

西南岩溶山区水资源可持续利用评价指标 选取及权重确定

楚文海^{1,2}, 高乃云¹, 鄢贵权³, 苏维词^{3,4}

(1. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 贵州大学 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003; 3. 贵州科学院, 贵州 贵阳 550001; 4. 重庆师范大学 地理学院, 重庆 400047)

摘 要: 将水资源—生态环境—社会经济复合系统作为研究对象。探讨了水资源开发利用与生态环境之间的耦合关系, 提出了水资源可持续利用是促进水资源开发与生态环境协调发展的有效措施。根据水资源可持续利用的度量需求, 将水资源可持续利用指标体系分成 3 个层次, 分别为目标层、准则层和指标层。确定了评价指标体系建立原则, 采用频率统计法、理论分析法和专家咨询法设置、筛选指标, 使指标的配置更加合理; 采用专家咨询法和改进层次分析法相结合的方法确定指标权重, 降低了主观性偏差, 为后续评价奠定了基础。对各指标权重值进行综合分析发现, 水资源本身的属性是衡量岩溶水资源可持续利用程度的最重要方面, 脆弱的生态环境对水资源可持续利用程度具有重要的影响。

关键词: 岩溶; 生态环境脆弱性; 水资源可持续利用; 评价指标; 指标权重

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)01—0059—06

中图分类号: TV213.9

Indicator Selection and Weight Determination of Water Resources for Sustainable Utilization in the Southwest Karst Area

CHU Wen-hai^{1,2}, GAO Nai-yun¹, YAN Gui-quan³, SU Wei-ci^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China; 3. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China; 4. College of Geography, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: The compound water resource system was regarded as the subject investigated. The coupling relationship between water resource utilization and eco-environment was ascertained. Sustainable water resource utilization was found to be the effective measure of harmonizing water resources and eco-environment. An evaluation system including the three levels of target, rule, and index was set up according to metric demands of sustainable water resource utilization. The principles of erecting evaluation system were established. Indexes were filtrated by frequency analysis method, theoretical analysis method, and expert consultation method. Weight of each indicator was determined by expert consultation method and Improved Analysis Hierarchy Process (IAHP) and thus, the subjective deviation was reduced. The weighted values of indicators were finally analyzed. Results indicate that the essential attributes of water resources are the most important aspect of judging the sustainable utilization degree of water resources, whereas the influence of fragile eco-environment ranks second.

Keywords: karst; eco-environmental fragility; sustainable utilization of water resource; evaluating indicator; indicator weight

收稿日期: 2007-08-09

修回日期: 2007-10-19

资助项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAJ08B06); 国家 973 项目子课题(2006CB403208); 国家自然科学基金(40561006)

作者简介: 楚文海(1983—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 在读博士, 主要从事水处理技术与水环境方面的研究。E-mail: wenhai03@163.com。

西南岩溶区是全球 3 大连续岩溶发育区之一^[1], 该区生态环境极其脆弱^[2], 水资源质量下降, 生态环境和水资源相互抑制, 产生恶性循环, 阻碍了区域的可持续发展, 而岩溶地区水资源的可持续利用是协调好水资源开发利用与生态环境保护的有效方法, 是实现西南岩溶山区生态环境的改善与全方位脱贫以及可持续发展的关键所在。在强调生态环境脆弱性基础上, 选取“岩溶”型水资源可持续利用评价指标因子, 并确定其权重, 对于后续水资源可持续利用评价是非常有必要的^[3]。

1 水资源分析的理论基础

1.1 水资源复合系统

水资源系统是复杂的复合的系统。水资源是社会经济、生态环境中一个纽带, 它们之间存在一个复杂的关系。本文将水资源复合系统划分为水资源系统本身、社会经济系统、生态环境系统 3 大块(见图 1)。

水资源—生态环境—社会经济各系统相互作用, 相互耦合形成一个新的系统, 此系统中, 每一因素(如生态)都是该系统的一个链, 它的变化会不同程度地影响其它链条的变化, 并且经过系统的耦合作用, 或者加大系统的变化(称之为耦合升压效应), 或者减小系统的变化(称之为耦合减压效应), 或者使系统发生微小的扰动(称之为耦合恒压效应)^[4]。

