

基于层次分析法的广西水资源可持续利用评价

郑二伟¹, 麻荣永², 李琳¹

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南郑州 450016; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 水资源的可持续利用有利于保障生态、环境、经济和社会可持续发展。为研究广西水资源可持续利用发展水平, 构建了4个准则层17个指标的水资源可持续利用评价指标体系, 采用层次分析法的区域水资源可持续利用评价方法, 对广西水资源进行可持续利用评价。评价结果表明: 广西水资源可持续发展能力中等, 为基本可持续水平, 水资源利用效率权重偏小; 为满足广西经济社会的可持续发展要求, 建议提高水资源开发利用效率。

关键词: 水资源可持续利用; 指标体系; 层次分析法; 综合评价

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0057-05

Evaluation of sustainable utilization of water resources based on analytic hierarchy process in Guangxi province

ZHENG Erwei¹, MA Rongyong², LI Lin¹

(1. Henan Water and Power Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450016, China;

2. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The sustainable utilization of water resources is beneficial to ensure environment, economy and society sustainable development. In order to evaluate the sustainable utilization level of water resources in Guangxi province, the paper established the evaluation index systems of sustainable utilization including four standard layers with seventeen evaluation indexes, and used AHP method of sustainable utilization of water resources to evaluate the sustainable utilization level of water resources in Guangxi province. The result shows that the capacity of sustainable development of water resources in Guangxi is in the middle and its utilization level is basic sustainable, but the weight of utilization efficiency of water resources is too small. In order to meet the need of economic and social sustainable development in Guangxi, it is necessary to improve the utilization efficiency of water resources.

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

广西水资源总量较丰富, 但径流时空分配不均衡, 水资源开发利用效率不高。近年来, 河道外用水量不断增加, 致使部分河段水质受到污染后而失去自净能力, 影响到生态用水; 在防洪、通航、发电、灌溉、生态保护、工业、城镇和农村生活用水等方面出现了新的水资源供需矛盾; 部分水利工程不配套, 工程质量差, 设计标准偏低, 管理体制不完善, 也成为限制水资源可持续利用的“瓶颈”。因此, 对广西水资源的可持续性利用状况进行科学评价, 为科学制定水资源可持续利用对策提供参考。

水资源可持续利用受到经济、社会、生态、环境等多重因素的影响。近年来许多学者从不同的角度

出发采用不同方法, 对水资源可持续利用进行分析评价。水资源可持续利用评价方法主要有主成分分析法、层次分析法、模糊综合评价法、灰色聚类评价模型、人工神经网络模型、最大熵原理的模糊综合评价模型等^[1-2]。在主成分分析中, 对提取的几个主成分要求给出符合实际背景和意义的解释, 但解释一般带有模糊性, 不像原始变量的含义那么清楚、确切。模糊评判法受到指标量化和算子选择方法的限制; 最大熵原理在快变量和慢变量的数目确定上没有理论证明。层次分析法采用定量指标和定性指标的相对权重值来反映可持续利用指标值。如何选取理想的评价方法, 目前还没有公认的标准和方法, 因

收稿日期: 2013-11-23; 修回日期: 2014-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767001)

作者简介: 郑二伟(1979-), 男, 河南遂平人, 工程师, 硕士, 研究方向为水资源评价与管理。

通讯作者: 麻荣永(1955-), 男, 广西南宁人, 硕士, 教授, 研究方向为水资源规划与管理。

此,应根据评价区域情况以及对水资源开发利用程度的具体要求,选择合适的评价方法。本文采用层次分析法,对广西 2005 – 2010 年水资源可持续利用情况进行动态综合评价。

1 层次分析法

1.1 层次分析法原理

层次分析法^[3] (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP), 由美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出, 是一种多目标、多准则, 将定性定量分析相结合的系统分析方法。层次分析法通过将处理复杂系统的定性分析, 转化为定性定量结合的系统分析, 用群体判断克服单一判断的主观偏好, 进行群体综合, 再以定量的形式给出准确的排序结果; 通过判断矩阵的一致性检验, 检查思维判断的一致性, 克服两两比较的缺陷。

