列所在级别为样本所属级别。

在利用模糊综合评判法时,其隶属函数的构造原则为,对应于评价标准某个评价级别,若指标值在该级别范围内,则其隶属度为1;若指标值在该级别的相邻级别范围内,则其隶属度为一个0~1的数,越近此级别,隶属度越接近于1,越远离此级别,隶属度越接近于0;若指标值不在该级别及其相邻级别范围内,则其隶属度为0。这种梯形的隶属函数构造方法可克服传统的三角形隶属函数的问题,取评判向量中值最大对应的级别。

评价结果如表6、表7所示,由表中可知,由灰关联分析的结果,从行政分区上说,四川、陕西、河南、山东属水资源可再生能力中等区,青海、甘肃、山西属水资源可再生能力较弱区,宁夏、内蒙古属水资源可再生能力弱区,黄河流域总体上属水资源可再生能力较弱区。从流域二级分区上说,河源至龙羊峡、湟水、洮河、龙羊峡至兰州干流区间、洛河、伊洛河、沁河、三门峡至花园口干流区间、花园口至利津、利津至河口属水资源可再生能力中等区;兰州至下河沿、下河沿至石嘴山、头道拐至龙门、汾河、泾河、渭河、龙门至三门峡干流区间、黄河内流区属水资源可再生能力较弱区;石嘴山至头道拐属水资源可再生能力弱区,整个黄河流域(不含内流区或含内流区)均为水资源可再生能力较弱区。由模糊综合评判法的结果看,从行政分区上说,四川、山东属水资源可再生能力中等区,青海、

表 6 黄河流域行政分区水资源可再生能力评价结果的对比

Table 6 Result of water resources renewability assessment of the administrative divisions of the Yellow River

行政分区	灰关联分析评价结果	模糊综合评判结果	综合评判
青海	IV	IV	IV
四川	III	III	III
甘肃	IV	IV	IV
宁夏	V	V	V
内蒙古	V	V	V
山西	IV	IV	IV
陕西	III	IV	III-IV
河南	III	IV	III-IV
山东	III	III	III
黄河流域(含内流区)	IV	IV	IV

表 7 黄河流域二级流域分区水资源可再生能力评价结果的对比

Table 7 Result of water resources renewability assessment of the second-order drainage areas of the Yellow River

流域分区	灰关联分析评价结果	模糊综合评判结果	综合评判
河源至龙羊峡	III	III	III
湟水	III	III	III
洮河	III	III	III
龙羊峡至兰州干流区间	III	III	III
兰州至下河沿	IV	V	IV~V
下河沿至石嘴山	IV	V	IV~V
石嘴山至头道拐	V	V	V
头道拐至龙门	IV	IV	IV
汾河	IV	IV	IV
泾河	IV	V	IV~V
洛河	III	V	IV
渭河	IV	IV	IV
龙门至三门峡干流区间	IV	IV	IV
伊洛河	III	III	III
沁河	III	IV	III-IV
三门峡至花园口干流区间	III	IV	III-IV
花园口至利津	III	III	III
利津至河口	III	III	III
黄河内流区	IV	V	IV~V
黄河流域	IV	IV	IV
黄河流域(含内流区)	IV	IV	IV

肃、山西、陕西、河南属水资源可再生能力较弱区,宁夏、内蒙古属水资源可再生能力弱区,黄河流域总体上属水资源可再生能力较弱区。从流域二级分区上说,河源至龙羊峡、湟水、洮河、龙羊峡至兰州干流区间、伊洛河、花园口至利津、利津至河口属水资源可再生能力中等区;头道拐至龙门、汾河、渭河、龙门至三门峡干流区间、沁河、三门峡至花园口干流区间属水资源可再生能力较弱区;兰州至下河沿、下河沿至石嘴山、石嘴山至头道拐、泾河、洛河、黄河内流区属水资源可再生能力弱区,黄河流域(不含内流区或含内流区)均为水资源可再生能力较弱区。

通过比较,两种评价方法的评价结果基本一致。模糊综合评价结果除大部分(71%)与灰关联分析评价结果一致外,另有部分(26%)比灰关联分析评价结果低一个级别,对洛河的评价结果两者相差较大,原因可能是指标两极分化比较严重,在这种情况下,常规的模糊综合评判方法及灰色聚类方法一般是不适用的。



对照模糊综合评判法与灰关联分析法,可以发现灰关联分析法中关联度计算比模糊综合评判法中隶属度计算精细,因此,灰关联分析评价结果更为可靠,结合上述两种方法的评价结果,给出了综合评判的结果。

