基于层次分析法的河流健康模糊综合评价

李传哲[1],于福亮[1],秦大庸[1],鲍卫锋[2]

(1.中国水利水电科学研究院水资源所,北京　100044;
2.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉　430072)

摘要:应用层次分析法建立河流健康评价指标体系,计算各指标的权重,从河流健康评价的 18 个指标中,选择确定了 6 个主要评价指标:水系连通性、河道生态需水满足程度、优良河势保持率、洪水蓄泄能力、水质达标率、水生生物物种组成.将模糊综合评价应用到河流健康评价中,通过建立因素集、评价集、权重集和隶属函数,实现对河流的综合评价.

关键词:河流健康评价;层次分析法;模糊综合评价;评价指标

中图分类号:TV21;O159　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-7647(2005)S1-0024-04

有关河流健康方面的研究始于 20 世纪 80 年代,内容多涉及河流健康评价指标体系的建立、评价方法的研究,但是都没有给出具体可行的指标并将其应用到河流健康评价中.本文在长江水利委员会建立的"健康长江"评价指标体系[1]的基础上,提出了分层次的河流健康评价指标体系,采用层次分析法研究各评价指标,确定 6 个主要评价指标,最后应用模糊综合评价方法对河流作出评价,为科学评价河流健康状况提供依据.

1　河流健康评价指标体系设计

评价指标是衡量评价对象的基本尺度.对河流健康状况进行评价之前,需要确定具体的评价指标,评价指标的全体即为评价指标体系.指标系统设计遵循系统性、层次性、互斥性、定性与定量相结合等原则.根据分析和专家咨询,利用层次分析法将河流健康评价指标体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层次,详见图 1.

2　应用层次分析法确定主要评价指标

2.1　层次分析法的基本思想

层次分析法是美国匹兹堡大学教授 A L Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种解决多因素复杂系统,特别是难以定量描述的社会系统的分析方法.其基本思想是根据问题的性质和要求达到的目标,将问题按层次分析成各个组成因素,通过两两比较的方式确定诸因素之间的相对重要性(权重)、下一层次因素的重要性,即同时考虑本层次和上一层次的权重因子,这样一层层计算下去,直至最后一层.比较最后一层各个因素相对于最高层的相对重要性权重值,进行排序、决策[2].

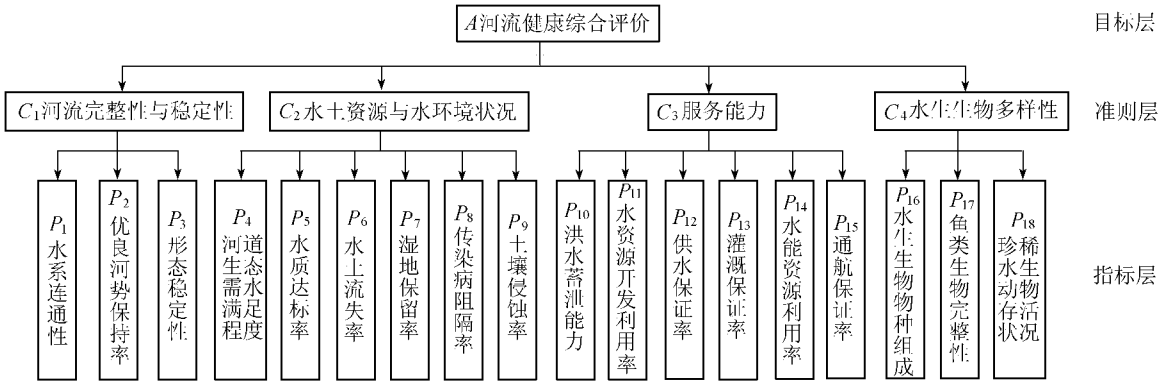

图 1　河流健康综合评价指标体系

作者简介:李传哲(1983—),男,湖北荆州人,硕士研究生,从事水资源合理配置及规划评价研究.

2.2 构造判断矩阵

判断矩阵表示针对上一层次某因素而言，本层次与之相关的各因素之间的相对重要性，各元素的值反映了人们对各因素相对重要性的认识，一般采用 1～9 及其倒数的标度方法，见表 1.

表 1 各标度值及其含义

标度	含 义
1	两个因素一样重要
3	一个因素比另一个因素稍微重要
5	一个因素比另一个因素明显重要
7	一个因素比另一个因素强烈重要
9	一个因素比另一个因素绝对重要
2,4,6,8	上述判断的中间值
1～9 的倒数	因素 i 与 j 比较得判断 h_{ij}，因素 j 与 i 比较的判断为 $h_{ji}=1/h_{ij}$

根据专家建议，按 1～9 标度法确定各评价指标的相对重要程度. 本文仅以准则层相对目标层为例列出判断矩阵，如表 2 所示.