1.2 层次分析法的主要步骤

层次分析法首先把问题层次化, 将问题分解成不同的因素 (指标), 然后按照因素间的隶属关系, 将各因素分不同层次聚集组合, 形成一个多层次的分析结构模型。模型中各因素的数值根据相对重要性分别按标度 1 ~ 9 及其倒数^[4]进行赋值, 构成判断矩阵, 然后计算出矩阵的最大特征根及特征向量, 并进行一致性检验^[5-8]。下面以 B₁ - D 判断矩阵为例, 简述层次分析法的主要步骤。

(1) 构造判断矩阵 D。各因素 (指标) 进行两两比较, 根据表 1 进行赋值, 构造判断矩阵 D。

表 1 判断矩阵标度及其含义	
标度	含 义
1	表示两个因素相比, 具有同样的重要性
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 j 比较得判断 d_{ij} , 则因素 j 与 i 比较得判断 $d_{ji} = 1/d_{ij}$

$D =$

$$\begin{bmatrix} D & D_1 & D_2 & \cdots & D_j & \cdots & D_{n-1} & D_n \\ D_1 & d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1j} & \cdots & d_{1,n-1} & d_{1n} \\ D_2 & d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2j} & \cdots & d_{2,n-1} & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ D_i & d_{i1} & d_{i2} & \cdots & d_{ij} & \cdots & d_{i,n-1} & d_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ D_{n-1} & d_{n-1,1} & d_{n-1,2} & \cdots & d_{n-1,j} & \cdots & d_{n-1,n-1} & d_{n-1,n} \\ D_n & d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nj} & \cdots & d_{n,n-1} & d_{nn} \end{bmatrix}$$

(2) 确定权重因子。对矩阵 D 先计算出最大特征值 $\lambda_{\max}$, 然后求出矩阵 D 的特征向量 W。

$DW = \lambda_{\max} W$ (1)

式中: W 的分量 ($w_1, w_2, \cdots, w_n$) 就是对应于 n 个因子的权重系数。

(3) 求解特征值和特征向量。直接求解矩阵 D 的特征值和特征向量比较复杂, 为求解方便常采用和积法^[9] 计算权重系数。

按行元素求几何均值, 可得:

$\overline{W}_i = n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_{ij}}$ (2)

对上式进行规范化, 即得权重系数 W_i :

$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i}$ (3)

(4) 一致性检验。采用两两比较法得到的比较矩阵可能会产生判断不一致的问题, 因此需要进行一致性检验:

$CR = \frac{CI}{RI}$ (4)

式中: $CI = (\lambda_{\max} - m)/(m - 1)$ 为判断 B₁ - D 的一致性指标; RI 表示同阶的平均随机一致性指标值, RI 值依据表 1 确定。当 $CR < 0.10$ 时, 表示判断矩阵通过一致性检验, 否则需重新调整判断矩阵, 直到通过一致性检验为止。

表 2 一致性评价指标能力刻度										
矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
R. I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	

2 广西水资源可持续利用评价

2.1 评价指标体系层次结构的构建

水资源可持续利用评价指标体系是衡量水资源高效持续利用水平的各种指标有机组成的集合体, 完备的评价指标体系是准确评价水资源可持续利用的前提。评价指标体系的设置应遵循可持续发展、科学性、可量性、独立性、层次性、动态性等原则。

区域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, 需要结合区域社会经济发展、生态环境保护、水资源状况等进行综合评价。根据上述原则, 选取能够准确反映广西水资源可持续利用的主控因素, 同时考虑到有些指标的数据难以获取, 本次评价共选取了水资源条件、水资源利用效率、生态环境和社会经济 4 个准则层、共 17 个指标,

