

水资源可持续利用分层分级评价研究

何士华,程乖梅

(昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051)

摘要: 水资源可持续利用可看成是一个多层次多指标的决策问题. 阐述了构建水资源可持续利用指标体系的基本原则,采用层次分析法 (AHP) 计算了各指标的相对重要权值,并通过定义一个综合评价指数,对 LJ 流域水资源可持续利用程度进行了定量的综合评价.

关键词: 水资源可持续利用;指标体系;层次分析法;流域水资源

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X (2006) 03 - 0033 - 05

Study on the Hierarchy and Degree Evaluation of Sustainable Water Resources Utilization

HE Shihua, CHENG Guaim ei

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Sustainable utilization of water resources can be treated as a decision problem of multi - hierarchy and multi - index. The establishing principles of index system of sustainable water resources utilization are expounded. Analytic hierarchy process (AHP) is adopted to calculate the relative weight of each index and a comprehensive evaluation index is defined to evaluate quantitatively the sustainable degree of water resources utilization of the LJ basin.

Key words: sustainable utilization of water resources; index system; analytic hierarchy analysis; basin water resources

0 引言

可持续发展的概念自诞生以来,已越来越受到各国政府和学者的关注,其战略思想已延伸到社会经济的各个领域.本质上,可持续发展是要处理好社会、经济、环境与资源的协调发展关系,其核心在于有效管理好自然资源,为经济发展提供持续的支撑力.

水资源可持续利用是可持续发展概念在水资源领域的延伸和拓展,是可持续发展框架下水资源利用的一种新模式,其根本目的是在维持水资源的持续性和生态系统完备性的前提下,支持人口、资源、环境与社会经济协调发展和满足代内、代际用水需要的全过程,是水资源开发、利用、保护和综合管理一体化的集成.

水资源可持续利用是当今世界水资源领域前沿性的研究方向之一.我国对水资源可持续利用问题的研究主要起步于 20 世纪 90 年代,当前对这一问题的研究主要集中在对水资源可持续利用的基本原理、基本问题、基本模式框架的定性认识和一般性陈述方面,国际上对水资源可持续利用的量化研究也还处在积极探索阶段.本文根据水资源可持续利用问题所具有的多层次、多指标特征,采用层次分析法计算了反映各指标相对重要性的权值,并通过定义一个表达水资源可持续利用程度的综合评价指数,对区域(流域)水资源的可持续利用性进行了定量分析评价.

1 水资源可持续利用指标体系的构建原则

水资源可持续利用问题具有典型的多层次、多指标特征.为了达到以水资源的可持续利用保障可持续

收稿日期: 2005 - 10 - 05. 基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目 (项目编号: 03Y252D).

第一作者简介: 何士华 (1963 ~), 男, 博士, 副教授. 主要研究方向: 水资源可持续利用与管理. E - mail: hoxiwa@sina.com

发展的目的,必然要考虑社会、经济、环境和水资源的自身特性等因素的影响及它们之间的相互作用关系,而社会经济——生态环境——水资源这一复合系统的发展特征及水资源利用水平又通过相应的指标体系得以体现.为了对区域(流域)的水资源开发利用进行定量的评价和诊断,首先需要建立水资源可持续利用的评价指标体系.

建立水资源可持续利用指标体系,应根据区域水资源特点,考虑到区域社会经济不平衡、水资源开发利用程度的差异等.具体来说,应遵循以下原则:

1)科学性原则,即按照科学理论,特别是可持续发展理论定义指标的概念和计算方法.指标体系应能够较客观、真实地度量水资源利用的状况、方略和规划目标等.

2)整体性原则.水资源可持续利用指标体系既要有反映社会、经济、人口,又要有反映生态、环境、资源等系统的发展指标.既要选择有代表性的指标,也要考虑到“面”上指标的合理分布.

3)可比性原则.可持续发展评价是对某一地区、某一阶段的发展状态进行分析评判,这种态势分析需要有一定参照系,评判标准的选择必须考虑不同评价区域和等级的比较关系.因此,所选指标应尽可能采用标准的名称、概念、计算方法,做到与国际指标的可比性,同时又要考虑我国的历史情况.

