

文章编号:0559-9350(2008)04-0401-09

## 基于联系数的流域水安全评价模型

金菊良<sup>1</sup>, 吴开亚<sup>2</sup>, 魏一鸣<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 复旦大学 公共管理与公共政策创新基地, 上海 200433;  
3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080)

**摘要:**建立了流域水安全评价指标体系和评价标准,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定各指标和子系统的权重,用集对分析方法建立了基于联系数的流域水安全评价模型(CN-AM)。CN-AM可从指标、子系统和样本3个层次定量地分析流域水安全的复杂状态,既可测度流域水安全整体状态的高低程度,又可识别影响流域水安全状态的重要指标和重要子系统。CN-AM在巢湖流域中的应用结果表明,基于联系数的均分原则评判方法与属性数学的置信度准则评判方法具有一致性和互补性,联合应用可保障CN-AM评价结果的可靠性。巢湖流域水安全系统处于临界安全状态,应提升流域的经济和科技发展水平、推广节水技术、加快城市化进程和控制人口增长,以提高该流域水安全的保障程度。

**关键词:**流域水安全管理;水安全评价;评价指标体系;集对分析;联系数;模糊层次分析法;巢湖流域  
**中图分类号:**TV87 **文献标识码:**A

## 1 研究背景

流域水安全问题主要包括因水资源短缺而产生的水资源安全问题<sup>[1]</sup>、因水环境恶化而产生的水环境安全问题<sup>[2]</sup>和因水旱灾害而产生的水灾害防治安全问题<sup>[3]</sup>,它已成为自然资源可持续开发利用中最重要的问题<sup>[4,5]</sup>。流域水安全评价,就是在特定的自然和技术条件、经济和社会发展水平下,在流域水量、水质及其时空分布与人的合理需求之间的平衡分析及其影响因子综合分析的基础上,建立相应的评价指标体系及其评价标准,采用流域不同时期评价指标样本值和评价模型,对研究期内流域水安全系统能够持续支撑经济社会可持续发展规模,维系良好生态环境条件并使系统处于健康发展状况在总体上的差异性进行分类和排序<sup>[6,7]</sup>,为监控和优化管理流域水资源持续利用状况提供重要依据<sup>[1,2,8]</sup>。受自然演化和人类活动的双重影响,流域水安全评价系统是一典型的复杂系统<sup>[9]</sup>。目前的流域水安全评价研究处于定性分析阶段,尚缺乏可操作的定量方法,其中的关键问题<sup>[1,2,6,10]</sup>,一是如何合理确定流域水安全评价指标体系及其评价等级标准,二是在随机、模糊等不确定性环境下如何合理建立有效的定量评价模型。为此,本文在理论分析、频度统计、专家咨询和调研基础上初步建立了流域水安全评价指标体系,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法(Accelerating Genetic Algorithm based Fuzzy Analytic Hierarchy Process,AGA-FAHP)<sup>[11]</sup>筛选指标、确定流域水安全评价系统中各指标、各子系统的权重,提出用集对分析方法(Set Pair Analysis method,SPA)<sup>[12,13]</sup>构造各评价样本与评价标准等级之间联系数分量的新方法,进而用指标、子系统和样本3个层次的联系数<sup>[12,14,15]</sup>定量表达流域水安全的评价结果,建立了基于联系数的流域水安全评价模型(Connection Number based Assessment Model for watershed water security,CN-AM),并在巢湖流域开展水安全评价的实证研究。

收稿日期:2007-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(50579009,70733005);教育部优秀青年教师资助计划项目(教人司[2002]350)

作者简介:金菊良(1966-),男,江苏吴江人,博士,教授,从事水资源系统工程研究。E-mail:jnj166@126.com

## 2 CN - AM 的建立

建立 CN - AM 过程包括如下 7 个步骤。

(1) 根据流域水安全评价的内涵和目标,采用系统性、导向性和实用性原则,按照与水有关的水风险问题类型将流域水安全评价系统分为水资源安全、水环境安全、水灾害防治安全和社会经济安全 4 个子系统。在理论分析、文献统计、专家咨询和流域调研基础上<sup>[10]</sup>,根据流域水量、水质及其时空分布与人的合理需求之间的平衡分析及其影响因子的综合分析,将流域水安全评价系统各子系统细分为若干评价指标,各评价指标一般设计为两个累积量的比值,以适用于一般流域<sup>[11]</sup>。由此建立的流域水安全评价指标体系可表示为  $\{x_{jk} | j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j\}$ 。其中,  $m$  为流域水安全评价系统的子系统数目(这里取 4),  $n_j$  为子系统  $j$  的评价指标数目。

(2) 用 AGA - FAHP<sup>[11]</sup> 筛选流域水安全评价指标体系  $\{x_{jk} | j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j\}$ 。请有关专家对流域水安全评价各子系统中两两指标间的评价重要性作比较,建立模糊互补判断矩阵  $P = (p_{kl})$ ,要求满足:  $0 < p_{kl} < 1, p_{kl} + p_{lk} = 1 (k, l = 1, 2, \dots, n_j)$ 。其中  $p_{kl}$  表示指标  $k$  优于指标  $l$  的程度:当  $p_{kl} > 0.5$  时表示专家认为指标  $k$  比指标  $l$  重要,且  $p_{kl}$  越大表示指标  $k$  比指标  $l$  越重要;反之亦然。若  $P$  不具有满意的一致性,则需要修正。设  $P$  的修正判断矩阵为  $Q = (q_{kl})$ ,  $Q$  的各指标权重仍记为  $\{w_{jk} | j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j\}$ ,则称使式(1)最小的  $Q$  为  $P$  的最优模糊一致性判断矩阵<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} \min CIC(n_j) &= \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} |q_{kl} - p_{kl}| / n_j^2 + \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} |0.5(n_j - 1)(w_{jk} - w_{jl}) + 0.5 - q_{kl}| / n_j^2 \\ \text{s. t. } &1 - q_{lk} = q_{kl} \quad [p_{kl} - d, p_{kl} + d] \quad [0, 1] (k = 1, 2, \dots, n_j - 1; l = k + 1, \dots, n_j), \\ &q_{kk} = 0.5 (k = 1, 2, \dots, n_j) \\ &w_{jk} > 0 (k = 1, 2, \dots, n_j), \quad \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $CIC(n_j)$  称为一致性指标系数(Consistency Index Coefficient);  $d$  为非负参数,根据笔者的经验可从  $[0, 0.5]$  内选取;其余符号同前。