构成广西水资源可持续利用评价指标体系层次结构(表3)。

表3 广西水资源可持续利用评价指标层次结构

m ³ /人, 万 m ³ /hm ² , 万 m ³ /km ² · a, %, 亿 m ³ , kkm ² , kg/hm ² , 元/人, 万人, kg	
准则层	指标层(评价指标)
水资源条件	D ₁ 人均水资源量
	D ₂ 单位耕地面积水资源量
	D ₃ 产水模数
水资源利用效率	D ₄ 水资源开发利用程度
	D ₅ 地表水控制率
	D ₆ 水库库容量
生态环境状况	D ₇ 雨污水处理回用量
	D ₈ 工业废水排放达标率
	D ₉ 水质优于或达到3类标准
	D ₁₀ 水土流失治理累计面积
	D ₁₁ 农田有效灌溉面积
	D ₁₂ 化肥施用强度
社会经济状况	D ₁₃ 人均地区生产总值
	D ₁₄ 人口
	D ₁₅ 生产用水量
	D ₁₆ 生活用水量
	D ₁₇ 人均粮食

2.2 确定各指标的相对权重

(1)计算准则层权重系数。准则层包括水资源条件、水利资源利用效率、生态环境状况和社会经济状况4个指标层,构造判断矩阵 $G_{4\times 4}$:

$$G_{4\times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 2 \\ 0.25 & 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 2 & 1 & 1 \\ 0.5 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算,判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 4$,其对应的归一化特征向量为 $W = \{0.8\ 0.2\ 0.4\ 0.4\}^T$, $CI = 0$, $CR = CI/RI = 0$,通过一致性检验。

(2)计算指标层权重系数。将目标层各指标进行两两比较,构造判断矩阵 $G_i(i = 1,2,3,4)$ 。

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 0.2 & 0.2 & 1 \end{bmatrix}$$
$$G_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 5 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 2.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 2.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 2.5 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 1 \end{bmatrix}$$
$$G_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1 & 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 5/2 & 7/2 \\ 1/5 & 1/5 & 2/5 & 1 & 7/5 \\ 1/7 & 1/7 & 2/7 & 5/7 & 1 \end{bmatrix}$$

对上述4个判断矩阵分别进行计算,并进行一致性检验,得到17个指标的权重(见表4)。

表4 评价指标及权重		m ³ /人, 万 m ³ /hm ² , 万 m ³ /km ² · a, %, 亿 m ³ , kkm ² , kg/hm ² , 元/人, 万人, kg	
目标层	准则层及权重	指标层	指标权重(相对权重)
水资源可持续利用度	水资源条件 (0.4445)	D ₁ 人均水资源量	0.3334(0.1482)
		D ₂ 单位耕地面积水资源量	0.3333(0.1482)
		D ₃ 产水模数	0.3333(0.1482)
	水资源开发利用效率 (0.1111)	D ₄ 水资源开发利用程度	0.4545(0.0505)
		D ₅ 地表水控制率	0.4545(0.0505)
		D ₆ 水库库容量	0.0909(0.0101)
	生态环境状况 (0.2222)	D ₇ 雨污水处理回用量	0.2703(0.0601)
		D ₈ 工业废水排放达标率	0.2703(0.0601)
		D ₉ 水质优于或达到3类标准	0.1351(0.0300)
		D ₁₀ 水土流失治理累计面积	0.1351(0.0300)
		D ₁₁ 农田有效灌溉面积	0.1351(0.0300)
		D ₁₂ 化肥施用强度	0.0541(0.0120)
	社会经济状况 (0.2222)	D ₁₃ 人均地区生产总值	0.3518(0.0782)
		D ₁₄ 人口	0.3518(0.0782)
		D ₁₅ 生产用水量	0.1759(0.0391)
		D ₁₆ 生活用水量	0.0704(0.0156)
		D ₁₇ 人均粮食	0.0503(0.0112)

