

层次分析法在水环境安全综合评价中的应用

樊彦芳,刘 凌,陈 星,熊丽君

(河海大学水资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:针对目前存在的水环境安全问题,用层次分析法(AHP)建立水环境安全综合评价指标体系,并计算各指标的权重,以评价影响水环境安全系统的主要因素.结果表明:水环境综合评价指标体系 22 个指标的权重确定中,所占权重最大的 5 个指标依次为:河流水质级别、河流生态需水压力、城市废污水排放量、河流 COD_{Cr}质量浓度以及污染物排放强度等.

关键词:层次分析法;水环境安全;指标体系;权重

中图分类号:X923 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2004)05-0512-03

水环境安全管理是当今世界发展所面临的主要问题之一^[1].2000 年 3 月在荷兰海牙召开的世界部长级会议,2000 年 8 月在瑞典斯德哥尔摩召开的世界水问题讨论会,其主题都为“21 世纪的水安全”^[2].在我国,水安全危机日益严重,其中水环境的安全问题主要表现为:水土流失,水体污染严重,水功能衰退,大规模的引水工程和大坝建设导致下游流量减少,原有生态环境遭到破坏,地下水开采过度形成地下漏斗,河流三角洲退化,一些生物物种灭绝,内陆湖泊大量缩小,沼泽地消失等.针对这些问题,应研究建立水环境安全综合评价指标体系,探索水环境问题的规律,综合评价水环境质量和功能,为合理开发利用水资源、保护水环境提供科学依据.

1 指标体系和层次结构

根据区域水环境综合评价指标体系的建立原则^[3]:科学性、代表性、完备性、动态性与静态性相结合、可比性、可操作性、系统性等,经理论分析和专家咨询,利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process Method)将水环境安全综合评价指标体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层次,见表 1.

1.1 确定水环境综合评价指标体系各指标权重的方法

由于各指标因子在指标体系中的作用不同,对水环境安全系统的影响程度有差异,为了区分其差异性,常采用加权评价法.本文采用层次分析法(AHP)来确定水环境综合评价指标的权值. AHP 方法^[4,5]是将相互关联的要素按隶属关系划分为若干层次,利用数学方法综合调查访问所得各方面意见,给出各层次各要素的相对重要性权重,作为综合分析的基础.

1.2 构造判断矩阵

判断矩阵表示对于上一层次某个元素,本层次有关

表 1 水环境综合评价指标体系

Table 1 Water-environment comprehensive assessment index system

目标层	准则层	指标层
水环境安全综合评价指数 A	污染源安全 B ₁	污染物排放强度 C ₁
		城市废污水排放量 C ₂
		农药施用强度 C ₃
		化肥施用强度 C ₄
		农村生活污水排放量 C ₅
	地表水环境安全 B ₂	地表水体 COD _{Cr} 质量浓度 C ₆
		地表水体 BOD ₅ 质量浓度 C ₇
		水源水质达标率 C ₈
		河流水质级别 C ₉
		湖泊水面缩减率 C ₁₀
	地下水环境安全 B ₃	水库水面变化率 C ₁₁
		地下水矿化度 C ₁₂
		地下水 NO ₃ -N 质量浓度 C ₁₃
		地下水开采率 C ₁₄
		海水入侵面积变化率 C ₁₅
	水土保持安全 B ₄	地下水水位年均下降量 C ₁₆
		水土流失率 C ₁₇
		平均土壤侵蚀模数 C ₁₈
	生态系统安全 B ₅	水蚀总量 C ₁₉
		河流生态需水量压力 C ₂₀
		用于湖泊湿地保护与恢复的生态环境需水量压力 C ₂₁
		回补超采地下水的生态环境需水量压力 C ₂₂

注:生态需水压力指各生态需水量与水资源总量的比值^[6].