式(1)中权重  $w_{jk} (k = 1, 2, \dots, n_j)$  和修正判断矩阵  $Q = (q_{kl})$  的上三角元素为优化变量,对子系统  $j$  的  $n_j$  阶模糊互补判断矩阵  $P$  共有  $n_j(n_j + 1)/2$  个独立的优化变量。模拟生物优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换机制的加速遗传算法(AGA),是一种通用的全局优化方法<sup>[7]</sup>,用它来求解式(1)所示的问题较为简便和有效。当  $CIC(n_j)$  小于某一临界值时,可认为  $P$  具有满意的一致性,据此计算的各要素的排序权值  $w_{jk}$  是可以接受的;否则就需要提高参数  $d$  或修改原判断矩阵  $P$ ,直到具有满意的一致性为止<sup>[11]</sup>。

为提高指标筛选的可靠性,可请  $N_e$  位专家独立地建立  $N_e$  个模糊互补判断矩阵  $P$ ,用 AGA-FAHP 解得  $N_e$  组评价指标的权重  $\{w_{jkl} | j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j; l = 1, 2, \dots, N_e\}$ ,选取评价指标的权重的均值

$$\bar{w}_{jk} = \sum_{l=1}^{N_e} w_{jkl} / N_e \quad (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n_j) \quad (2)$$

最大、标准差相对较小的  $N_j$  个指标,组成最终的流域水安全评价指标体系  $\{x_{jk} | j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j\}$ 。

(3) 根据评价指标体系的物理含义及其对流域经济、社会、资源与环境可持续性的作用等方面,建立流域水安全评价等级标准  $\{s_{gjk} | g = 1, 2, \dots, G; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j\}$ ,对应的评价指标样本数据集记为  $\{x_{ijk} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j\}$ 。其中  $n, m, N_j$  和  $G$  分别为评价样本(水安全系统的总体状态)数目、水安全评价系统的子系统数目、子系统  $j$  的评价指标数目和评价等级标准的等

级数目。为了简便又不失一般性,本文约定流域水安全评价标准等级中,1级为“非常安全”,G级为“不安全”,余类推。

(4)用SPA构造样本*i*子系统*j*指标*k*的样本值 $x_{ijk}$ 与水安全评价标准之间的单指标联系数 $u_{ijk}$ 。其中*i* = 1, 2, ..., *n*; *j* = 1, 2, ..., *m*; *k* = 1, 2, ...,  $N_j$ 。SPA的基本思想是在给定问题背景情况下对所论的两个集合 $\{x_{ijk} | k = 1, 2, \dots, N_j\}$ 和 $\{s_{gjk} | g = 1, 2, \dots, G; k = 1, 2, \dots, N_j\}$ 的接近属性<sup>[16]</sup>进行同、异、反三方面的定量比较分析,用式(3)计算G元联系数<sup>[12,14,15]</sup>

$$u_{ijk} = v_{ijk1} + v_{ijk2} I_1 + v_{ijk3} I_2 + \dots + v_{ijk(G-1)} I_{G-2} + v_{ijkG} J \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j)$$

式中: $v_{ijk}$ 是样本值 $x_{ijk}$ 与水安全评价标准等级*g*之间单指标联系数 $u_{ijk}$ 的联系数分量,均为非负值且满足

$\sum_{g=1}^G v_{ijk} = 1$ , 其中 $v_{ijk1}$ 和 $v_{ijkG}$ 分别称为同一度分量和对立度分量,其余分量称为差异度分量; $I_1, I_2, \dots, I_{G-2}$ 为指标样本值与2级到(*G* - 1)级评价标准的差异度系数,*J*为对立度系数,这些系数可按“均分原则”<sup>[14,15]</sup>在 $[-1, 1]$ 中取值。

在具体计算单指标联系数分量 $v_{ijk}$ 时,可将样本值 $x_{ijk}$ 与水安全评价标准等级*g*作为两个集合,它们构成一个集对,就它们的接近属性作同、异、反的定量分析<sup>[12,13]</sup>:若它们处于同一等级中则该集对的联系数 $u_{ijk} = 1$ ;若它们处于相隔的等级中则 $u_{ijk} = -1$ ;若它们处于相邻的等级中则 $u_{ijk} \in [-1, 1]$ , $x_{ijk}$ 越接近于等级*g*则 $u_{ijk} = 1$ , $x_{ijk}$ 越接近于与等级*g*相隔的等级则 $u_{ijk} = -1$ 。

可见联系数 $u_{ijk}$ 就是可变模糊集“标准等级*g*”的一种相对差异度<sup>[8]</sup>,样本值 $x_{ijk}$ 隶属于模糊集“标准等级*g*”的相对隶属度可表示为

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5 u_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j; g = 1, 2, \dots, G) \quad (4)$$

