

基于指标体系的流域水安全诊断评价模型*

吴开亚¹, 金菊良², 魏一鸣³, 张 浩⁴

(1. 复旦大学公共管理与公共政策创新基地, 上海 200433;

2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080;

4. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘 要: 为在随机、模糊、经验等不确定性环境下定量评价流域水安全系统的总体状况, 识别使流域水安全系统或其子系统处于不安全的主要指标, 在流域水安全的理论分析、专家咨询和调研基础上建立了流域水安全诊断评价指标体系和评价等级标准, 提出用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定水安全评价系统中各指标和子系统的权重, 用集对分析方法构造流域水安全评价指标样本值隶属于可变模糊集“水安全诊断评价标准等级”的相对隶属度函数, 建立了流域水安全诊断评价模型 (SPA-DAM)。SPA-DAM 在巢湖流域水安全诊断评价中的结果说明: 流域近 7a 来水安全等级值均处于临界安全附近, 虽存在缓慢改善的趋势, 但由于水资源安全和水灾害防治安全程度不高、波动性大, 水环境安全和社会经济安全程度不高、改善缓慢, 因此总体上该流域的水安全形势不容乐观; 合理调控水资源利用率、人均水资源量、单位面积化肥施用量、环保投资占 GDP 比例、单位面积蓄水工程总库容、水利工程投资占 GDP 比例、区域开发指数、人口密度和科技教育投入占 GDP 比例等关键指标, 是提高该流域水安全保障程度的重要措施。SPA-DAM 的评价结果可靠合理, 方法简便实用, 在已知等级评价标准的多层次系统诊断评价问题中具有一定的应用价值。

关键词: 流域水安全管理; 诊断评价; 指标体系; 集对分析; 模糊层次分析法; 巢湖流域

中图分类号: TV87 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 04-0105-09

流域水安全的内涵, 是指流域水量、水质或它们的时空分布与人的合理需求之间的差异超过相应阈值时所产生的各种现象^[1], 它的外延包括因水资源短缺而产生的水资源安全问题^[2]、因水环境恶化而产生的水环境安全问题^[3]和因水旱灾害而产生的水灾害防治安全问题^[4]。流域水安全诊断评价, 就是在特定的自然和社会条件下, 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综合分析, 建立相应的诊断评价指标体系、评价标准和诊断评价模型, 采用诊断评价模型对不同时期流域水资源安全、水环境安全和水灾害防治安全等子系统和流域水安全系统对持续支撑经济社会可持续发展规模、维系良好的生态环境条件并使系统处于正常的健康发展的总体状况进行综合评判^[4], 识别使流域水安全系统或其子系统处于不安全的主要指标, 对这些指标提出相应的调控措施后, 用诊断评价模型再次综合评判流域水安全系统或其子系统的总体安全状况。流域水安全诊断评价是流域水安全运行管理系统的重要内

容, 为监控和优化管理流域水安全系统提供重要依据^[3]。可见, 流域水安全诊断评价问题是重在识别和调控不安全指标的一类特殊的基于指标体系的流域水安全评价问题^[5]。受自然演化和人类活动的双重影响, 流域水安全系统是由众多自然、经济、社会、人口和科学技术因子组成的典型复杂系统^[4, 6]。当前流域水安全诊断评价研究处于起步阶段, 尚缺乏统一的理论基础和可操作的定量方法, 其中的主要问题有: 一是如何根据研究流域的具体情况合理确定流域水安全诊断评价指标体系及其评价等级标准^[4]。由于至今尚无统一的评价指标体系可供选用, 现有研究都是根据研究区域的具体特点确定部分指标作为水安全评价指标体系^[5], 例如基于水资源压力指数的一套水资源安全评价指标体系^[7], 海河流域水资源安全评价指标体系^[8], 基于 21 世纪水安全面临的挑战所建立的指标体系^[9], 由生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全、管理安全等子系统组成的水安全评价指标体系^[10]。二是在随机、模糊、经验等不确定性

* 收稿日期: 2008-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579009, 7033005); 中国气象局成都高原气象开放实验室基金资助项目