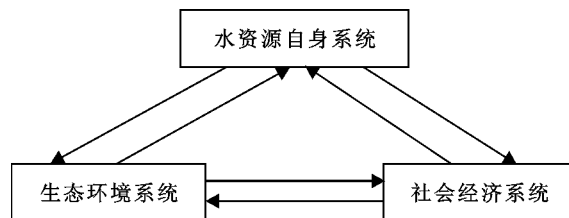


图 1 水资源复合系统

1.2 水资源可持续利用

岩溶地区生态地质环境是极其脆弱的, 水资源不合理的利用势必对该区脆弱的生态环境造成破坏, 使得植被退化、水土流失、石漠化加剧, 岩溶洪涝和岩溶干旱等频繁发生。生态环境恶化反过来也会对岩溶水资源产生约束作用, 包括对岩溶水补给、径流、排泄和水质的负面影响, 产生耦合升压效应^[4], 进而形成恶性循环, 对整个岩溶地区的可持续发展是相当不利的(见图 2)。

水资源的可持续利用是变恶性循环为良性循环的有效方法。水资源持续利用既要满足了当代人的水需求, 又不危及子孙后代的水需求, 并满足其需求能力的变化和发展, 是社会、经济可持续利用的基础条件^[5]。

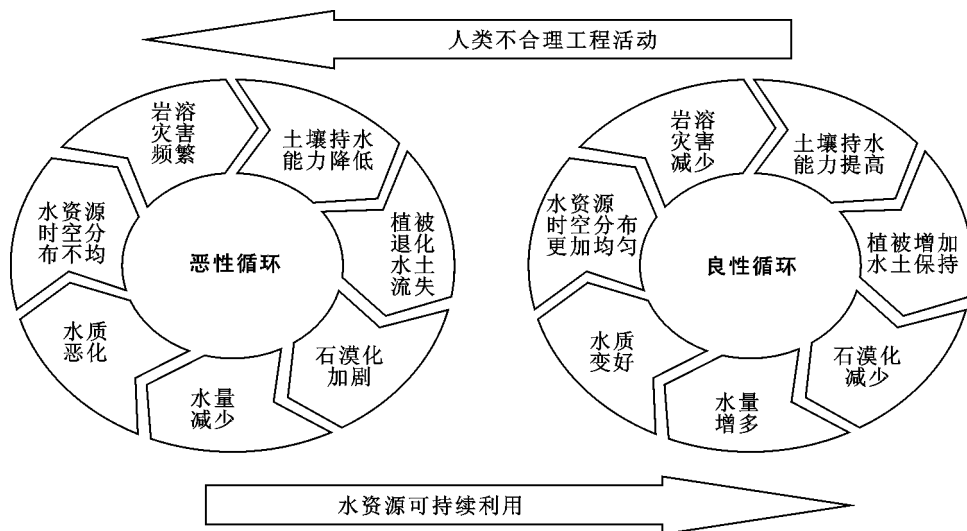


图 2 水资源与生态环境耦合关系图

2 评价指标的选取

2.1 评价指标选取原则

从上述理论出发, 明确了流域水资源可持续利用评价指标体系不仅要体现该流域水资源本身特征, 开

发、利用、管理状况即水资源系统的发展水平, 还要展示水资源系统同社会系统、经济系统、环境系统的协调发展水平^[6]。基于这种思想, 在选择指标构建指标体系时, 必须遵循以下原则^[7-9]。

(1) 客观科学性。能够较客观地反映水资源复

合系统内部结构关系,并能较科学地度量水资源可持续开发利用目标实现的程度。

(2) 全面概括性。在全面反映水资源可持续利用特性的前提下,使指标体系能反映出简明、全面、深刻的特点。

(3) 系统层次性。要求建立的指标体系层次分明,系统化和条理化,将复杂的问题用简洁明朗的、层次感较强的指标体系表达出来。

(4) 可操作性。在实际调查评价中,指标数据易于通过统计数据整理、抽样调查,或典型调查,或直接从有关部门(科研部门和技术部门)获得。

2.2 指标体系层次结构

根据水资源可持续利用的量度需求,结合上述原则,将水资源可持续利用指标体系分成 3 个层次,分别为目标层、准则层和指标层。目标层为单一目标,有 3 个准则,具体指标有若干,其构成见图 3。