对式(4)进行归一化处理,可得单指标联系数分量 $v_{ijk}$ :

$$v_{ijk} = v_{ijk}^* / \sum_{g=1}^G v_{ijk}^* \quad (5)$$

为进一步论述单指标联系数 $u_{ijk}$ 的计算过程,不失一般性,现假设取*G* = 5个评价标准等级的情形(*g* = 1 ~ 5级水安全评价等级分别记为“非常安全”、“较安全”、“临界安全”、“较不安全”和“不安全”)进行论述。评价指标 $x_{ijk}$ 随着评价标准等级*g*的增大而增大(减小)的指标,称为正向(反向)指标。则样本值 $x_{ijk}$ 与水安全评价标准等级*g*间的联系数 $u_{ijk}$ 的具体计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$u_{ijk1} = \begin{cases} 1, \text{正向指标 } x_{ijk} < s_{1jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} > s_{1jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{1jk}) / (s_{2jk} - s_{1jk}), \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} < s_{2jk}, \text{或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} > s_{2jk} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{2jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} < s_{2jk} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{ijk2} = \begin{cases} 1, \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} < s_{2jk}, \text{或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} > s_{2jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{2jk}) / (s_{3jk} - s_{2jk}), \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} < s_{3jk}, \text{或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} > s_{3jk} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{3jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} < s_{3jk} \end{cases} \quad (7)$$

$$u_{ijk3} = \begin{cases} -1, \text{正向指标 } x_{ijk} < s_{1jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} > s_{1jk} \\ 1 - 2(s_{2jk} - x_{ijk}) / (s_{2jk} - s_{1jk}), \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} < s_{2jk}, \text{或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} > s_{2jk} \\ 1, \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} < s_{3jk}, \text{或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} > s_{3jk} \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{ijk4} = \begin{cases} -1, \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{4jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} < s_{4jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{3jk}) / (s_{4jk} - s_{3jk}), \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} < s_{4jk}, \text{或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} > s_{4jk} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{4jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} < s_{4jk} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ijk} < s_{2jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} > s_{2jk} \\ 1 - 2(s_{3jk} - x_{ijk}) / (s_{3jk} - s_{2jk}), \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} < s_{3jk}, \text{或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} > s_{3jk} \\ 1, \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} < s_{4jk}, \text{或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} > s_{4jk} \\ 1 - 2(s_{ijk} - s_{4jk}) / (s_{5jk} - s_{4jk}), \text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} < s_{5jk}, \text{或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} > s_{5jk} \end{cases} \quad (9)$$

$$u_{ijk5} = \begin{cases} -1, \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{3jk}, \text{或反向指标 } x_{ijk} < s_{3jk} \\ 1 - 2(x_{4jk} - x_{ijk}) / (s_{4jk} - s_{3jk}), \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} < s_{4jk}, \text{或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} > s_{4jk} \\ 1, \text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} < s_{5jk}, \text{或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} > s_{5jk} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $s_{1jk} \sim s_{5jk}$  分别为 1~5 级评价标准等级的限值,  $s_{0jk}$  为各指标 1 级评价标准等级的另一端点值;  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, N_j$ 。式(6)~式(10)这种“紧凑梯形式”的函数结构充分利用了作为点值信息的样本值  $x_{ijk}$  与作为区间值信息的评价标准等级  $g$  之间的同、异、反三方面的定量信息<sup>[13]</sup>。根据式(4)和式(5),即可由  $u_{ijk5}$  计算单指标联系数分量  $v_{ijk}$ ,再经式(3)可计算  $u_{ij}$ 。在系统综合评价中,由于各评价标准等级一般是以区间形式表示的,  $s_{1jk} \sim s_{Gjk}$  分别只是 1~G 级评价标准等级的限值,直接根据样本值  $x_{ijk}$  与限值  $s_{gjk}$  的大小关系构造属性数学的单指标属性测度<sup>[16]</sup>、并把该测度作为单指标联系数分量  $v_{ijk}$  的计算方法存在明显的局限性,容易产生与实际情况存在明显偏差的评价结果<sup>[15]</sup>。

(5)由式(3)可得样本  $i$  子系统  $j$  与水安全评价标准之间的子系统联系数  $u_{ij}$ :

$$u_{ij} = v_{ij1} + v_{ij2} I_1 + v_{ij3} I_2 + \dots + v_{ij(G-1)} I_{G-2} + v_{ijG} J \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

其中:

$$v_{ijg} = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk} v_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; g = 1, 2, \dots, G) \quad (12)$$

式中:  $w_{jk}$  为用 AGA-FAHP 求得的子系统  $j$  指标  $k$  的权重,满足  $\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk} = 1; \sum_{g=1}^G v_{ijg} = 1$ 。

(6)由式(11)可得样本  $i$  与水安全评价标准之间的样本联系数  $u_i$ :

$$u_i = v_{i1} + v_{i2} I_1 + v_{i3} I_2 + \dots + v_{i(G-1)} I_{G-2} + v_{iG} J \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

其中

$$v_{ig} = \sum_{j=1}^m w_j v_{ijg} \quad (i = 1, 2, \dots, n; g = 1, 2, \dots, G) \quad (14)$$

式中:  $w_j$  为用 AGA-FAHP 求得的子系统  $j$  的权重,满足  $\sum_{j=1}^m w_j = 1; \sum_{g=1}^G v_{ig} = 1$ 。