表 2 $A\sim C$ 判断矩阵

A	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	2	3	4
C_2	1/2	1	2	3
C_3	1/3	1/2	1	2
C_4	1/4	1/3	1/2	1

2.3 层次单排序及其一致性检验

层次单排序是指根据判断矩阵计算对于上一层次因素而言，本层次与之有联系的因素重要性次序的权重，它是本层次中所有因素对于上一层次而言的重要性进行排序的基础. 实际上是计算判断矩阵的特征根和特征向量问题. 计算方法有幂法、和积法、方根法等[3]. 本文采用方根法，基本步骤是：①将判断矩阵的元素按行相乘；②将所得的乘积分别开 n 次方；③将方根向量正规化，即得所求特征向量；④计算判断矩阵的最大特征根.

由于客观事物的复杂性以及人们对事物认识的多样性和模糊性，所给出的判断矩阵不一定能保持一致，这就需要检验判断矩阵的一致性. 一致性指标 CI 的计算公式为

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{1}$$

式中：$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根；n 为判断矩阵的阶数.

为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性，需要计算判断矩阵的随机一致性比例 CR，计算公式为

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{2}$$

式中：RI 为与判断矩阵同阶的平均随机一致性指标. 1～9 阶矩阵的平均随机一致性指标 RI 分别为 0.00，0.00，0.58，0.90，1.12，1.24，1.32，1.41 和 1.45. 当 $CR\leqslant 0.10$ 时，认为判断矩阵具有满意的一致性，否则需要对判断矩阵进行调整，直到检验通过为止.

按照上述方法计算判断矩阵，各评价指标的权重值见表 3.

2.4 层次总排序及其一致性检验

层次总排序就是计算指标层（P 层）对于目标层（A 层）的相对重要性次序，实际上是 P 层对于 C 层权重值与 C 层对于 A 层权重值的累积值，为组合权重. 与层次单排序一样，需要评价层次总排序的计算结果的一致性.

依据上述方法进行计算，并将各指标的权重排序，见表 4. 一致性检验结果表明 P 层对于 A 层总排序满意.

表 4 各评价指标的权重值及排序结果

指标编号	权重值	排序结果	指标编号	权重值	排序结果
P_1	0.341	1	P_{10}	0.072	4
P_2	0.088	3	P_{11}	0.037	9
P_3	0.038	8	P_{12}	0.023	12
P_4	0.106	2	P_{13}	0.015	14
P_5	0.070	5	P_{14}	0.009	17
P_6	0.044	7	P_{15}	0.005	18
P_7	0.028	10	P_{16}	0.061	6
P_8	0.018	13	P_{17}	0.025	11
P_9	0.012	15	P_{18}	0.010	16

2.5 确定主要评价指标

在河流健康评价的 18 个指标中，排在前 6 位的是：水系连通性、河道生态需水满足程度、优良河势保持率、洪水蓄泄能力、水质达标率和水生生物物种组成. 评价河流健康状况的指标若是过多，则不易操作，选取主要的 6 个评价指标，可减少工作量，便于开展河流健康评价工作.

表 3 层次单排序计算结果

判断矩阵	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	CI	RI	CR	一致性检验
$A\sim C$	0.467	0.278	0.160	0.095			0.010	0.900	0.011	满意
$C_1\sim P$	0.731	0.188	0.081				0.032	0.580	0.056	满意
$C_2\sim P$	0.381	0.252	0.160	0.101	0.064	0.042	0.024	1.240	0.020	满意
$C_3\sim P$	0.450	0.231	0.142	0.091	0.056	0.029	0.036	1.240	0.029	满意
$C_4\sim P$	0.637	0.258	0.105				0.019	0.580	0.033	满意

3 河流健康模糊综合评价

3.1 建立因素集和评价集

根据上面分析建立河流健康评价因素集 $U = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6]$ = (水系连通性,河道生态需水满足程度,优良河势保持率,洪水蓄泄能力,水质达标率,水生生物物种组成).

把河流的健康状况分为 3 级,即健康、亚健康、不健康.具体描述为:①健康:河流保持其自然属性.生物多样性及河流形态基本稳定;主要服务功能正常发挥;水污染、不合理开发利用等在承载能力范围内.②亚健康:河流基本维持其自然属性.生物多样性及河流形态发生一定程度变化;主要服务功能尚能发挥;水污染、不合理开发利用等超出承载能力范围.③不健康:河流的自然属性明显改变.生物多样性及河流形态发生较大程度变化;主要服务功能严重退化或丧失;水污染、不合理开发利用等超出承载能力范围,并在短时间内无法恢复.所以,河流健康评价的评价集为:$V = [v_1, v_2, v_3]$ = (健康,亚健康,不健康).各等级标准值采用百分制[4],赋值区间为健康:[75,100],亚健康:[50,75],不健康:[0,50].取中值[87.5,62.5,25],将评价结果转换成具体得分值,利于判断.