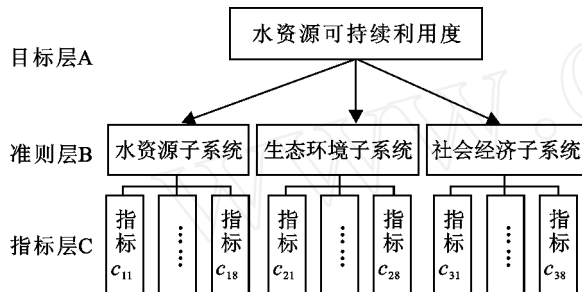


图3 水资源可持续利用度评价层次构成

2.2.1 目标层 水资源可持续利用度反映西南典型岩溶地区水资源复合系统发展水平,即水资源与社会经济、生态环境协调发展的状况。

2.2.2 准则层 影响水资源可持续利用的因素,可以概括为 3 个大的方面:水资源子系统(B_1)、生态环境子系统(B_2)、社会经济子系统(B_3)。其中水资源子系统由水源、供水和用水等组成,反应水资源自身发展水平。生态环境子系统反映的是脆弱生态约束下,岩溶水资源与生态环境耦合发展关系。社会经济子系统指的是人类与周围的环境以及产业结构和经济效益与水资源的协调关系。

2.2.3 指标层 本文采用频率统计法、理论分析法和专家咨询法设置、筛选指标,以满足上述指标选取原则,具体流程如图 4 所示。

(1) 频率统计法。结合上述评价指标选取原则,对目前国内外有关与水相关的可持续发展评价研究的报告、论文进行频度统计,选择那些使用频率较高的指标,如多年平均降雨量、人均水资源量等。

(2) 理论分析法。结合对岩溶水资源和生态环

境系统的耦合分析,筛选上述初步确定的评价指标,并设置具有岩溶地区代表性的指标,如石漠化、岩溶灾害发生率等。

(3) 专家咨询法。在上述已确定评价指标基础上,根据特尔菲法^[10],设置专家咨询表,征询相关专家意见,对指标进行调整,从而最终完成岩溶水资源可持续利用评价指标选取,共 24 个指标(见表 1)。

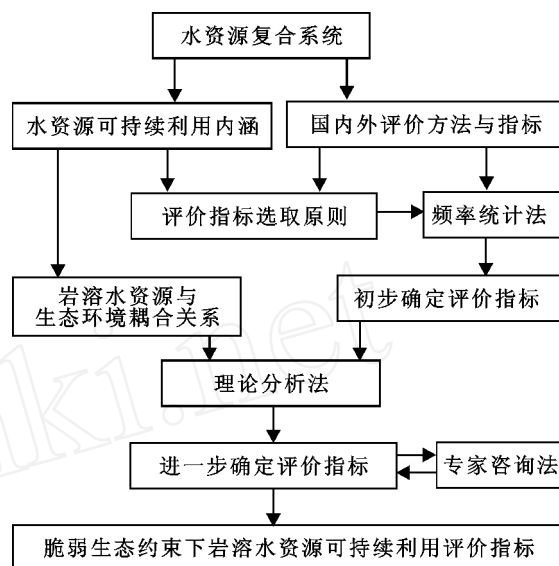


图4 西南岩溶地区水资源可持续利用评价指标选取流程

3 评价指标权重的确定

本文考察了用于确定权重的多种常用方法,如特尔菲法(Delphi)^[10]、均方差法^[11]、隶属频度法^[12]、层次分析法等^[13]。通过综合分析,本文选用专家咨询法和改进层次分析法相结合的方法作为确定指标权重的主要方法^[14]。

3.1 专家咨询法

结合所建立的评价指标层次结构(目标层、准则层和指标层),根据 A L Saaty 标度法(表 2)设置专家咨询表,并邀请专家填写,从而构造出判断矩阵 H ,表 3 为准则层 B 相对于目标层 A 的判断矩阵。