(7)水安全等级评判。由于联系数在区间  $[-1, 1]$  取值,可根据“均分原则”<sup>[14,15]</sup>,先将区间  $[-1, 1]$  进行  $(G-1)$  等分,把从左至右  $(G-1)$  个分点值分别作为  $J, I_{G-2}, I_{G-3}, \dots, I_2, I_1$  的取值,把这些取值分别代入式(3)、式(11)和式(13),可分别得到指标、子系统和样本 3 个层次的联系数值;再根据“均分原则”<sup>[14,15]</sup>,将区间  $[-1, 1]$  进行  $G$  等分,得到的从左至右 5 个子区间  $[-1, -0.6]$ 、 $[-0.6, -0.2]$ 、 $[-0.2, 0.2]$ 、 $[0.2, 0.6]$  和  $[0.6, 1.0]$  分别对应评价标准等级  $G, \dots, 2, 1$ ,将求得的指标、子系统和样本 3 个层次的联系数值与这些子区间进行比较,可分别得到指标、子系统和样本 3 个层次的流域水安全评价等级值,进而可对不同时期流域及其各子区域的水安全总体状况进行排序。为了与上述基于联系数的均分原则评判方法的计算结果进行分析比较,进一步提高评判结果的可靠性,可同时采用属性数学的置信度准则评判方法<sup>[16]</sup>推断指标、子系统和样本 3 个层次的流域水安全评价等级。例如,样本  $i$  子系统  $j$  的水安全评价等级值为

$$h_{ij} = \min_g \left\{ g^* \mid \sum_{g=1}^{g^*} v_{ijg} > \right\} \quad (15)$$

样本  $i$  的水安全评价等级值为

$$h_i = \min_g \left\{ g^* \mid \sum_{g=1}^{g^*} v_{ig} > \right\} \quad (16)$$

式中: 为置信度,一般在  $[0.50, 0.70]$  内取值,越大则评价结果越倾向于保守、稳妥<sup>[16]</sup>。

### 3 CN - AM 在巢湖流域水安全评价中的应用

根据指标选择的系统性、独立性、可比性、客观性和实用性原则,考虑到巢湖流域的具体情况和资料收集的可行性,在参考其他流域水安全评价指标体系案例基础上<sup>[1,2,10]</sup>,初步确立的巢湖流域水安全评价指标体系包括4个子系统。其中:水资源安全子系统包括指标  $C_{1,1}$ “水资源利用率”、 $C_{1,2}$ “湖泊面积率”、 $C_{1,3}$ “人均水资源量”、 $C_{1,4}$ “单位面积水资源量”、 $C_{1,5}$ “人均日生活用水量”、 $C_{1,6}$ “万元工业产值耗水量”、 $C_{1,7}$ “工业用水重复利用率”、 $C_{1,8}$ “万元农业产值用水量”、 $C_{1,9}$ “农业灌溉面积率”、 $C_{1,10}$ “灌溉水综合利用系数”和  $C_{1,11}$ “灌溉面积占播种面积比例”;水环境安全子系统包括指标  $C_{2,1}$ “森林覆盖率”、 $C_{2,2}$ “土壤侵蚀模数”、 $C_{2,3}$ “水土流失面积比例”、 $C_{2,4}$ “水土流失治理率”、 $C_{2,5}$ “工业废水处理率”、 $C_{2,6}$ “万元产值污水排放量”、 $C_{2,7}$ “人均生活污水排放量”、 $C_{2,8}$ “生活污水处理率”、 $C_{2,9}$ “单位面积化肥施用量”、 $C_{2,10}$ “单位面积农药施用量”、 $C_{2,11}$ “工业  $SO_2$  排放密度”、 $C_{2,12}$ “工业废水排放密度”、 $C_{2,13}$ “生态环境用水率”、 $C_{2,14}$ “水域面积率”和  $G_{2,15}$ “环保投资占 GDP 比例”;水灾害防治安全子系统包括指标  $C_{3,1}$ “洪水受灾面积率”、 $C_{3,2}$ “洪水人口受灾率”、 $C_{3,3}$ “洪灾频率”、 $G_{3,4}$ “洪涝损失占 GDP 比例”、 $C_{3,5}$ “干旱受灾面积率”、 $C_{3,6}$ “干旱人口受灾率”、 $C_{3,7}$ “干旱频率”、 $C_{3,8}$ “干旱指数”、 $C_{3,9}$ “干旱损失占 GDP 比例”、 $C_{3,10}$ “堤防保护耕地面积率”、 $C_{3,11}$ “单位面积蓄水工程总库容”、 $C_{3,12}$ “防洪抗旱信息化程度”和  $C_{3,13}$ “水利工程投资占 GDP 比例”;社会经济安全子系统包括指标  $C_{4,1}$ “区域开发指数”、 $C_{4,2}$ “城市化程度”、 $C_{4,3}$ “人口密度”、 $C_{4,4}$ “经济密度”、 $C_{4,5}$ “人均 GDP”、 $C_{4,6}$ “人均耕地”、 $C_{4,7}$ “人均粮食产量”、 $C_{4,8}$ “饮用卫生水达标人口率”、 $C_{4,9}$ “家庭水费支出占家庭可支配收入的比例”、 $C_{4,10}$ “科技教育投入占 GDP 比例”、 $C_{4,11}$ “水利科技人员占科技人员比例”、 $C_{4,12}$ “水资源相关法律法规体系健全程度”、 $C_{4,13}$ “公众节水意识普及率”和  $C_{4,14}$ “农村文盲半文盲比例”。

笔者邀请6位专家对上述指标体系就两两指标间的评价重要性作比较,建立了模糊互补判断矩阵,用AGA-FAHP计算这些矩阵的指标权重,各矩阵的一致性指标系数值均小于0.2,故具有满意的一致性,据此计算的各指标权重是可以接受的<sup>[11]</sup>,这些指标的权重的均值、标准差及其比值如表1所示。同理,用AGA-FAHP解得4个子系统的权重均为0.25。