作者简介: 吴开亚 (1968 年生), 男, 博士, 副教授; 通讯联系人: 金菊良; E-mail: jinjl66@126.com

条件下如何合理建立有效的诊断评价模型^[4]。目前已提出了模糊优选模型^[11]、模糊物元模型^[12]、投影寻踪模型^[5]等,这些评价模型各有其适用性,其中的主要问题是如何合理确定单指标符合评价标准等级的隶属度函数和各指标的权重。为此,本文在流域水安全的理论分析、专家咨询、实地调研和文献[4]的基础上构建流域水安全诊断评价指标体系,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)^[13]筛选指标、确定流域水安全系统中各指标和各子系统的权重,提出用集对分析方法(Set Pair Analysis method, SPA)^[14-15]构造可变模糊集的相对隶属度函数^[16]的新方法,建立了流域水安全诊断评价模型(Set Pair Analysis based Diagnosis Assessment Model of watershed water security, SPA-DAM),开展了1999-2005年巢湖流域水安全诊断评价的实证研究。

1 流域水安全诊断评价模型的建立

流域水安全诊断评价模型(SPA-DAM)的建立过程包括如下8个步骤:

(1) 建立流域水安全诊断评价指标体系。从不同角度出发,建立的水安全系统的层次结构将不同,这是水安全评价指标体系至今尚未统一的主要原因。根据水安全系统的功能,可把水安全系统分解为生命安全、经济安全、生态环境安全、社会安全、管理安全等子系统^[10]。由于水安全系统的功能十分广泛,这种分解过程难于保障完整性,各种子系统下的指标数目往往很大,以至难于实用^[9-10]。根据水安全系统的形成机制,可把水安全系统分解为水资源安全、水环境安全、水灾害防治安全和社会经济安全4个子系统^[4],这种分解过程与目前水管理部门的主要工作内容相一致,故本文建议作为水安全系统的层次结构。

根据流域水安全诊断评价的内涵和目标,以及系统性、可操作性、导向性、动态与静态相结合、定性与定量相结合等建立评价指标体系的基本原则,在水安全理论系统分析、文献统计、专家咨询和流域水安全调研基础上,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^[4, 17-18]。由此建立的流域水安全诊断评价指标体系可表示为 $\{C_{jk} | j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_j\}$ 。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^[13]筛选流域水安全诊断评价指标体系 $\{C_{jk} | j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_j\}$ 。请有关专家对流域水安全诊断评价系统各子系统内的两两指标间的评价重要性作比较^[4],建立模糊互补判断矩阵 $P=(p_{kl})$,要求满足: $0 \leq p_{kl} \leq 1, p_{kl} + p_{lk} = 1$ 。其中 p_{kl} 表示指标 k 优于指标 l 的程度,具体规定为: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 的各指标的权重仍记为 $\{w_{jk} | j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_j\}$,则称使式(1)最小的 Q 为 P 的最优模糊一致性判断矩阵^[13]:

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

$$w_{jk} > 0 \quad (k=1, 2, \dots, n_j), \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} = 1 \quad (1)$$

式中, $CIC(n_j)$ 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^[19],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^[13]。

为提高指标筛选的可靠性,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^[4]

$$\bar{w}_{jk} = \sum_{l=1}^{N_e} w_{jkl} / N_e \quad (2)$$

$$j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n_j$$

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诊断评价指标体系 $\{C_{jk} | k=1, 2,$

$\dots, N_j\}$ 。

(3) 根据流域水安全诊断评价指标体系的物理含义及其与流域经济、社会、资源与环境可持续性之间相互作用等方面^[4], 按照国际水安全指标临界值的研究成果和其它流域水安全评价标准^[2-3,7,17], 当地政府颁布的标准和规划区目标、河流水系开发利用保护要求, 以及流域各时期水安全指标的最大值、最小值和均值等, 建立流域水安全诊断评价等级标准 $\{s_{gjk} | g=1, 2, \dots, G; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j\}$, 对应的各指标的样本数据集记为 $\{x_{ijk} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j\}$ 。其中 n, m, N_j 和 G 分别为评价样本 (流域水安全系统不同时期的总体状态) 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。

(4) 用 SPA 构造样本 i 子系统 j 指标 k 的样本值 x_{ijk} (流域水安全系统某时期的状态) 与水安全诊断评价标准等级 g 之间的单指标联系度 u_{ijk} , 其中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j; g=1, 2, \dots, G$ 。SPA 的基本思想, 就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 $\{s_{gjk} | g=1, 2, \dots, G; k=$