3.2 改进层次分析法

层次分析法中,对于非一致性判断矩阵,需要通过人为的估计来调整,往往带有片面性和主观性,并且要进行多次试算。为解决上述问题,利用最优传递矩阵的概念对 AHP 法进行改进,使之自然满足一致性要求,直接求出权重值,且不需要进行一致性检验^[15],以计算准则层 B 相对于目标层 A 权重为例。

设 $H = [h_{ij}]$, $K = [k_{ij}]$, $L = [l_{ij}]$, $H^* = [h_{ij}^*]$ $R^{n \times n}$

表 1 岩溶水资源可持续利用评价指标及权重

准则层	指标层	指标说明	指标权重
水资源子系统 (B ₁) 0.637 0	多年平均降雨量 C ₁₁ / mm	反映气候干旱和湿润程度	0.245 9
	人均水资源量 C ₁₂ / m ³	当地水资源总量/ 当地总人口	0.329 1
	供水模数 C ₁₃ / (10 ⁴ m ³ · km ⁻²)	当地可供水量/ 土地面积	0.134 6
	产水模数 C ₁₄ / (10 ⁴ m ³ · km ⁻²)	水资源总量/ 土地面积	0.075 3
	地下水开发利用率 C ₁₅ / %	地下水供水量/ 地下水可供水量	0.075 3
	表层带水开发利用程度 C ₁₆ / %	表层带取水工程/ 总取水工程	0.075 3
	地表水水质等级 C ₁₇	反应地表水水质状况	0.045 9
	地下水水质等级 C ₁₈ / (mg · L ⁻¹)	反应地下水水质状况	0.018 6
生态环境子系统 (B ₂) 0.258 3	植被覆盖率 C ₂₁ / %	植被面积/ 土地面积	0.205 6
	水土流失率 C ₂₂ / %	水土流失面积/ 土地面积	0.205 6
	石漠化程度 C ₂₃ / (岩石裸露率 %)	石山裸露面积/ 土地面积	0.205 6
	余缺水量 C ₂₄ / 10 ⁴ m ³	可供水量 - 总需水量	0.181 0
	陡坡耕作面积比 C ₂₅ / %	15 以上耕作面积/ 总耕地面积	0.082 0
	岩溶灾害发生率 C ₂₆ / (次 · a ⁻¹)	岩溶灾害多年平均发生次数	0.046 3
	平均土壤田间持水量 C ₂₇ / mm	通过岩溶水模型求得	0.046 3
	平均坡度 C ₂₈ / (°)	流域内坡度平均值	0.027 6
社会经济子系统 (B ₃) 0.104 7	饮水困难程度 C ₃₁ / %	饮水困难人口/ 农村总人口	0.355 3
	单方供水投资 C ₃₂ / (10 ⁴ · m ⁻³)	供水工程投资/ 可供水量	0.112 2
	保灌面积比 C ₃₃ / %	保灌面积/ 总耕地面积	0.112 2
	水利科技人员拥有率 C ₃₄ (人/ 万人)		0.086 8
	人均年收入 C ₃₅ / 元		0.112 2
	人均耕地 C ₃₆ / hm ²		0.0672
	人均粮食 C ₃₇ / kg		0.067 2
	人口密度 C ₃₈ / (人 · km ⁻²)		0.086 8

表 2 判断矩阵标度值及其含义

标度	含 义
1	表示两因素一样重要
3	表示一个因素比另一因素稍微重要
5	表示一个因素比另一因素明显重要
7	表示一个因素比另一因素强烈重要
9	表示一个因素比另一因素绝对重要
2,4,6,8	上述判断的中间值
各数的倒数	因素 i 与 j 比较得判断 h_{ij} , 则因素 j 与 i 比较的判断为 $h_{ji} = 1/ h_{ij}$

表 3 A—B 判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	3	5
B ₂	1/3	1	3
B ₃	1/5	1/3	1