4)协调性原则.可持续必须强调经济、社会、资源与环境的协调发展.正确的选择是把近期与长远发展结合起来,以经济、社会、资源、环境的协调发展为目标,在经济不断增长的前提下,实现资源的合理利用和环境质量的不断改善.

5)差异性原则.在可持续发展评价中,涉及到经济、社会、资源和环境等各个方面的因素.由于各类指标所描述的特征和状态不同,评价标准的取值应有所不同.建立指标体系,首先就是要分析资源的客观性指标,包括其数量、质量和所处的地理位置,以及经济和社会属性方面的需求;其次,指标体系的确定受不同人群的价值观的影响,即不同地区、不同行业、不同种族的人在看待同一问题时,可能会得出不同的结论,表现在指标上,就意味着对指标的选择和其权重的确定.

6)可操作性原则.选择的指标应简单且易于解释和表达,易于取得数据.

7)独立性原则.度量水资源可持续利用的指标往往存在信息上的重叠,所以要尽量选择那些具有相对独立性的指标.

在建立水资源可持续利用的评价指标体系时,上述各项原则既要综合考虑,又要区别对待.一方面要综合考虑指标的科学性、整体性、协调性、独立性等要求,不能由某项原则决定目标的取舍;另一方面,由于各项原则具有特殊性及认识上的差异,对各项原则的把握标准,不能强求一致.

2 基本原理和方法

2.1 层次分析法基本原理

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process) 是美国运筹学家 T. Saaty 提出的一种多目标、多准则的决策分析技术.在明确问题及构造层次结构图见图 1 的基础上,层次分析法的主要步骤包括:

1)构造判断矩阵:在层次结构中,针对上一层次的某元素,对下一层次各个元素的相对重要性进行两两比较,并给出判断.将这些判断用数值表示出来,构成矩阵形式,即判断矩阵.判断矩阵中各元素的数值可由 9 位标度法确定^[3,4].

2)层次单排序:在层次结构中,如果下一层次中的某些元素与上一层次的某个元素有关联,则在客观上下一层次的这些元素在上一层次的对应元素中均占有一定权重.假设 M 层次中的 M_k 元素与下一层次 D 中的 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ 元素有关联,则 D_i 在 M_k 中占有的权重为 $W_i = W(D_i)$, 向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 即为单排序权值.

若构造的 n 阶判断矩阵为 B , 则计算 W 的方法是计算判断矩阵 B 的满足等式 $BW = \lambda_{\max} W$ 的最大特征根 λ_{\max} 和对应的特征向量 W . 从实用角度而言,一般采用方根法近似计算 λ_{\max} 和 W . 即首先计算矩阵 B 的每一行元素的乘积 $X_i = \prod_{j=1}^n b_{ij} (j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, n)$ 及 X_i 的 n 次方根 $P_i = (X_i)^{1/n}$, 然后对向量 $P = (P_1, \dots, P_n)^T$

进行归一化处理,即 $W_i = P_i / \sum_{j=1}^n P_j (j = 1, \dots, n)$, 则 $W = (W_1, \dots, W_n)^T$ 即为所求的特征向量. 判断矩阵 B 的最大特征根 $\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BW)_i / W_i (i = 1, \dots, n)$, 式中 $(BW)_i$ 表示向量 BW 的第 i 个分量.

为了检验判断矩阵的一致性,需要计算一致性的指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$. 此外还需要判断矩阵的平均随机一致性指标 $RI^{[4]}$. 判断矩阵的一致性指标 CI 与同阶平均随机一致性指标 RI 之比称为随机一致性比率 CR , 当 $CR = CI/RI < 0.10$ 时,即可认为判断矩阵具有完全一致性,否则就需要重新调整判断矩阵,使之满足一致性要求.

3) 层次总排序:计算同一层次所有元素对于最高层相对重要性的排序权值,称为层次总排序. 这一过程是最高层次到底层次逐层进行的. 若上一层次 C 包含 m 个元素 C_1, C_2, \dots, C_m , 其层次总排序权值为 c_1, c_2, \dots, c_m , 下一层次 D 包含了 n 个元素 D_1, D_2, \dots, D_n , 它们对元素 C_j 的层次单排序权值分别为 $d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{nj}$, 则 D 层次总排序的权值计算公式为 $w_i = \sum_{j=1}^m c_j d_{ij} (j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n)$.