经层次总排序得到指标层相对目标层的权重向量 $W_p = (W(D_1), W(D_2), \dots, W(D_{17}))^T = (0.1482, 0.1481, 0.1481, 0.0505, 0.0505, 0.0101, 0.0601, 0.0601, 0.0479, 0.0300, 0.0300, 0.0300, 0.0120, 0.0782, 0.0782, 0.0391, 0.0156, 0.0112)^T$

从准则层权重排序来看,水资源条件权重指数比水资源开发利用效率、生态环境和社会经济的权重指数都大,这也表明水资源条件决定其他一切与之有关的发展状况;生态环境和社会经济的权重指数大于水资源开发利用效率的权重指数,说明广西在发展经济社会的同时越来越重视环境保护工作;在水资源利用效率方面的权重偏小些,表明尽管广西水资源相对较丰富,但在水资源利用效率方面还没有引起足够的重视,以上指标权重值也是广西水资源现状的具体反映。

2.3 评价指标的归一化处理

按照对水资源可持续利用的作用效果,评价指

标分为正效指标和负效指标两类^[10]。正效指标的指标值越大,越有利于系统的健康发展,如人均水资源量;而负效指标的作用与前者正好相反,如化肥施用强度等。评价指标归一化处理方法如下:

正效指标:

$$U_j = \begin{cases} 1 & \\ \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & \\ 0 & \end{cases}$$

负效指标:

$$U_j = \begin{cases} 1 & \\ \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} & \\ 0 & \end{cases} \tag{5}$$

按上述方法进行归一化处理,在0 ~ 1之间划分为6个刻度^[11],计算得到广西2005 - 2010年水资源可持续利用评价指标刻度值 R^T (表5)。

表5 广西水资源可持续利用评价指标刻度值

准则层	评价指标	评价指标刻度值					
		2005	2006	2007	2008	2009	2010
水资源条件	D_1 人均水资源量	0.1165	0.1264	0.0097	0.1580	0.1019	0.1257
	D_2 单位耕地面积水资源量	0.0370	0.0540	0.0550	0.0470	0.0380	0.0410
	D_3 产水模数	0.6727	1.0000	1.0000	0.7636	0.6780	0.7270
水资源利用效率	D_4 水资源开发利用程度	0.8000	0.8800	0.8300	0.8400	0.8200	0.8200
	D_5 地表水控制率	0.3518	0.2306	0.2386	0.2386	0.2942	0.3460
	D_6 水库库容量	0.2230	0.5010	0.6520	0.8310	0.6500	0.8150
生态环境状况	D_7 雨水利用及污水处理回用量	0.0150	0.0218	0.0573	0.0350	0.0475	0.0600
	D_8 工业废水排放达标率	0.8370	0.9291	0.9281	0.8568	0.9496	0.9693
	D_9 水质优于或达到3类标准	0.6880	0.7480	0.6980	0.6830	0.6500	0.6450
	D_{10} 水土流失治理累计面积	0.4959	0.5417	0.5647	0.5913	0.6143	0.6723
	D_{11} 农田有效灌溉面积	0.6080	0.6071	0.6092	0.6083	0.6091	0.6093
社会经济状况	D_{12} 化肥施用强度	0.7630	0.7668	0.7671	0.7813	0.7732	0.7786
	D_{13} 人均地区生产总值	0.7597	0.8024	0.8455	0.893	0.9209	1.0000
	D_{14} 人口	0.5075	0.5039	0.4998	0.4951	0.4908	0.4841
	D_{15} 生产用水量	0.5040	0.5140	0.4440	0.4140	0.4040	0.4180
	D_{16} 生活用水量	0.5249	0.5312	0.5378	0.5443	0.5511	0.5475
	D_{17} 人均粮食	0.4176	0.3680	0.4054	0.5412	0.4940	0.4932

2.4 水资源可持续发展能力综合评价及结果分析

根据上述各评价指标归一化后的刻度值及其权重值,计算水资源可持续发展度:

$E = R^T W_p$ (6)