表1说明,各指标权重的标准差与均值的比值大多比较小,说明这些专家的意见相对集中。故分别取这4个子系统中指标权重均值最大的8个指标、10个指标、9个指标和8个指标,组成最终的巢湖流域水安全评价指标体系,根据这些指标的物理含义及其对流域经济、社会、资源与环境可持续发展的作用<sup>[17,18]</sup>,按照国际上水安全指标临界值的研究成果和其他流域水安全评价标准<sup>[1,2,10]</sup>,地方政府颁布的标准和规划区目标、河流水系保护要求,以及流域内各子区域水安全指标的最大值、最小值和均值等,建立了巢湖流域水安全评价等级标准,如表2所示(按筛选后的指标体系对指标序号重新编号)。

表1 用AGA-FAHP筛选巢湖流域水安全评价指标体系的计算结果

子系统 $j$	权重的特征值	评价指标序号 $k$														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
水资源安全 子系统	均值	0.133	0.060	0.117	0.084	0.074	0.101	0.084	0.094	0.070	0.097	0.086				
	标准差	0.024	0.042	0.046	0.038	0.049	0.023	0.035	0.028	0.029	0.029	0.022				
	标准差/均值	0.180	0.700	0.393	0.452	0.662	0.228	0.417	0.299	0.414	0.299	0.256				
水环境安全 子系统	均值	0.064	0.047	0.049	0.063	0.082	0.075	0.057	0.064	0.066	0.059	0.043	0.071	0.080	0.093	0.089
	标准差	0.027	0.023	0.025	0.027	0.017	0.031	0.024	0.028	0.022	0.032	0.025	0.040	0.029	0.013	0.015
	标准差/均值	0.418	0.484	0.509	0.431	0.212	0.419	0.430	0.439	0.336	0.540	0.587	0.564	0.365	0.140	0.167
水灾害防治 安全子系统	均值	0.074	0.102	0.064	0.102	0.063	0.092	0.060	0.060	0.099	0.048	0.063	0.066	0.105		
	标准差	0.020	0.037	0.021	0.025	0.019	0.031	0.019	0.027	0.022	0.013	0.016	0.024	0.021		
	标准差/均值	0.267	0.359	0.328	0.241	0.301	0.342	0.323	0.457	0.223	0.266	0.246	0.363	0.202		
社会经济 安全子系统	均值	0.073	0.086	0.070	0.083	0.093	0.055	0.049	0.101	0.058	0.082	0.069	0.071	0.051	0.058	
	标准差	0.032	0.011	0.029	0.028	0.010	0.032	0.035	0.020	0.043	0.021	0.044	0.029	0.029	0.032	
	标准差/均值	0.438	0.128	0.414	0.337	0.108	0.582	0.714	0.198	0.741	0.256	0.638	0.408	0.569	0.552	

把巢湖流域的9个区域(即合肥、肥东、肥西、居巢、庐江、含山、无为、和县、舒城)和全流域评价年的评价指标样本值和表2数据代入式(6)~式(10),再由式(4)、式(5)和式(3)得各单指标联系数值,由式(12)和式(11)得各子系统联系数值,由式(14)和式(13)得各样本(9个区域和全流域评价年的水安全状态)联系数值,由CN-AM的步骤(7)得到相应的评价等级值,其计算结果如表3~表5所示,表中同时列出了置信度取0.50时用式(15)和式(16)评判各子系统和区域的水安全评价等级值。用式(16)评判该流域9个区域的水安全等级状况的空间分布见图1。

表3~表5说明:(1)基于式(11)和式(13)的均分原则方法的评价结果与基于式(15)和式(16)的属性数学的置信度准则方法的评价结果总体上相一致,两者在评判等级方面存在的差异(相差1级),不是发生在联系数方法根据“均分原则”进行等分的子区间的端点值附近、并与属性数学的置信度准则方法的评价结果相接近,就是发生在属性数学的置信度为50%附近、并与均分原则方法的评价结果相接近。这说明这两种基于联系数的水安全评价方法的计算结果具有一致性和互补性,联合应用可提高评价结果的可靠性。(2)水资源安全等级值从大到小依次为肥西(较不安全)、无为(介于较不安全与临界安全之间)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、肥东(介于较不安全与临界安全之间)、庐江(临界安全)、全流域(临界安全)、合肥(临界安全)、含山(临界安全)、居巢(临界安全)及和县(较安全)。