对于层次总排序,也需进行一致性检验,若 D 层次某些元素对于 C_j 单排序的一致性指标为 CI_j , 相应的平均一致性指标为 RI_j , 则 D 层次总排序一致性比率为 $CR = \sum_{j=1}^m c_j CI_j / \sum_{j=1}^m c_j RI_j (j = 1, \dots, m)$.

2.2 水资源可持续利用程度的分级评价方法

层次分析法通过形成一个多层次的结构分析模型,可将系统分析归结为指标层相对于目标层的相对重要性的权值确定或相对优劣次序的排序问题. 为了进一步对水资源的可持续利用程度做出总体评价并考虑到计算方法的可操作性,定义综合评价指数为:

$$E = R^T W_p \quad (1)$$

式中, E 为水资源综合评价指数,用以反映区域或流域水资源可持续利用的总体等级水平,指数值越大,水资源可持续利用度越好. R 为各评价指标刻度值向量, W_p 为各评价指标的权值向量.

将计算得出的水资源可持续利用综合评价指数大小与水资源可持续利用能力分级标准相对照,如该值落在某一分级数值范围内,即表示水资源可持续发展能力现状处于某一状态.

水资源可持续利用能力分级标准分为以下 5 级: 1 级综合水资源可持续利用能力好 (基本未开发) 的评分值为 $0.8 \sim 1.0$; 2 级综合水资源可持续发展能力较好的 (可持续) 评分值为 $0.6 \sim 0.8$; 3 级综合水资源可持续利用能力一般的 (基本可持续) 评分值 $0.4 \sim 0.6$; 4 级综合水资源可持续发展能力较差的 (维持可持续利用困难) 评分值为 $0.2 \sim 0.4$; 5 级综合水资源可持续发展能力差的 (不能持续利用) 评分值为 $0 \sim 0.2$.

为了获得各评价指标刻度值,需将水资源可持续利用各评价指标量化分级,即把水资源可持续利用各指标在可能的极大值 1 与最小值 0 之间划分为若干刻度,各指标现状值与某一刻度相对应,表明评价指标的能力指数落在某刻度值处 (刻度值也可内插),则此刻度值为该指标 (利用因子) 能力值.

3 实例研究

以我国 LJ 流域为例. LJ 流域发源于青海省玉树藏族自治州的杂多县,地属唐古拉山脉北麓拉赛贡马 (又称赛错山) —面积 0.4 km^2 、海拔 5167 m 的小冰川. LJ 为一国际性河流,干流全长 2162 km ,流域面积 167487 km^2 ,其中云南省境内干流长 1247 km ,流域面积 88655 km^2 ,自北向南流经云南省西部 8 个州、32 个县市,年出境总水量为 688 亿 m^3 .

根据 AHP 的要求,建立 LJ 流域水资源可持续利用的层次结构如下.

目标层 G : 水资源可持续利用度. 即对 LJ 流域水资源可持续利用的能力进行综合评价.

准则层 C : 主要表现为 4 个方面: 水资源条件 (C_1)、水资源开发利用效率 (C_2)、生态环境状况 (C_3)、社会经济状况 (C_4).

指标层 (P): 选择最具代表性的 14 项指标作为 LJ 流域水资源可持续发展的综合指标. 分别为:

人均水资源量 P_1 : 当地水资源总量 / 总人口; 平均每 hm^2 水资源量 P_2 : 当地水资源总量 / 耕地总面积 (灌溉面积); 河流水质级别 P_3 : 根据各水质参数评价代表值比照该参数水质评价标准值确定,地表水控制

率 P_4 : 实际供水量 / 水资源量加客水量; 水资源开发利用程度 P_5 : 当地地表蓄水工程供水量 / 当地地表水资源量; 工业用水重复利用率 P_6 : %; 化肥使用强度 P_7 : 化肥施用量 / 耕地面积; 污水处理率 P_8 : 污水处置量 / 污水排放量; 天然植被率 P_9 : 天然植被面积 / 土地面积; 水土流失面积比率 P_{10} : 水土流失面积 / 土地面积; 水土流失治理率 P_{11} : 水土流失治理面积 / 水土流失面积; 人均 GDP P_{12} : \$ / 人; 人均 GDP 增长率 P_{13} : %; 单方水粮食产量 P_{14} : 粮食产量 / 灌溉用水量.