3.2 确定权重集

利用两两比较 0~1 打分法确定 6 个主要评价指标的权重值(表 5),则得权重集为 $W = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6] = [0.286, 0.238, 0.190, 0.143, 0.095, 0.048]$.

表 5 0~1 打分法结果

指标	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	得分	权重
u_1	1	1	1	1	1	1	6	0.286
u_2	0	1	1	1	1	1	5	0.238
u_3	0	0	1	1	1	1	4	0.190
u_4	0	0	0	1	1	1	3	0.143
u_5	0	0	0	0	1	1	2	0.095
u_6	0	0	0	0	0	1	1	0.048

3.3 建立评价矩阵

在 6 个评价指标中,属于定性的指标为:水系连通性、洪水蓄泄能力、水生生物物种组成;定量指标为:河道生态需水满足程度、优良河势保持率、水质达标率.对于不同的指标,采取不同的方法确定各指标的评价向量.

对于定性指标,由专家给出评判,并对专家的评判进行统计,得到各个指标的评价向量.水系连通性的评价向量为 $[r_{11}, r_{12}, r_{13}]$,洪水蓄泄能力的评价向量为 $[r_{41}, r_{42}, r_{43}]$,水生生物物种组成的评价向量为 $[r_{61}, r_{62}, r_{63}]$.

在模糊综合评价中,评价指标的评价向量实际上是评价指标的值,确定各指标的值,即确定各指标的隶属度.隶属度可以通过建立隶属函数求得,对于不同的实际问题,隶属函数有不同的确定方法,也有不同的函数形式.对于上述 3 个定量指标而言,都具有线性规律,本文通过查阅大量的实际工程资料,并结合专家意见,确定所考虑评价指标的极值,用线性函数来表示其隶属函数[5].3 个定量评价指标的隶属函数形式如下[6]:

$$r_{i1}(s_i) = \begin{cases} 0 & s_i > k_{i2} \\ 0.5\left(1 - \dfrac{s_i - k_{i3}}{k_{i2} - k_{i3}}\right) & k_{i1} < s_i < k_{i2} \\ 0.5\left(1 + \dfrac{k_{i3} - s_i}{k_{i2} - s_i}\right) & s_i < k_{i1} \end{cases} \tag{3}$$

$$r_{i2}(s_i) = \begin{cases} 0.5\left(1 - \dfrac{s_i - k_{i1}}{s_i - k_{i2}}\right) & s_i < k_{i1} \\ 0.5\left(1 + \dfrac{k_{i1} - s_i}{k_{i1} - k_{i2}}\right) & k_{i1} < s_i < k_{i2} \\ 0.5\left(1 + \dfrac{s_i - k_{i3}}{k_{i2} - k_{i3}}\right) & k_{i2} < s_i < k_{i3} \\ 0.5\left(1 + \dfrac{k_{i3} - s_i}{k_{i2} - s_i}\right) & s_i > k_{i3} \end{cases} \tag{4}$$

$$r_{i3}(s_i) = \begin{cases} 0.5\left(1 + \dfrac{s_i - k_{i1}}{s_i - k_{i2}}\right) & s_i < k_{i1} \\ 0.5\left(1 - \dfrac{k_{i1} - s_i}{k_{i1} - k_{i2}}\right) & k_{i1} < s_i < k_{i2} \\ 0 & s_i > k_{i2} \end{cases} \tag{5}$$

式中:r_{ij}为评价指标 i 在第 j 分级上的隶属度($i = 1, 2, \cdots, 6$;$j = 1, 2, 3$);s_i 为评价指标 u_i 的数值;k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}分别为评价指标的临界点,计算公式为

$$\begin{cases} k_{i1} = D_{1i} \\ k_{i2} = \dfrac{D_{1i} + D_{2i}}{2} \\ k_{i3} = D_{2i} \end{cases} \tag{6}$$

关于 D_{1i}和 D_{2i}的取值,有如下原则:①河道生态需水满足程度.河道生态环境需水指维持河流生态系统一定形态和一定功能所需要保留的水(流)量.一般取 $D_1 = 75\%$, $D_2 = 95\%$.②优良河势保持率.河势是指一条河流或一段河道的基本流势,有时也称为基本流路[7].根据专家意见取 $D_1 = 60\%$, $D_2 = 80\%$.③水质达标率.按发达社会要求,水质达标率应该达到 70% 以上,水质达标率在 50% 以下则认为不符合可持续利用观念.所以取 $D_1 = 50\%$, $D_2 = 70\%$.