元素的相对重要性.假定 A 层中元素 A 与下一层次中元素 $B_1, B_2, \dots, B_m$ 有联系,用 u_{ij} 表示对于 A_K 来说, B_i 与 B_j 的相对重要性, u_{ij} 一般取 $1, 2, 3, \dots, 9$ 以及它们的倒数,并且判断矩阵应满足

$$u_{ii} = 1 \qquad u_{ij} = \frac{1}{u_{ji}} \qquad (i, j = 1, 2, \dots, m)$$

(1)

判断矩阵元素的值反映了人们对各因素相对重要性的认识,一般为 $1 \sim 9$ 及其倒数,其标度方法见表 2.

根据专家咨询结果,整理得到水环境安全系统中目前考虑的 22 个因素的 $A-B, B_1-C, B_2-C, B_3-C, B_4-C, B_5-C$ 等判断矩阵,见表 3~表 8.

1.3 层次单排序及其一致性检验

层次单排序是根据判断矩阵计算对于上一层次某元素而言,本层次与之有联系的元素重要次序的权值,是本层次中所有元素对上一层次而言进行重要性排序的基础,是指计算判断矩阵的最大特征根和相应的特征向量.本文选用和积法计算,其步骤如下 (a)将判断矩阵每一列正规化 (b)将每一列正规化的判断矩阵按行相加得到向量 (c)对向量做正规化处理,依次得到的列向量即为所求特征向量 (d)计算判断矩阵的最大特征根 (e)对判断矩阵进行一致性和随机性检验.经检验,所构造的 6 个判断矩阵均具有满意的一致性,说明权重分配是合理的.各判断矩阵及计算结果见表 9.

表 3 $A-B$ 比较判断矩阵

Table 3 Deterministic matrix for $A-B$

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
B_1	1	1/2	2	3	2
B_2	2	1	2	3	2
B_3	1/2	1/2	1	2	1/3
B_4	1/3	1/3	1/2	1	1/2
B_5	2	1/2	3	2	1

表 5 B_2-C 比较判断矩阵

Table 5 Deterministic matrix for B_2-C

B_2	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
C_6	1	5	2	1/2	3	3
C_7	1/5	1	1/4	1/3	2	2
C_8	1/2	4	1	1/3	2	2
C_9	2	3	3	1	3	3
C_{10}	1/3	1/2	1/2	1/3	1	1
C_{11}	1/3	1/2	1/2	1/3	1	1

1.4 层次总排序及其一致性检验

层次总排序就是计算 C 层对 A 层的相对重要性排序,实际上是层次单排序的加权组合.另外也需要检查整个递阶层次模型的判断一致性.

通过上述方法,计算出 C 层对于 A 层的权重,即层次总排序,见表 10,并进行一致性检验.结果说明了 C 层对于 A 层总排序满意一致性.

2 结 论

水环境安全系统综合评价指标体系 22 个指标的权重确定中,前 5 名依次为河流水质级别、河流生态需水压力、城市废污水排放量、河

表 2 AHP 标度法及其描述

Table 2 Scale of AHP and its description

标度	含义
1	表示两个因素相比,一个因素与另一个因素同样重要
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 i 与因素 j 比较得判断 u_{ij} , 则因素 j 与因素 i 比较得判断为 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

表 4 B_1-C 比较判断矩阵

Table 4 Deterministic matrix for B_1-C

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	1	1/2	3	3	2
C_2	2	1/3	3	3	2
C_3	1/3	1/3	1	3	1/2
C_4	1/3	1/3	1/3	1	1/2
C_5	1/2	1/2	2	2	1

表 6 B_3-C 比较判断矩阵

Table 6 Deterministic matrix for B_3-C

B_3	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}
C_{12}	1	1	1/3	1/2	1/3
C_{13}	1	1	1/3	1/2	1/3
C_{14}	3	3	1	1/3	1/2
C_{15}	2	2	3	1	1/2
C_{16}	3	3	2	2	1