3.2.1 计算反对称传递矩阵 K

令 $K = \lg H$ ($k_{ij} = \lg h_{ij}$) , $\forall i, j$, H 为所求判断矩阵,求得

$$H = \begin{pmatrix} 0.000 & 0 & 0.477 & 1 & 0.699 & 0 \\ -0.477 & 1 & 0.000 & 0 & 0.477 & 1 \\ -0.699 & 0 & -0.477 & 1 & 0.000 & 0 \end{pmatrix}$$

3.2.2 计算 K 的最优传递阵 L

令 $l_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (k_{ik} - k_{jk})$, $\forall i, j$, 则 L 是 K 的最优

传递阵

$$L = \begin{pmatrix} 0.000 & 0 & 0.392 & 0 & 0.784 & 0 \\ -0.392 & 0 & 0.000 & 0 & 0.392 & 0 \\ -0.784 & 0 & -0.392 & 0 & 0.000 & 0 \end{pmatrix}$$

3.2.3 计算判断矩阵 H 的拟优一致阵 H^*

令 $H^* = 10^L$, 则 H^* 是 H 的拟优一致阵。

3.2.4 用方根法求 H^* 的特征向量 W

将 H^* 的元素按行相乘 $u_{ij} = \prod_{j=1}^n h_{ij}$, 对乘积分别开 n 次方 $u_i = \sqrt[n]{u_{ij}}$ 。并将方根向量正规化, 即得特征向量 W, $W_i = u_i / \sum_{i=1}^n u_{ij}$, 特征向量 W 的各元素值 W_i 即为判断矩阵对应元素相对于其上一层因素的重要性次序的权重值。

$$W_{A-B} (2.466 \ 0, 0.999 \ 9, 0.405 \ 5)^T$$

归一化得

$$W_{A-B} (0.637 \ 0, 0.258 \ 3, 0.104 \ 7)^T$$

特征向量的元素值即为相应的权重值(见表 1), 不需要进行一致性检验。

3.3 指标权重分析

由图 5 可以看出, 水资源子系统中指标 C_{31} (饮水困难程度) 和社会经济子系统中指标 C_{12} (人均水资源量) 权重值都在 0.3 以上, 饮水困难程度(饮水困难人口/农村总人口), 反映的是岩溶山区农村最基本的用水保证程度, 而人均水资源量(当地水资源总量/当地总人口)是直接判断缺水程度的指标, 是衡量水资源可持续利用程度的重要指标。对于生态环境子系统, C_{21} (植被覆盖率)、 C_{22} (水土流失率) 和 C_{23} (石漠化程度) 3 个指标权重较高。植被覆盖率反映岩溶地区水资源与生态环境耦合的正面效应程度; 水土流失率反映岩溶地区水资源与生态环境耦合的负面效应程度; 石漠化程度是体现岩溶地区生态环境状况的特有指标。

由图 6 可以看出, 对于准则层 B_1 (水资源子系统) 的权重明显大于 B_2 和 B_3 , 在 0.6 以上, 表明岩溶水资源本身的属性是衡量岩溶水资源可持续利用程度的最重要方面, 其次是生态环境子系统, 这与西南岩溶地区脆弱的生态环境相对应。在 24 个评价指标中, 相对于目标层 A 的权重值分布较为均匀, 惟有指标 C_{11} (多年平均降雨量) 和 C_{12} (人均水资源量) 较为突出, 原因是: 西南岩溶地区, 年降雨量 C_{11} 和产水模数 C_{14} 处于较优水平, 但人均水资源量 C_{12} 和供水模数 C_{13} 处于较差水平, 造成该现象的重要因素是该区特有的“工程性”缺水突出所致。