应用式(3)~(6)可计算上述 3 个评价指标的隶属度.结合专家给出的另外 3 个评价指标的评价向

量，得到模糊评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ \square & \square & \square \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix}$$

3.4 模糊综合评价

根据模糊综合评价的原理，评价结果 B 可以通过如下模糊变换得到：

$$B = WR = [b_1, b_2, \cdots, b_6] \tag{7}$$

若 $\sum_{j=1}^{6} b_j \neq 1$，则对向量 B 进行归一化处理.

3.5 评价示例

若某条河流的河道生态需水满足程度为 80%，优良河势保持率为 63%，水质达标率为 65%. 它们的评价向量利用式(3)～(6)计算，结果分别为(0.00，0.75，0.25)，(0.00，0.65，0.35)，(0.25，0.75，0.00). 10 名专家对“水系连通性”指标的评判是：4 名专家的评判是“健康”，4 名专家的评判是“亚健康”，2 名专家的评判是“不健康”，则“水系连通性”指标的评价向量为(0.40，0.40，0.20)，同样得到其他两个评价指标的评价向量，“洪水蓄泄能力”指标的评价向量为(0.60，0.30，0.10)，“水生生物物种组成”指标的评价向量为(0.30，0.60，0.10).

评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.40 & 0.20 \\ 0.00 & 0.75 & 0.25 \\ 0.00 & 0.65 & 0.35 \\ 0.60 & 0.30 & 0.10 \\ 0.25 & 0.75 & 0.00 \\ 0.30 & 0.60 & 0.10 \end{bmatrix}$$

利用上述数据进行模糊变换：$B = WR = [0.238, 0.559, 0.203]$.

将评价结果转化为具体的分值，即 $D = B[87.5, 62.5, 25]^{T} = 60.8$，这个值在区间[50，75]内，据此可判定该河流处于“亚健康”状态，应该采取必要的措施进行综合规划和治理.

4 结 语

a. 本文应用层次分析法和模糊综合评价法对河流进行评价，减少了评价过程的不确定性和主观随意性，评价方法简单易行，可操作性强.

b. 对河流健康的评价涉及多方面的因素，是一个复杂的问题. 评价指标体系的建立、主要评价指标的选取和指标权重的确定等直接影响最终的评价结果. 本文所设计的河流健康评价指标体系是否合理，是否具有代表性，评价指标的权重是否能与实际吻合，都值得进一步探讨.

参考文献：

[1] 蔡其华. 维护健康长江，促进人水和谐[J]. 人民长江，2005(3)：1-3.

[2] 李红，杨小凯. 利用层次分析法确定水库选址问题[J]. 海河水利，2004(4)：54-55.

[3] 谭跃进，陈英武，易进先. 系统工程原理[M]. 长沙：国防科学技术出版社，1999.

[4] 张光进，龙朝双，张银香. 层次分析和模糊评价在企业引进人才工作中的应用[J]. 科技进步与对策，2003(6)：134-135.

[5] 黄绍娃，胡志光. 模糊综合评判法确定城市污水处理工艺[J]. 工业用水与废水，2004(4)：12-14.

[6] 陈洋波，李长兴，冯智瑶，等. 深圳市水资源承载能力模糊综合评价[J]. 水力发电，2004(3)：10-14.

[7] 姚乐人. 防洪工程[M]. 北京：中国水利水电出版社，1996：20-66.

(收稿日期：2005-05-15 编辑：高建群)

(上接第 23 页)

参考文献：

[1] 刘茂松，张明娟. 景观生态学[M]. 北京：化学工业出版社，2004：32-33.

[2] SHIELDS F D，KNIGHT S S，MOORE M T. Stream corridor restoration：a long and winding road[J]. Ecological Engineering，2003，20(5)：441-454.

[3] JERRY B，RON T. Stream corridor restoration：principles，processes，and practices[M]. USDA，Natural Resources Conservation Service，1998.

[4] MARTIN C. Floodplain-river ecosystem：lateral connections and the implications of human interference[J]. Geomorphology，2003，56(4)：335-349.

[5] POWER M E，DIETRICH W E. How does floodplain width affect floodplain river ecology？a preliminary exploration using simulations[J]. Geomorphology，1995，13(1)：301-317.

[6] 尚玉昌. 普通生态学[M]. 北京：北京大学出版社，2002.

[7] 佩茨 G E. 蓄水河流对环境的影响[M]. 北京：中国环境科学出版社，1988.

[8] 杨桂山，于秀波，李恒鹏. 流域综合管理导论[M]. 北京：科学出版社，2004.

(收稿日期：2005-09-09 编辑：熊水斌)