$1, 2, \dots, N_j\}$ 的安全属性进行同、异、反的定量比较分析, 用式 (3) 计算联系度^[14]:

$$u = a + bI + cJ \quad (3)$$

式中: a, b 和 c 分别为同一度、差异度和对立度, 均为非负值且满足 $a + b + c = 1$; I 为差异度系数, 在 $[-1, 1]$ 中取值, 当 I 取 -1 或 1 时表示 b 是确定性的, 而随着 I 接近于 0 , b 的不确定性也随之增强; J 为对立度系数, 一般恒取 -1 。在具体计算 u_{ijk} 时, 可将集合 $\{x_{ijk} | k=1, 2, \dots, N_j\}$ 和 $\{s_{gjk} | g=1, 2, \dots, G; k=1, 2, \dots, N_j\}$ 作为两个集合, 它们构成一个集对, 就它们的接近性这一属性作同、异、反的定量分析^[15]: 若它们处于同一等级中则 $u_{ijk} = 1$; 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} 越接近于 1 , x_{ijk} 越接近于与等级 g 相隔的等级则 u_{ijk} 越接近于 -1 。

为了简便又不失一般性, 现假设取 $G=5$ 个诊断评价标准等级的情形 ($g=1 \sim 5$ 级分别记为“不安全”、“较不安全”、“临界安全”、“较安全”和“非常安全”)。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 u_{ijk} 的具体计算公式为^[4, 15, 18]:

$$u_{ijk1} = \begin{cases} 1, & \text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{1jk}) / (s_{2jk} - s_{1jk}), & \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} < s_{2jk}, \text{ 或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} > s_{2jk} \\ -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{2jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} < s_{2jk} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{ijk2} = \begin{cases} 1 - 2(s_{1jk} - x_{ijk}) / (s_{1jk} - s_{0jk}), & \text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk} \\ 1, & \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} \leq s_{2jk}, \text{ 或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} \geq s_{2jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{2jk}) / (s_{3jk} - s_{2jk}), & \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} < s_{3jk}, \text{ 或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} > s_{3jk} \\ -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{3jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} < s_{3jk} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{ijk3} = \begin{cases} -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk} \\ 1 - 2(s_{2jk} - x_{ijk}) / (s_{2jk} - s_{1jk}), & \text{正向指标 } s_{1jk} < x_{ijk} < s_{2jk}, \text{ 或反向指标 } s_{1jk} > x_{ijk} > s_{2jk} \\ 1, & \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} \leq s_{3jk}, \text{ 或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} \geq s_{3jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{3jk}) / (s_{4jk} - s_{3jk}), & \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} < s_{4jk}, \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} > s_{4jk} \\ -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{4jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} < s_{4jk} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{ijk4} = \begin{cases} -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk} \\ 1 - 2(s_{3jk} - x_{ijk}) / (s_{3jk} - s_{2jk}), & \text{正向指标 } s_{2jk} < x_{ijk} < s_{3jk}, \text{ 或反向指标 } s_{2jk} > x_{ijk} > s_{3jk} \\ 1, & \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} \leq s_{4jk}, \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} \geq s_{4jk} \\ 1 - 2(x_{ijk} - s_{4jk}) / (s_{5jk} - s_{4jk}), & \text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} < s_{5jk}, \text{ 或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} > s_{5jk} \\ -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} > s_{5jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} < s_{5jk} \end{cases} \quad (7)$$

$$u_{ijk5} = \begin{cases} -1, & \text{正向指标 } x_{ijk} \leq s_{1jk}, \text{ 或反向指标 } x_{ijk} \geq s_{1jk} \\ 1 - 2(s_{4jk} - x_{ijk}) / (s_{4jk} - s_{3jk}), & \text{正向指标 } s_{3jk} < x_{ijk} < s_{4jk}, \text{ 或反向指标 } s_{3jk} > x_{ijk} > s_{4jk} \\ 1, & \text{正向指标 } s_{4jk} < x_{ijk} \leq s_{5jk}, \text{ 或反向指标 } s_{4jk} > x_{ijk} \geq s_{5jk} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $s_{1jk} - s_{5jk}$ 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(4)~(8)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^[4, 15, 18]。

(5) 显然 u_{ijk} 就是可变模糊集“水安全诊断评价标准等级 g ”的一种相对差异度, 样本值 x_{ijk} 隶属于“水安全诊断评价标准等级 g ”的单指标相对隶属度可表为^[16]

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{ijk} \quad (9)$$

$$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, N_j; g=1, 2, \dots, G$$

(6) 计算样本值 x_{ijk} 隶属于模糊集“水安全诊断评价标准等级 g ”的单指标归一化相对隶属度 v_{ijk} 、子系统归一化相对隶属度 v_{ijg} 和样本归一化相对隶属度 v_{ig} :

$$v_{ijk} = v_{ijk}^* / \sum_{g=1}^G v_{ijk}^*, v_{ijg} = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk} v_{ijk},$$