图 1 给出了 LJ 流域水资源可持续利用指标体系的层次结构.

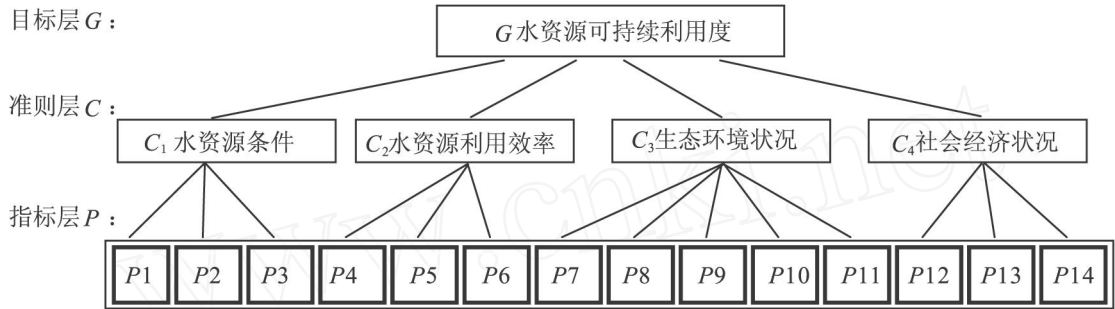


图 1 LJ 流域水资源可持续利用指标体系层次结构图

Fig.1 Hierarchy structure of index system of sustainable water resources utilization of LJ basin

根据层次分析法要求, 按结构图的层次结构关系进行判别比较, 分别构造判断矩阵, 计算出 LJ 流域水资源可持续利用准则层相对目标层的权值向量为:

$$W_C = (W(C_1), W(C_2), W(C_3), W(C_4))^T = (0.5403, 0.1228, 0.2745, 0.0624)^T \quad (2)$$

$$\lambda_{\max} = 4.1975; \quad CR = 0.073 < 0.10$$

经过层次总排序得指标层相对目标层的权值向量为 ($CR = 0.0 < 0.1$):

$$W_P = (W(P_1), W(P_2), \dots, W(P_{14}))^T$$

$$= (0.1801, 0.1801, 0.1801, 0.0307, 0.0614, 0.0307, 0.0549, 0.0549, 0.0549, 0.0549, 0.0208, 0.0208, 0.0208)^T \quad (3)$$

将各评价指标的能力刻度值在 0 - 1 之间划分为 6 个刻度, 即 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0, 具体见表 1.

表 1 水资源可持续利用评价指标能力刻度

Tab 1 Discrete index value used to evaluate the sustainability of water resources utilization

评价指标	离散的指标值 (刻度值)					
$P_1 / 10^3 m^3$	30 (1)	24 (0.8)	18 (0.6)	12 (0.4)	6 (0.2)	3 (0.1)
$P_2 / 10^4 m^3$	12 (1)	10 (0.8)	8 (0.6)	6 (0.4)	4 (0.2)	2 (0.1)
P_3	1级 (1)	2级 (0.8)	3级 (0.6)	4级 (0.4)	5级 (0.2)	>5级 (0)
$P_4 / \%$	50 (1)	40 (0.8)	30 (0.6)	20 (0.4)	10 (0.2)	0 (0)
$P_5 / \%$	70 (0)	60 (0.2)	50 (0.4)	40 (0.6)	30 (0.8)	20 (1)
$P_6 / \%$	80 (1)	70 (0.8)	50 (0.6)	30 (0.4)	10 (0.2)	0 (0)
$P_7 / kg \cdot hm^{-2}$	0 (1)	30 (0.8)	600 (0.6)	900 (0.4)	1 200 (0.2)	1 500 (0)
$P_8 / \%$	100 (1)	80 (0.8)	60 (0.6)	40 (0.4)	20 (0.2)	0 (0)
$P_9 / \%$	50 (1)	40 (0.8)	30 (0.6)	20 (0.4)	10 (0.2)	0 (0)
$P_{10} / \%$	0 (1)	10 (0.8)	20 (0.6)	30 (0.4)	40 (0.2)	50 (0)
$P_{11} / \%$	100 (1)	80 (0.8)	60 (0.6)	40 (0.4)	20 (0.2)	0 (0)
$P_{12} / \$ \cdot 人^{-1}$	20 000 (1)	10 000 (0.8)	3 000 (0.6)	1 000 (0.4)	600 (0.2)	200 (0)
$P_{13} / \%$	10 (1)	6 (0.8)	3 (0.6)	2 (0.4)	1 (0.2)	0.5 (0)
$P_{14} / kg \cdot m^{-3}$	2.5 (1)	2.0 (0.8)	1.5 (0.6)	1.0 (0.4)	0.5 (0.2)	0.1 (0)