式中: E 为水资源可持续发展度; R^T 为各评价指标

刻度值; W_p 为各评价指标的权值向量。

水资源可持续利用发展度,反映区域或流域水资源可持续利用的总体等级水平,其指数值越大,水资源可持续利用水平越高。水资源可持续利用发展度分为5级标准^[11-12](表6):1级,反映综合水资

源可持续利用能力好,属于基本未开发水平;2级,反映综合水资源可持续发展能力较好,为可持续利用水平;3级,反映综合水资源可持续利用能力中等,为基本可持续利用水平;4级,反映综合水资源可持续发展能力较差,维持可持续利用困难;5级,反映综合水资源可持续发展能力差,已经不能持续利用。

表6 可持续利用水平等级标准

可持续发展度	含义	可持续利用等级
0~0.2	可持续发展很差	5级
0.2~0.4	可持续发展较差	4级
0.4~0.6	可持续发展中等	3级
0.6~0.8	可持续发展较好	2级
0.8~1.0	可持续发展很好	1级

计算得到目标年水资源可持续利用综合评价指数(见表7),对照水资源可持续利用的评判标准,2005~2010年广西水资源可持续利用等级属于3级,水资源可持续发展能力中等。

表7 广西水资源可持续利用综合评价结果

评价结果	2005	2006	2007	2008	2009	2010
综合评价指数	0.4286	0.4939	0.4783	0.4651	0.4497	0.4749
可持续等级	3级	3级	3级	3级	3级	3级

3 结 语

针对广西实际情况,选取了水资源条件、水资源利用效率、生态环境和社会经济4个准则层、共17个评价指标,采用层次分析法对广西水资源可持续利用程度进行了综合评价,广西水资源可持续利用等级属于3级,水资源可持续发展能力中等。结合广西水资源利用现状及可持续利用状况,为提高广西水资源可持续利用水平,建议采取以下措施:提高水资源开发利用程度和地表水控制率,提高水资源

的利用效率;提高雨污水处理回用量、积极发展中水回用,提高工业废水排放达标率、加强生态环境保护;同时,还应合理开发利用水资源、分质供水、优质优用;以洪水风险管理活动为指导、实施流域洪水资源综合管理;强化水资源保护、重视生态用水、维护生态系统平衡;调整经济结构、合理确定水价;加强水资源法制建设。

参考文献:

[1] 宋松柏,蔡焕杰.区域水资源可持续利用的综合评价方法[J].水科学进展,2005,16(2):244-249.

[2] 程乖梅,何士华.水资源可持续利用评价方法研究进展[J].水资源与水工程学报,2006,17(1):52-56.

[3] 刘新宪,朱道立.选择与判断——AHP层次分析法决策[M].上海:上海科学普及出版社,1990.

[4] 冯尚友.多目标决策理论与应用[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.

[5] 王瑞芳,秦大庸,张占庞.层次分析法在山西省水资源安全评价中的应用[J].人民黄河,2008,30(9):40-42.

[6] 向碧为,黄国如,冯杰.基于AHP法的东江流域水基系统健康模糊综合评价[J].水电能源科学,2011,29(10):1-4.

[7] 冯兰刚,焦彦臣,都沁军.基于AHP的河北省水资源承载能力分析[J].工业技术经济,2009,28(7):90-93.

[8] 郭兵托,张金萍.宁夏川区水资源可持续利用综合评价[J].人民黄河,2010,32(11):68-69.

[9] 沈雪娇,田兆伟.层次分析法在惠州市水资源分配中的应用[J].广东水利水电,2011(7):49-51+66.

[10] 陈静.环境科学与管理区域水资源可持续利用评价研究——以济南市为例[J].环境科学与管理,2010,35(9):112-115.

[11] 何士华,程乖梅.水资源可持续利用分层分级评价研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2006,31(3):33-37.

[12] 王吉利,等.统计学教学案例[M].北京:中国统计出版社,2004.