$$v_{ig} = \sum_{j=1}^m w_j v_{ijg} \quad (10)$$

式中, w_{jk} 为子系统 j 指标 k 的权重, w_j 为子系统 j 的权重。

(7) 计算样本值 x_{ijk} 的单指标水安全等级 h_{ijk} 、子系统的水安全等级 h_{ij} 和样本水安全等级 h_i 。为避免应用最大隶属度原则进行模糊模式识别所可能造成的失真, 提高等级评价的精度, 可以把级别特征值^[16]作为水安全等级值:

$$h_{ijk} = \sum_{g=1}^G v_{ijk} g, h_{ij} = \sum_{g=1}^G v_{ijg} g, h_i = \sum_{g=1}^G v_{ig} g$$

$$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m;$$

$$k=1, 2, \dots, N_j \quad (11)$$

(8) 诊断分析。用步骤(7)对流域水安全评价指标各时期样本系列进行综合评价, 若流域水安全系统或其子系统处于临界安全以下, 用式(11)识别使流域水安全系统或其子系统处于不安全的主要子系统及其主要指标(称为限制指标), 对这些指标提出相应的调控措施后, 用步骤(4)步骤(7)再次综合评价流域水安全系统或其子系统的总体安全状况。

2 实例分析——以巢湖流域为例

巢湖流域属亚热带和暖温带过渡性的副热带季风气候区, 气候温和湿润, 是重要的粮食生产基地。降水量在流域内的时空分布不均匀, 洪涝和干

旱灾害时有发生。随着流域社会经济的快速发展和人口的不断增长, 流域水资源供需矛盾日益突出, 非点源污染日趋严重, 水土流失显著, 是目前我国重点污染治理的“三河三湖”之一。正确及时地诊断评价该流域的水安全状况, 不仅是流域水安全管理的重要内容, 而且对进一步识别影响和控制流域水安全的主要因子、提高流域水安全保障能力均具有重要意义。根据 SPA 连 DAM 步骤(1)确立的巢湖流域水安全诊断评价指标体系包括 4 个子系统^[4]: 水资源安全子系统包括的指标有水资源利用率、湖泊面积率、人均水资源量、单位面积水资源量、人均日生活用水量、万元工业产值耗水量、工业用水重复利用率、万元农业产值用水量、农业灌溉面积率、灌溉水综合利用系数和灌溉面积占播种面积比例; 水环境安全子系统包括的指标有森林覆盖率、土壤侵蚀模数、水土流失面积比例、水土流失治理率、工业废水排放达标率、万元产值污水排放量、人均生活污水排放量、生活污水处理率、单位面积化肥施用量、单位面积农药施用量、工业 SO_2 排放密度、工业废水排放密度、生态环境用水率、水域面积率和环保投资占 GDP 比例; 水灾害防治安全子系统包括的指标有洪水受灾面积率、洪水人口受灾率、洪灾频率、洪涝损失占 GDP 比例、干旱受灾面积率、干旱人口受灾率、干旱频率、干旱指数、干旱损失占 GDP 比例、堤防保护耕地面积率、单位面积蓄水工程总库容、防洪抗旱信息化程度和水利工程投资占 GDP 比例; 社会经济安全子系统包括的指标有区域开发指数、城市化程度、人口密度、经济密度、人均 GDP、人均耕地、人均粮食产量、饮用卫生水达标人口率、家庭水费支出占家庭可支配收入的比例、科技教育投入占 GDP 比例、水利科技人员占科技人员比例、水资源相关法律法规体系健全程度、公众节水意识普及率和农村文盲半文盲比例。

请专家对上述指标体系就两两指标间的评价重要性进行比较, 建立了模糊互补判断矩阵^[4], 例如对社会经济安全子系统的 6 个模糊互补判断矩阵 $P_1 \sim P_6$, 用 AGA-FAHP 计算这些指标权重的结果见表 1。表 1 表明: ①各矩阵的一致性指标系数值均比较小, 据此计算的各指标权重是可以接受的; ②各指标权重的标准差与均值的比值, 大多比较小, 说明上述专家的意见相对集中。取这些指标中权重均值最大的 8 个指标, 组成最终的巢湖流域社会经济安全评价指标体系。同理可分别在水资源安全、水环境安全和水灾害防治安全子系统中取指标权重均值最大的 8 个指标、10 个指标和 9 个指标,

与社会经济安全子系统一起, 组成最终的 35 个指标成的巢湖流域水安全诊断评价指标体系, 根据 SPA-DAM 步骤 (3) 建立巢湖流域水安全诊断评

价等级标准, 结果如表 2 所示。用 AGA-FAHP 求得 4 个子系统的权重均为 0.25。

表 1 用 AGA-FAHP 筛选社会经济安全子系统的评价指标的计算结果

Tab. 1 Results of filtrating the index system of society & economy security subsystem using AGA-FAHP