表 7 B_4-C 比较判断矩阵

Table 7 Deterministic matrix for B_4-C

B_4	C_{17}	C_{18}	C_{19}
C_{17}	1	2	3
C_{18}	1/2	1	2
C_{19}	1/3	1/2	1

表 8 B_5-C 比较判断矩阵

Table 8 Deterministic matrix for B_5-C

B_5	C_{20}	C_{21}	C_{22}
C_{20}	1	2	3
C_{21}	1/2	1	2
C_{22}	1/3	1/2	1

表 9 层次单排序
Table 9 Result for calculated weight

判断矩阵	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	CI	RI	CR	一致性检验
$A-B$	0.261	0.331	0.135	0.087	0.186		0.066	1.120	0.059	满意一致性
B_1-C	0.266	0.352	0.129	0.081	0.171		0.056	1.120	0.050	满意一致性
B_2-C	0.256	0.100	0.165	0.323	0.078	0.078	0.080	1.240	0.065	满意一致性
B_3-C	0.097	0.097	0.382	0.159	0.265		0.022	1.120	0.019	满意一致性
B_4-C	0.539	0.297	0.164				0.004	0.580	0.008	满意一致性

表 10 水环境安全系统综合评价指标权重值
Table 10 Weight for comprehensive evaluation indexes of water environmental safety system

编号	评价指标	权重值	编号	评价指标	权重值
C_1	污染物排放强度	0.069	C_{12}	地下水矿化度	0.013
C_2	城市废污水排放量	0.092	C_{13}	地下水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度	0.013
C_3	农药施用强度	0.034	C_{14}	地下水开采率	0.052
C_4	化肥施用强度	0.021	C_{15}	海水入侵面积变化率	0.021
C_5	农村生活污水排放量	0.045	C_{16}	地下水水位年均下降量	0.036
C_6	地表水体 COD_{Cr} 质量浓度	0.085	C_{17}	水土流失率	0.047
C_7	地表水体 BOD_5 质量浓度	0.033	C_{18}	平均土壤侵蚀模数	0.026
C_8	水源水质达标率	0.055	C_{19}	水蚀总量	0.014
C_9	河流水质级别	0.107	C_{20}	河流生态环境需水压力	0.100
C_{10}	湖泊水面缩减率	0.026	C_{21}	湿地保护与恢复的生态需水压力	0.055
C_{11}	水库水面变化率	0.026	C_{22}	回补超采地下水的生态需水压力	0.031

流 COD_{Cr} 质量浓度以及污染物排放强度等。根据排序结果,污染源安全、地表水环境安全、地下水环境安全、水土保持安全以及生态系统安全 5 个子安全表征因子可分别选取城市废污水排放量、河流水质级别、地下水开采率、水土流失率、河流生态需水压力等。

参考文献：

[1] 彭盛华,翁立达,赵俊琳.汉水流域水环境安全管理对策探讨[J].长江流域资源与环境,2001,10(6):530—536.
[2] 方红松,刘云旭.关于中国的水安全问题及其对策探讨[J].中国安全科学学报,2002,12(1):38—41.
[3] 周兴.AHP 法在广西生态环境综合评价中的应用[J].广西师范学院学报(自然科学版),2003,20(3):8—9.
[4] 赵焕臣,许树柏.层次分析法[M].北京:科学出版社,1986.1—43.
[5] 张延欣.系统工程学[M].北京:气象出版社,1997.125—134.
[6] 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.

Application of analytic hierarchy process method to
comprehensive evaluation of water environmental safety system

FAN Yan-fang , LIU Ling , CHEN Xing , XIONG Li-jun

(Key Laboratory of Water Resources Development of Ministry of Education , Hohai Univ , Nanjing 210098 , China)

Abstract A water environmental safety assessment index system was set up and the weight of each index was calculated by the analytic hierarchy process (AHP) method. The result can be used to evaluate the main factors influencing the water environmental safety system. It was indicated that , among the 22 indexes of the system , 5 indexes with the largest weights were ranked as follows : the grade of river water quality , pressure of ecological water demand of rivers , volume of urban wastewater discharge , COD_{Cr} concentration of rivers , and discharge intensity of pollutants.

Key words analytic hierarchy process method ; safety of water environment ; index system ; weight