进一步确定各评价指标的现状值. 根据相关资料^[5,6]估算出 LJ 流域水资源可持续利用各评价指标的现状值如下:

人均水资源量 $8\ 540\ \text{m}^3/\text{人}$, 每公顷均水资源量 $12.33 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 水质达 II 类地面水环境质量标准, 地表水控制率 0.7%, 水资源开发利用程度 4.3%, 工业用水重复利用率 54.32%, 化肥使用强度 $658.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 城镇工业污水处理率估算为 30%, 天然植被率考虑到草地等其它植被取值 70%, 水土流失面积比率估算值 28.9%, 水土流失治理率估算为 50%, 人均 GDP 为 140 \$/人, 人均 GDP 增长率约为 7.5%; 单方水粮食产量为 $1.24\ \text{kg}/\text{m}^3$.

将上述指标的现状值与表 1 对照或内插可得各评价指标的刻度值为:

$$R = (0.284\ 77, 1.0, 0.8, 0.014, 1.0, 0.643\ 2, 0.561, 0.3, 1.0, 0.422, 0.5, 0.0, 0.875, 0.496)^T$$

由 (1) 式得 LJ 流域水资源可持续利用综合评价指数为

$$\begin{aligned} E &= R^T W_p \\ &= 0.051\ 30 + 0.180\ 10 + 0.144\ 08 + 0.000\ 43 + 0.061\ 40 + 0.019\ 75 + 0.030\ 80 + 0.016\ 47 + \\ &\quad 0.054\ 90 + 0.023\ 17 + 0.027\ 45 + 0.000\ 00 + 0.018\ 20 + 0.010\ 32 = 0.638\ 4 \end{aligned} \quad (4)$$

即 LJ 流域水资源可持续利用综合评价指数为 0.638 4, 对照水资源可持续利用的评判标准, 结论为可持续, 计算结果与实际情况基本一致. 影响 LJ 流域水资源可持续发展的因素主要是经济发展水平.

4 结 语

区域(流域)水资源可持续利用评价需要把社会经济发展、生态环境保护与水资源状况等准则相结合进行综合研究, 各准则又通过具体的指标得以体现. 因此, 水资源可持续利用问题是一个多层次、多指标的多准则决策问题. 指标体系的建立应遵循一套共同的原则, 但由于我国不同区域(流域)的实情千差万别, 在现有的条件下, 企图构建一个统一的指标体系去适用于所有的区域或流域是不现实的. 论文根据 LJ 流域的具体情况, 建立了 LJ 流域水资源可持续利用评价的层次结构模型, 采用层次分析法计算了各指标相对于目标层的相对重要性的权值. 在此基础上, 通过定义一个能较全面反映各指标取值大小及权值大小的综合评价指数, 对 LJ 流域水资源可持续利用程度进行了定量评价, 计算结果与实际情况基本一致.

参考文献:

- [1] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 10 - 22
- [2] 何士华, 邹进, 程乖梅. 区域水资源可持续利用的多目标决策模型 [J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2005(3): 56 - 59.
- [3] 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 130 - 145.
- [4] 程理民, 吴江, 张玉林. 运筹学模型与方法教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 236 - 249.
- [5] 何大明, 周贵荣, 刘恒. 澜沧江流域水资源与 GIS [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001: 10 - 33.
- [6] 顾世祥, 谢波. 云南高原水资源开发利用调查研究 [C]. 云南省水利学会交流论文, 2003.