矩阵	各评价指标的权重														一致性 指标系数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
P_1	0.034	0.080	0.097	0.111	0.099	0.045	0.028	0.079	0.025	0.093	0.089	0.092	0.040	0.088	0.177
P_2	0.113	0.067	0.136	0.100	0.103	0.042	0.040	0.100	0.061	0.041	0.037	0.042	0.025	0.093	0.203
P_3	0.079	0.089	0.024	0.084	0.078	0.011	0.012	0.138	0.143	0.086	0.081	0.065	0.081	0.029	0.260
P_4	0.100	0.092	0.036	0.098	0.095	0.083	0.093	0.102	0.041	0.085	0.029	0.032	0.034	0.079	0.215
P_5	0.072	0.087	0.087	0.076	0.083	0.048	0.027	0.090	0.039	0.091	0.086	0.094	0.095	0.025	0.199
P_6	0.040	0.100	0.036	0.031	0.102	0.100	0.093	0.096	0.038	0.098	0.097	0.102	0.033	0.035	0.138
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	

表 2 巢湖流域水安全评价指标体系及其诊断评价等级标准

Tab. 2 The assessment index system of Chaohu watershed water security and its grading criterion

评价指标	水安全等级				
	1 (不安全)	2 (较不安全)	3 (临界安全)	4 (较安全)	5 (非常安全)
$C_{1,1}$ 水资源利用率/%	>60	40~60	25~40	10~25	<10
$C_{1,2}$ 人均水资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	<1000	1000~1700	1700~2300	2300~3000	>3000
$C_{1,3}$ 单位面积水资源量/($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	<30	30~75	75~150	150~300	>300
$C_{1,4}$ 万元工业产值耗水量/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	>450	350~450	250~350	150~250	<150
$C_{1,5}$ 工业用水重复利用率/%	<50	50~70	70~80	80~90	>90
$C_{1,6}$ 万元农业产值用水量/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	>2000	1500~2000	1000~1500	500~1000	<500
$C_{1,7}$ 灌溉水综合利用系数	<0.15	0.15~0.25	0.25~0.40	0.40~0.50	>0.50
$C_{1,8}$ 灌溉面积占播种面积比例/%	<30	30~40	40~50	50~60	>60
$C_{2,1}$ 森林覆盖率/%	<10	10~15	15~20	20~30	>30
$C_{2,2}$ 水土流失治理率/%	<50	50~60	60~70	70~80	>80
$C_{2,3}$ 工业废水排放达标率/%	<80	80~85	85~92.5	92.5~97.5	>97.5
$C_{2,4}$ 万元产值污水排放量/($\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$)	>55	40~55	25~40	10~25	<10
$C_{2,5}$ 生活污水处理率/%	<20	20~40	40~60	60~80	>80
$C_{2,6}$ 单位面积化肥施用量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	>0.5	0.4~0.5	0.25~0.4	0.1~0.25	<0.1
$C_{2,7}$ 工业废水排放密度/($10^4 \text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)	>4	3~4	2~3	1~2	<1
$C_{2,8}$ 生态环境用水率/%	<1	1~2.5	2.5~4	4~5.5	>5.5
$C_{2,9}$ 水域面积率/%	<5	5~10	10~15	15~20	>20
$C_{2,10}$ 环保投资占 GDP 比例/%	<0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	>1.5
$C_{3,1}$ 洪水受灾面积率/%	>8	6~8	4~6	2~4	<2
$C_{3,2}$ 洪水人口受灾率/%	>20	10~20	5~10	2~5	<2
$C_{3,3}$ 洪涝损失占 GDP 比例/%	>5.5	4~5.5	2.5~4	1~2.5	<1
$C_{3,4}$ 干旱受灾面积率/%	>30	20~30	10~20	5~10	<5
$C_{3,5}$ 干旱人口受灾率/%	>20	10~20	5~10	2~5	<2
$C_{3,6}$ 干旱损失占 GDP 比例/%	>5.5	4~5.5	2.5~4	1~2.5	<1
$C_{3,7}$ 单位面积蓄水工程总库容/($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	<10	20	30	40	>40
$C_{3,8}$ 防洪抗旱信息化程度	低	较低	中等	较高	高