## 7 结 论

本文通过定性与定量分析,初步建立了黄河流域水资源可再生性评价指标体系,并对黄河流域行政区与流域二级分区及黄河流域总体水资源可再生性进行了评价,得到的主要结论有:

(1)在较为充分地探讨黄河流域水资源可再生性理论的基础上,基于定性分析结果初步建立了黄河流域水资源可再生性评价指标体系,该指标体系共有32个指标,其中反映水资源天然可再生性的指标9个,反映水资源天然—人为可再生性的指标22个,反映水资源社会可再生性的指标11个,其中相互重复指标10个。

(2)根据黄河流域实际,对黄河流域9个行政区、19个流域二级分区的所有32个指标值进行了获取工作,获取了其中大部分指标值。

(3)针对黄河流域的实际资料,利用灰色关联方法与主成分分析方法对定性分析所得的指标进行了筛选,最终确定19个指标作为评价指标。

(4)探讨了评价标准的建立问题,建立了以黄河流域资料为基准及以全国资料为基准的两个评价标准,在进行实际评价时,应利用以全国资料为基准的评价标准。

(5)利用主成分赋权法进行了19个评价指标权重的确定工作,该方法所确定的权重由实际资料得出,因而不会因人而异。

(6)利用灰关联分析方法与模糊综合评判法对黄河流域9个行政区、19个流域二级分区的水资源可再生性进行了评价,总的结论为黄河流域总体上其水资源可再生能力较弱,不同行政区与流域二级分区的水资源可再生能力在弱—中等之间。

## 参考文献:

- [1] 顾培亮. 系统分析与协调[M]. 天津:天津大学出版社,1998. 169.
- [2] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉:华中工学院出版社,1986. 348~373.
- [3] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [4] 中国自然资源丛书编委会. 中国自然资源丛书(水资源卷)[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995.
- [5] 水电部黄河水利委员会水文局. 黄河流域片水资源评价[R]. 郑州:水电部黄河水利委员会水文局,1986.
- [6] 水电部黄河水利委员会. 黄河流域水资源分析报告(1997年度)[R]. 郑州:水电部黄河水利委员会,1998.
- [7] 朱晓原,张学成. 黄河水资源变化研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.
- [8] 水利部. 黄河的重大问题及对策,附件8,黄河流域及有关地区社会经济统计与发展趋势预测[R]. 1999.
- [9] 黄河水利委员会,黄河中游治理局. 黄河水土保持志[M]. 郑州:河南人民出版社,1993.
- [10] 任若恩,王惠文. 多元统计数据[M]. 北京:国防工业出版社,1997.92~119.
- [11] 国家“九五”重点科技项目(96-912-01-01). 西北地区水资源与生态环境及发展趋势研究[R]. 水利部南京水文水资源研究所、中国科学院自然资源综合考察委员会、国土资源部水文地质工程地质研究所、河海大学、内蒙古自治区水文总局,1999.
- [12] 贾嵘,沈冰,蒋晓辉,等. 区域水资源潜力综合评判[J]. 西北农业大学学报,1999,27(5): 44~49.
- [13] 沈珍瑶,谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文,1997,(3): 13~15.

# Index system and method for assessing water resources renewability of the Yellow River Basin

SHEN Zhen-yao, YANG Zhi-feng

(Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on qualitative analysis of water resources renewability, the assessment index system of the Yellow River water resources renewability is established. There are 32 indexes altogether, which reflect natural, natural-artificial compound and social characteristics of the renewability of water resources. The values of these indexes in 9 administrative divisions consisting of 19 second-order drainage areas of the Yellow River are obtained. The gray associate method and principal component analytical method are used to screen the index system, and 19 indexes are selected as final assessment indexes. Two kinds of assessment standards of water resources renewability are established, one is based on the data of Yellow River Basin, the other is based on the data of the whole China. It is pointed out that the assessment standard based on the data of the whole China should be used in actual assessment. Then the principal component weight method is used to determine the weight of 19 assessment indexes. Finally, the gray associate analysis method and fuzzy synthesis judgement method are used to assess the water resources renewability of the 9 administrative divisions and 19 second-order drainage areas of the Yellow River. The result shows that the water resources renewability of the Yellow River is rather low, and the water resources renewability of the 9 administrative divisions and 19 second-order drainage areas is from moderate to low.

**Key words:** water resource renewability; index system; assessment standard; weight; assessment method