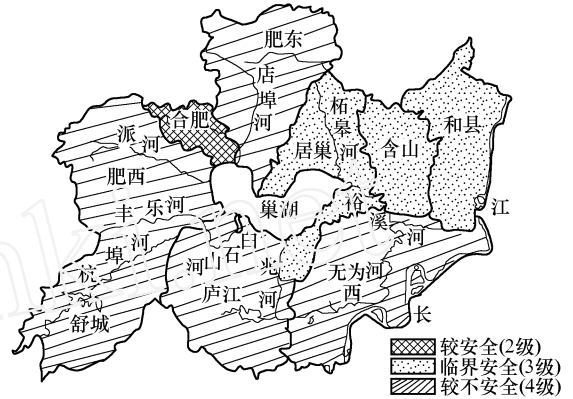


图1 巢湖流域水安全等级状况的空间分布

(3)水环境安全等级值从大到小依次为肥东(较不安全)、肥西(较不安全)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、无为(临界安全)、和县(临界安全)、合肥(临界安全)、含山(临界安全)、庐江(临界安全)、全流域(临界安全)和居巢(临界安全)。就全流域而言,单位面积化肥施用量和环保投资占GDP比例指标处于不安全状态,生活污水处理率和生态环境用水率指标处于较不安全状态,森林覆盖率和水土流失治理率指标处于临界安全状态,全流域总体上处于临界安全状态。(4)水灾害防治安全等级值从大到小依次为无为(介于较不安全与临界安全之间)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、肥东(临界安全)、庐江(临界安全)、肥西(临界安全)、全流域(临界安全)、和县(临界安全)、居巢(介于临界安全与较安全之间)、含山(较安全)和合肥(介于较安全与非常安全之间)。就全流域而言,洪水受灾面积率和洪水人口受灾率处于较不安全状态,洪涝损失占GDP比例接近临界安全状态,干旱灾害各指标均处于非常安全状态,单位面积蓄水工程总库容和防洪抗旱信息化程度处于临界安全状态,水利工程投资占GDP比例处于不安全状态,说明全流域洪水灾害比较严重,全流域总体上处于临界安全状态。因此,增加水利工程投资强度和蓄水工程总库容,提高防洪标准和防洪抗旱信息化程度,是提高该流域水灾害防治安全保障程度的重要措施。(5)社会经济安全等级值从大到小依次为肥东(较不安全)、舒城(较不安全)、和县(较不安全)、无为(较不安全)、庐江(较不安全)、肥西(较不安全)、含山(较不安全)、全流域(介于较不安全与临界安全之间)、居巢(临界安全)和合肥(介于临界安全与较安全之间)。就全流域而言,人口密度大、科技教育投入低、区域开发指数高、经济密度低、人均GDP和城市化程度低是导致全流域处于临界安全、接近于较不安全的重要原因。(6)总体水安全等级值从大到小依次为肥东(较不安全)、肥西(介于较不安全与临界安全之间)、无为(介于较不安全与临界安全之间)、舒城(介于较不安全与临界安全之间)、庐江(介于较不安全与临界安全之间)、全流域(临界安全)、和县(临界安全)、含山(临界安全)、居巢(临界安全)和合肥(介于临界安全与较安全之间)。就全流域而言,社会经济和水资源安全子系统的水安全保障能力低是导致全流域处于临界安全的重要原因。因此,进一步提高流域的经济和科技发展水

平,推广节水技术,加快城市化进程,控制人口增长,是提高该流域水安全保障程度的重要措施。

表 2 巢湖流域水安全评价指标体系及其评价等级标准

评价指标	水安全等级				
	5(不安全)	4(较不安全)	3(临界安全)	2(较安全)	1(非常安全)
C <sub>1.1</sub> 水资源利用率, %	> 60	40 ~ 60	25 ~ 40	10 ~ 25	< 10
C <sub>1.2</sub> 人均水资源量, m <sup>3</sup> /人	< 1 000	1 000 ~ 1 700	1 700 ~ 2 300	2 300 ~ 3 000	> 3 000
C <sub>1.3</sub> 单位面积水资源量, 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	< 30	30 ~ 75	75 ~ 150	150 ~ 300	> 300
C <sub>1.4</sub> 万元工业产值耗水量, m <sup>3</sup> /万元	> 1 000	600 ~ 1 000	400 ~ 600	200 ~ 400	< 200
C <sub>1.5</sub> 工业用水重复利用率, %	< 50	50 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	> 90
C <sub>1.6</sub> 万元农业产值用水量, m <sup>3</sup> /万元	> 2 000	1 500 ~ 2 000	1 000 ~ 1 500	500 ~ 1 000	< 500
C <sub>1.7</sub> 灌溉水综合利用率	< 0.15	0.15 ~ 0.25	0.25 ~ 0.40	0.40 ~ 0.50	> 0.50
C <sub>1.8</sub> 灌溉面积占播种面积比例, %	< 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	> 60
C <sub>2.1</sub> 森林覆盖率, %	< 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 30	> 30
C <sub>2.2</sub> 水土流失治理率, %	< 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	> 80
C <sub>2.3</sub> 工业废水处理率, %	< 45	45 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	> 80
C <sub>2.4</sub> 万元产值污水排放量, t/万元	> 55	40 ~ 55	25 ~ 40	10 ~ 25	< 10
C <sub>2.5</sub> 生活污水处理率, %	< 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	> 80
C <sub>2.6</sub> 单位面积化肥施用量, t/hm <sup>2</sup>	> 0.5	0.4 ~ 0.5	0.25 ~ 0.4	0.1 ~ 0.25	< 0.1
C <sub>2.7</sub> 工业废水排放密度, 10 <sup>4</sup> t/km <sup>2</sup>	> 4	3 ~ 4	2 ~ 3	1 ~ 2	< 1
C <sub>2.8</sub> 生态环境用水率, %	< 1	1 ~ 2.5	2.5 ~ 4	4 ~ 5.5	> 5.5
C <sub>2.9</sub> 水域面积率, %	< 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20
C <sub>2.10</sub> 环保投资占 GDP 比例, %	< 0.3	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	> 1.5
C <sub>3.1</sub> 洪水受灾面积率, %	> 8	6 ~ 8	4 ~ 6	2 ~ 4	< 2
C <sub>3.2</sub> 洪水人口受灾率, %	> 20	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5	< 2
C <sub>3.3</sub> 洪涝损失占 GDP 比例, %	> 5.5	4 ~ 5.5	2.5 ~ 4	1 ~ 2.5	< 1
C <sub>3.4</sub> 干旱受灾面积率, %	> 30	20 ~ 30	10 ~ 20	5 ~ 10	< 5
C <sub>3.5</sub> 干旱人口受灾率, %	> 20	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5	< 2
C <sub>3.6</sub> 干旱损失占 GDP 比例, %	> 5.5	4 ~ 5.5	2.5 ~ 4	1 ~ 2.5	< 1
C <sub>3.7</sub> 单位面积蓄水工程总库容, 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	< 10	20	30	40	> 40
C <sub>3.8</sub> 防洪抗旱信息化程度	低	较低	中等	较高	高
C <sub>3.9</sub> 水利工程投资占 GDP 比例, %	< 0.2	0.2 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	> 1.0
C <sub>4.1</sub> 区域开发指数, %	> 85	60 ~ 85	45 ~ 60	30 ~ 45	< 30
C <sub>4.2</sub> 城市化程度, %	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50	> 50
C <sub>4.3</sub> 人口密度, 人/km <sup>2</sup>	> 500	350 ~ 500	200 ~ 350	100 ~ 200	< 100
C <sub>4.4</sub> 经济密度, 万元/km <sup>2</sup>	< 100	100 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 600	> 600
C <sub>4.5</sub> 人均 GDP, 10 <sup>3</sup> 元	< 2	2 ~ 5	5 ~ 8	8 ~ 12	> 12
C <sub>4.6</sub> 饮用卫生水达标人口率, %	< 60	60 ~ 70	70 ~ 85	85 ~ 95	> 95
C <sub>4.7</sub> 科技教育投入占 GDP 比例, %	< 1	1 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 6	> 6
C <sub>4.8</sub> 水资源相关法律法规体系健全程度, %	低	较低	中等	较高	高