续上表

评价指标	水安全等级				
	1 (不安全)	2 (较不安全)	3 (临界安全)	4 (较安全)	5 (非常安全)
$C_{3,9}$ 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
$C_{4,1}$ 区域开发指数/%	>85	60~85	45~60	30~45	<30
$C_{4,2}$ 城市化程度/%	<10	10~20	20~30	30~50	>50
$C_{4,3}$ 人口密度/(人·km ⁻²)	>500	350~500	200~350	100~200	<100
$C_{4,4}$ 经济密度/(万元·km ⁻²)	<100	100~300	300~400	400~600	>600
$C_{4,5}$ 人均 GDP/(10 ³ 元)	<2	2~5	5~8	8~12	>12
$C_{4,6}$ 饮用卫生水达标人口率/%	<60	60~70	70~85	85~95	>95
$C_{4,7}$ 科技教育投入占 GDP 比例/%	<1	1~3	3~4	4~6	>6
$C_{4,8}$ 水资源相关法律法规体系健全程度/%	低	较低	中等	较高	高

把 1999 - 2005 年巢湖流域水安全评价指标样本值代入 SPA-DAM, 诊断评价结果如表 3 - 表 5 所示。表 3 - 表 5 表明: ① 7 a 中有 6 a 的水资源安全等级值小于 3 级 (临界安全)、且波动性明显, 说明该流域水资源安全形势严峻, 特别是 2001 年处于 2.556 级、介于较不安全与临界安全之间, 其限制指标是水资源利用率和人均水资源量。若把这 2 个指标调控到临界安全区间, 2001 年的水资源安全等级值即达到 2.928 级。② 7 a 的水环境安全等级值均处于 3 级附近、并存在缓慢改善的趋势, 其限制指标是单位面积化肥施用量和环保投资占 GDP 比例, 其中 1999 和 2000 年的限制指标还有工业废水排放达标率。若把这 3 个指标调控到临界安全区间, 1999 年的水环境安全等级值即由 2.724 级改善到 3.057 级。③ 7 a 中有 2 a 的水灾害防治安全等级值小于 3 级 (临界安全)、且波动性明

显, 说明该流域水灾害防治安全形势严峻, 特别是 2003 年处于 2.571 级、介于较不安全与临界安全之间, 其限制指标是单位面积蓄水工程总库容和水利工程投资占 GDP 比例。若把这 2 个指标调控到临界安全区间, 2003 年的水灾害防治安全等级值即达到 2.822 级。④ 7 a 的社会经济安全等级值均处于 3 级附近、并存在缓慢改善的趋势, 其限制指标是区域开发指数、人口密度和科技教育投入占 GDP 比例。若把这 3 个指标调控到临界安全区间, 2005 年的社会经济安全等级值即由 3.329 级改善到 3.580 级。⑤ 7 a 的流域水安全等级值均处于 3 级附近、并存在缓慢改善的趋势。在巢湖流域水安全系统中, 由于水资源安全和水灾害防治安全程度不高、波动性大, 水环境安全和社会经济安全程度不高、改善缓慢, 因此总体上该流域的水安全形势不容乐观。

表 3 巢湖流域水资源安全和水环境安全子系统的 SPA-DAM 评价结果

Tab. 3 Evaluated results of water resources and water environment security subsystems of Chaohu watershed using SPA-DAM

年 份	水资源安全子系统归一化相对隶属度					安全等级		年 份	水环境安全子系统的归一化相对隶属度					安全等级
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级				1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	
1999	0.168	0.298	0.268	0.198	0.067	2.698		1999	0.212	0.262	0.215	0.214	0.098	2.724
2000	0.215	0.236	0.202	0.245	0.100	2.779		2000	0.222	0.220	0.215	0.229	0.114	2.793
2001	0.272	0.250	0.208	0.192	0.079	2.556		2001	0.197	0.149	0.198	0.271	0.185	3.098
2002	0.108	0.280	0.317	0.220	0.075	2.874		2002	0.179	0.148	0.194	0.289	0.191	3.165
2003	0.000	0.143	0.388	0.354	0.115	3.440		2003	0.071	0.098	0.177	0.385	0.269	3.683
2004	0.274	0.215	0.155	0.225	0.131	2.724		2004	0.161	0.135	0.197	0.316	0.191	3.239
2005	0.213	0.257	0.151	0.225	0.154	2.850		2005	0.169	0.132	0.168	0.302	0.228	3.287
2001 调控后	0.057	0.308	0.365	0.192	0.079	2.928		1999 调控后	0.038	0.277	0.373	0.214	0.098	3.057

3 结 论

(1) 为在随机、模糊、经验等不确定性环境下系统、定量地综合评价流域水安全系统对持续支撑经济社会可持续发展规模、维系良好的生态环境

条件并使流域水安全系统处于正常的健康发展的总体状况, 识别使流域水安全系统或其子系统处于不安全的主要指标 (限制指标), 对这些指标提出相应的调控措施后、用评价模型再次综合评价流域水安全系统或其子系统的总体安全状况, 在流域水安