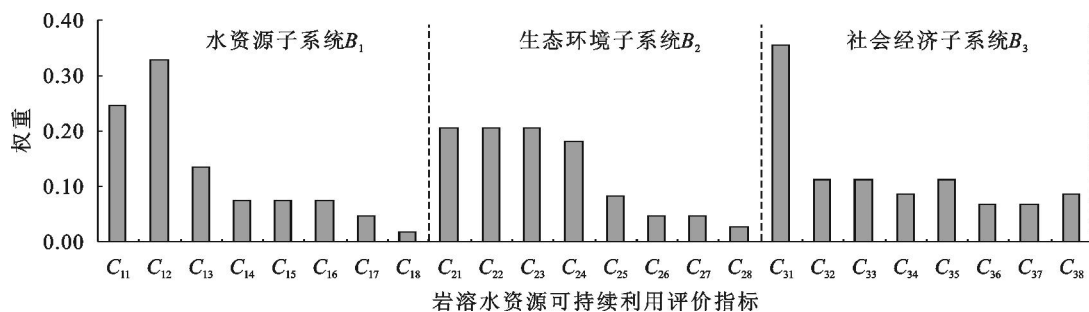


图 5 指标层相对各自准则层 B 的权重值

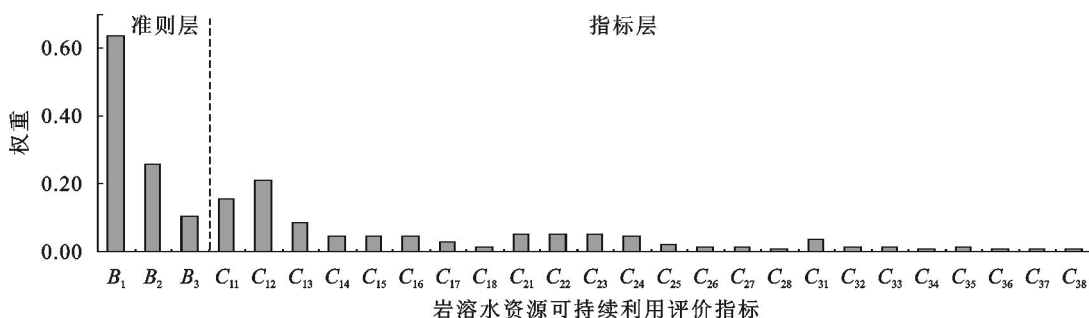


图 6 准则层和指标层相对目标层 A 的权重值

4 结论

西南地区岩溶水资源与脆弱的生态环境之间相互抑制,产生恶性循环,水资源可持续利用是变恶性循环为良性循环的有效措施。通过频率统计法、理论分析法和专家咨询法提取、筛选指标,使得指标配置更加合理;通过专家咨询法和改进层次分析法相结合的方法确定指标权重,大大减少了主观性偏差。

对各指标权重值进行分析发现,水资源本身属性是衡量岩溶水资源可持续利用程度的最重要方面,其次是脆弱的生态环境对水资源可持续利用的影响。总之,在确定指标及权重的基础上,选择适当的指标评价方法进行评价,发现问题,提出对策,进而指导水资源开发利用实践,促进生态环境、社会经济可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] Yuan Daoxian. Rocky desertification in the Subtropical Karst of South China [J]. Z. Geomorph. N. F., 1997, 108:81—90.
- [2] 苏维词. 西南岩溶山区生态系统基本特征及其调控措施研究:以贵州省为例[J]. 水土保持通报, 2004, 24(2): 55—59.
- [3] 李春晖, 杨志峰. 水资源评价进展与存在的几个问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 189—192.
- [4] 姜文来, 唐曲, 雷波, 等. 水资源管理学导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 卞建民, 张芳. 投影寻踪技术在松嫩平原西部水资源可持续利用中的应用[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 93—96.
- [6] 黄初龙, 章光新, 杨建锋. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究进展[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 33—40.
- [7] 程翠云, 阎伍玖. 安徽区域水资源可持续利用评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 154—158.
- [8] 李湘蛟, 王先甲. 区域水资源利用复合系统评价指标体系及方法[J]. 人民长江, 2005, 36(8): 21—23.
- [9] 刘恒, 耿雷华, 陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 265—270.
- [10] 王军强, 陈存根, 李同升. 陕西黄土高原小流域治理效益评价与模式选择[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 61—64.
- [11] 张先起, 刘慧卿, 梁川. 基于均方差的模糊物元法在黄河流域节灌工程项目决策中的应用[J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 71—73, 86.
- [12] 胡波, 崔保山, 杨志峰, 等. 澜沧江(云南段)河道生态需水量计算[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 163—173.
- [13] 王为人, 屠梅曾. 基于层次分析法的流域水资源配置权重测算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1133—1136.
- [14] 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: 64—84.