表 3 巢湖流域水资源安全和水环境安全子系统的 CN-AM 评价结果

区域	水资源安全子系统的联系数分量					联系数 (安全等级)	式(15) 安全等级	水环境安全子系统的联系数分量					联系数 (安全等级)	式(15) 安全等级
	1级	2级	3级	4级	5级			1级	2级	3级	4级	5级		
1 合肥	0.133	0.237	0.161	0.210	0.259	- 0.113(3)	3	0.181	0.191	0.138	0.254	0.235	- 0.085(3)	3
2 肥东	0.175	0.213	0.071	0.192	0.348	- 0.163(3)	4	0.135	0.149	0.070	0.229	0.417	- 0.322(4)	4
3 肥西	0.074	0.209	0.159	0.168	0.389	- 0.295(4)	4	0.178	0.169	0.073	0.158	0.423	- 0.240(4)	4
4 居巢	0.108	0.317	0.333	0.180	0.061	- 0.116(3)	3	0.258	0.202	0.134	0.226	0.180	- 0.065(3)	3
5 庐江	0.043	0.162	0.352	0.337	0.107	- 0.152(3)	3	0.242	0.165	0.122	0.167	0.303	- 0.062(3)	3
6 含山	0.078	0.299	0.310	0.193	0.120	- 0.012(3)	3	0.225	0.182	0.129	0.151	0.313	- 0.072(3)	3
7 无为	0.030	0.178	0.316	0.276	0.200	- 0.219(4)	3	0.198	0.133	0.176	0.198	0.295	- 0.129(3)	3
8 和县	0.248	0.298	0.207	0.156	0.091	- 0.227(2)	2	0.215	0.145	0.140	0.223	0.277	- 0.101(3)	3
9 舒城	0.135	0.114	0.223	0.342	0.186	- 0.165(3)	4	0.217	0.132	0.077	0.202	0.373	- 0.191(3)	4
10 全流域	0.100	0.198	0.236	0.298	0.168	- 0.119(3)	3	0.156	0.265	0.215	0.211	0.153	- 0.031(3)	3

表4 巢湖流域水灾害防治安全和社会经济安全子系统的 CN-AM 评价结果

区域	水灾害防治安全子系统的联系数分量					联系数 (安全等级)	式(15) 安全等级	社会经济安全子系统的联系数分量					联系数 (安全等级)	式(15) 安全等级
	1级	2级	3级	4级	5级			1级	2级	3级	4级	5级		
	1 合肥	0.666	0.093	0.045	0.073	0.123	0.553(2)	1	0.423	0.130	0.077	0.143	0.226	0.191(3)
2 肥东	0.220	0.159	0.160	0.264	0.197	-0.030(3)	3	0.000	0.097	0.252	0.403	0.248	-0.401(4)	4
3 肥西	0.218	0.169	0.234	0.262	0.117	0.055(3)	3	0.153	0.027	0.172	0.393	0.255	-0.285(4)	4
4 居巢	0.396	0.118	0.064	0.185	0.238	0.124(3)	2	0.153	0.215	0.291	0.252	0.090	0.044(3)	3
5 庐江	0.317	0.102	0.132	0.228	0.221	0.033(3)	3	0.153	0.027	0.148	0.396	0.275	-0.307(4)	4
6 含山	0.382	0.194	0.145	0.160	0.120	0.279(2)	2	0.153	0.031	0.231	0.392	0.193	-0.220(4)	4
7 无为	0.306	0.047	0.105	0.246	0.296	-0.089(3)	4	0.146	0.034	0.147	0.395	0.278	-0.313(4)	4
8 和县	0.304	0.126	0.204	0.216	0.149	0.110(3)	3	0.051	0.104	0.224	0.397	0.225	-0.321(4)	4
9 舒城	0.263	0.172	0.059	0.228	0.278	-0.042(3)	4	0.068	0.104	0.178	0.397	0.254	-0.333(4)	4
10 全流域	0.260	0.188	0.169	0.219	0.164	0.081(3)	3	0.088	0.131	0.281	0.357	0.142	-0.167(3)	4