表4 巢湖流域水灾害防治安全和社会经济安全子系统的 SPA-DAM 评价结果

Tab. 4 Evaluated results of water disaster and society & economy security subsystems of Chaohu watershed using SPA-DAM

年份	水灾害防治安全子系统归一化相对隶属度					安全等级	年份	社会经济安全子系统归一化相对隶属度					安全等级
	1级	2级	3级	4级	5级			1级	2级	3级	4级	5级	
1999	0.197	0.241	0.136	0.167	0.260	3.053	1999	0.143	0.357	0.281	0.131	0.088	2.666
2000	0.230	0.204	0.114	0.099	0.353	3.140	2000	0.114	0.350	0.309	0.130	0.097	2.745
2001	0.192	0.220	0.131	0.203	0.254	3.106	2001	0.103	0.328	0.320	0.141	0.107	2.822
2002	0.295	0.275	0.077	0.022	0.332	2.820	2002	0.101	0.293	0.322	0.162	0.121	2.907
2003	0.232	0.320	0.195	0.153	0.101	2.571	2003	0.101	0.224	0.317	0.215	0.144	3.077
2004	0.146	0.177	0.097	0.143	0.437	3.547	2004	0.109	0.209	0.240	0.227	0.215	3.229
2005	0.159	0.174	0.203	0.226	0.238	3.209	2005	0.126	0.209	0.164	0.211	0.290	3.329
2003 调控后	0.147	0.279	0.280	0.194	0.101	2.822	2005 调控后	0.000	0.210	0.290	0.211	0.290	3.580

表5 巢湖流域水安全系统各年的 SPA-DAM 评价结果

Tab. 5 Evaluated results of water security system of Chaohu watershed using SPA-DAM

年份	水安全系统归一化相对隶属度					安全等级
	1级	2级	3级	4级	5级	
1999	0.180	0.289	0.225	0.177	0.128	2.785
2000	0.195	0.252	0.210	0.176	0.166	2.863
2001	0.191	0.237	0.214	0.202	0.156	2.896
2002	0.171	0.249	0.228	0.173	0.180	2.943
2003	0.101	0.196	0.269	0.277	0.157	3.194
2004	0.172	0.184	0.172	0.228	0.243	3.186
2005	0.167	0.193	0.171	0.241	0.227	3.169

全的理论分析、专家咨询和实地调研和文献 [4] 的基础上建立了流域水安全诊断评价指标体系, 提出用基于加速遗传算法的模糊层次分析法筛选指标、确定流域水安全诊断评价系统中各指标和各子系统的权重, 用集对分析方法构造流域水安全评价指标样本值隶属于可变模糊集“水安全诊断评价标准等级”的相对隶属度函数, 建立了流域水安全诊断评价模型 (SPA-DAM)。

(2) SPA-DAM 在巢湖流域水安全诊断评价的结果说明: 流域近 7 a 来水安全等级值均处于临界安全附近、并存在缓慢改善的趋势; 在巢湖流域水安全系统中, 由于水资源安全和水灾害防治安全程度不高、波动性大, 水环境安全和社会经济安全程度不高、改善缓慢, 因此总体上该流域的水安全形势不容乐观; 限制指标是水资源利用率、人均水资源量、单位面积化肥施用量、环保投资占 GDP 比例、单位面积蓄水工程总库容、水利工程投资占 GDP 比例、区域开发指数、人口密度和科技教育投入占 GDP 比例, 合理调控这些指标是提高该流域水安全保障程度的重要措施。

(3) SPA-DAM 综合利用了评价指标样本值与评价标准等级间各单指标联系度的评价信息, 评价结果合理、精度高, 方法直观简便, 在已知等级评

价标准的多层次系统诊断评价问题中具有推广应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
JIN Juliang, WANG Wensheng, HONG Tianqiu, et al. Theoretical basis of intelligent evaluation methods of watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 918-925.
- [2] 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.
CHANG Mingqi, HUANG Qiang. Theory and Method of Water Resources Security [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.
- [3] 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.
CHEN Shaojin. Evaluation, Prewarning and Control of Water Security System [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.
- [4] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409.
JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security