表5 巢湖流域水安全系统各区域的 CN-AM 评价结果

区域	联系数分量					联系数 (安全等级)	式(16) 安全等级
	1级	2级	3级	4级	5级		
1 合肥	0.351	0.163	0.105	0.170	0.211	0.136(3)	2
2 肥东	0.132	0.154	0.138	0.272	0.303	-0.229(4)	4
3 肥西	0.156	0.144	0.160	0.245	0.296	-0.191(3)	4
4 居巢	0.229	0.213	0.205	0.211	0.142	0.087(3)	3
5 庐江	0.189	0.114	0.189	0.282	0.227	-0.122(3)	4
6 含山	0.210	0.176	0.204	0.224	0.186	0.000(3)	3
7 无为	0.170	0.098	0.186	0.279	0.267	-0.187(3)	4
8 和县	0.204	0.168	0.194	0.248	0.186	-0.021(3)	3
9 舒城	0.171	0.131	0.134	0.292	0.273	-0.183(3)	4
10 全流域	0.151	0.196	0.225	0.271	0.157	-0.043(3)	3

## 4 结论

(1) 为在随机、模糊等不确定性环境下评价流域水安全状态,在理论分析、专家咨询和流域调研基础上建立了流域水安全评价指标体系,用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定各指标和各子系统的权重,用集对分析方法计算单指标联系数、子系统联系数和样本联系数,可从指标、子系统和样本3个层次测度流域水安全状态,建立了基于联系数的流域水安全评价模型(CN-AM)。(2) 用 CN-AM 评价巢湖流域水安全状态的结果表明:基于联系数的均分原则评判方法与属性数学的置信度准则评判方法具有一致性和互补性,联合应用可提高 CN-AM 评价结果的可靠性;全流域社会经济安全子系统处于临界安全、接近于较不安全状态,水资源安全、水环境安全和水灾害防治安全这3个子系统均处于临界安全状态,全流域水安全系统处于临界安全状态;进一步提高流域的经济实力和科技发展水平,推广节水技术,加快城市化进程,控制人口增长,是提高流域水安全保障程度的重要措施。(3) CN-AM 综合利用了评价指标、子系统和样本与评价等级标准间联系数的丰富的结构信息和层次信息,便于从结构和层次的角度对流域水安全状态进行系统分析,既可用样本联系数整体测度流域水安全状态的高低程度、对多个区域的水安全程度进行排序,又可用指标联系数和子系统联系数识别影响水安全状态的重要指标和重要子系统。

## 参 考 文 献:

- [1] 畅明琦,黄强.水资源安全理论与方法[M].北京:中国水利水电出版社,2006.



- [ 2 ] 陈绍金. 水安全系统评价、预警与调控研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [ 3 ] 张海仑. 中国水旱灾害[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [ 4 ] Loucks D P. Sustainable water resources management[J]. *Water International*,2000,25(1):3 - 10.
- [ 5 ] 洪阳. 中国 21 世纪的水安全[J]. *环境保护*,1999,(10):29 - 31.
- [ 6 ] 金菊良,王文圣,洪天求,等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨[J]. *水利学报*,2006,37(8):918 - 925.
- [ 7 ] 金菊良,丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都:四川科学技术出版社,2002.
- [ 8 ] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社,2005.
- [ 9 ] 金菊良,魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [10] 宋松柏,蔡焕杰. 区域水资源可持续利用的 Bossel 指标体系及评价方法[J]. *水利学报*,2004,(6):68 - 74.
- [11] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. *水力发电学报*,2007,26(4):22 - 28.
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社,2000.
- [13] 李凡修,辛焰,陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J]. *重庆环境科学*,2000,22(6):10 - 11,16.
- [14] 汪新凡. 投资风险综合评价的联系数学模型[J]. *统计与决策*,2006,(10):19 - 20.
- [15] 汪新凡. 基于属性数学和联系数学的煤灰结渣特性综合评判模型及应用[J]. *锅炉技术*,2006,37(6):47 - 50.
- [16] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,1997,33(1):12 - 20.
- [17] 赵吴静,吴开亚,金菊良. 防洪工程安全评价集对分析——可变模糊集模型[J]. *水电能源科学*,2007,25(2):5 - 7,13.
- [18] 李景保,卢承志,梁成军. 湖南省水安全问题研究[J]. *水利学报*,2003,(7):52 - 57,63.

## Connection number based assessment model for watershed water security

JIN Ju-liang<sup>1</sup>, WU Kai-ya<sup>2</sup>, WEI Yi-ming<sup>3</sup>

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Fudan University, Shanghai 200433, China;

3. Institute of Policy & Management, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** On the basis of theoretical analysis, expert consultant and on-site investigation, an index system for assessing the water security of watershed under uncertain environment was established. The accelerating genetic algorithm based fuzzy analytic hierarchy process was used to screen the index system and to determine the weights of both indexes and subsystems of water security assessment system. The index connection numbers, subsystem connection numbers and sample connection numbers between assessed samples and evaluation grading standards were established by using set pair analysis method. Then, a connection number based quantitative assessment model for watershed water security, named connection number assessment model (CN-AM), was established. The application of this model to assess the water security of Chaohu Lake watershed shows that the joint application of judgment method based on principle of equally sharing connection coefficient with method according to confidence criterion of attribute mathematics in CN-AM can improve the reliability of the assessment result. The water security in Chaohu Lake watershed is in a critical security state, the economy, science and technology development level must be further heightened, the water saving technology must be popularized, the urbanization process must be accelerated and the population growth must be controlled in order to heighten the safeguard degree of the watershed water security.

**Key words:** management of watershed water security; assessment; index system; set pair analysis; connection number; fuzzy analytic hierarchy process; Chaohu Lake watershed

(责任编辑:王成丽)