- [J]. J Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409.
- [5] 王顺久, 李跃清, 丁晶. 基于指标体系的水安全评价方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 116-119.
- WANG Shunjiu, LI Yueqing, DING Jing. Evaluation method of water security based on indicator system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2): 116-119.
- [6] 章红宝, 江光华. 试论复杂性研究兴起、现状及存在的问题[J]. 系统科学学报, 2006, 14(1): 92-96.
- ZHANG Hongbao, JIANG Guanghua. The rise, present situation and some problems of complexity research [J]. Chinese J Systems Science, 2006, 14(1): 92-96.
- [7] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545.
- JIA Shaofeng, ZHANG Junyan, ZHANG Shifeng. Regional water resources stress and water resources security appraisal indicators [J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 538-545.
- [8] 贾绍凤, 张士锋. 海河流域水资源安全评价[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 379-387.
- JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng. Water resources security appraisal of Haihe basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22(4): 379-387.
- [9] 韩宇平, 阮本清. 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 267-272.
- HAN Yuping, RUAN Benqing. Research on evaluation index system of water safety [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(2): 267-272.
- [10] 王远坤. 水安全评价体系及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- WANG Yuankun. Water Security Assessment System and Its Application [D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [11] 韩宇平, 阮本清, 解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 37-42.
- HAN Yuping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Multiobjective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. Resources Science, 2003, 25(4): 37-42.
- [12] 李如忠. 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J]. 水土保持学报, 2005, 12(5): 221-223.
- LI Ruzhong. Fuzzy matterelement model and its application to water security evaluation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 221-223.
- [13] 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): 25-30.
- JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. J Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 25-30.
- [14] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000.
- ZHAO Keqin. Set Pair Analysis Method and Its Primary Application [M]. Hangzhou: Hangzhou Scientific & Technical Press, 2000.
- [15] 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.
- LI Fanxiu, XIN Yan, CHEN Wu. Set pair analysis method of water quality eutrophication assessment of lakes [J]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(6): 10-11, 16.
- [16] 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.
- CHEN Shouyu. Theories and Methods of Variable Fuzzy Sets in Water Resources and Flood Control System [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005.
- [17] 宋松柏, 蔡焕杰. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2005.
- SONG Songbo, CAI Huanjie. Index System and Evaluation for Sustainable Utilization of Regional Water Resources [M]. Yangling: Northwest A & F University Press, 2005.
- [18] 吴开亚, 金菊良, 周玉良, 等. 流域水资源安全评价的集对分析可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(3): 6-12.
- WU Kaiya, JIN Juliang, ZHOU Yu-liang, et al. Set pair analysis based variable fuzzy set assessment model for watershed water resources security [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(3): 6-12.
- [19] 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.
- JIN Juliang, DING Jing. Water Resource System Engineering [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Press, 2002.

Diagnosis Assessment Model of Watershed Water Security Based on Index System

WU Kai-ya¹, JIN Ju-liang², WEI Yi-ming³, ZHANG Hao⁴

(1. National Innovative Institute for Public Management and Public Policy,
Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Institute of Policy & Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

4. Department of Environmental Sciences and Engineering, Fudan University, Shanghai, 200433, China)

Abstract: In order to quantitatively judge comprehensive status of assessed watershed water security and identify the key indexes which lead to insecurity status of watershed water security system or its sub-systems under the random, fuzzy or experiential uncertainty conditions, the diagnosis assessment index system and evaluation grading standard of watershed water security were determined on the basis of theory analysis, expert consult and investigation of watershed water security. The accelerating genetic algorithm based fuzzy analytic hierarchy process was used to filtrate the index system and to determine the weights of both indexes and subsystems of water security diagnosis assessment system. The relative membership degree function of variable fuzzy set of the assessed samples according to criterion grades was determined by using set pair analysis method. Then a new diagnosis assessment model of watershed water security based on index system and set pair analysis method, named SPA-DAM for short, was established. The SPA-DAM was applied to assessing the water security system of Chaohu watershed of China. The results show that the watershed has been near the critical security state during the last seven years. Its comprehensive water security situation was improved very slowly because the degrees of the water resource and water disaster security subsystems were low and fluctuated remarkably, and the degrees of the water environment and society & economy security subsystems of Chaohu watershed were not high. The key indexes of water resource utilization ratio, water resource amount of per person, fertilizer wastage of unit area, environment protection investment of unit GDP, storage capacity of water conservancy projections of unit area, water conservancy projection investment of unit GDP, regional exploitation exponent, population density, science and technology investment of unit GDP must be regulated and controlled with reason in order to further heighten the safeguard degree of the watershed water security. The evaluation results of SPA-DAM are reasonable and reliable. SPA-DAM is simple and practical, and SPA-DAM can be applied to different multiplayer comprehensive diagnosis assessment problems of complex systems under the known grading evaluation criterion.

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