

基于属性识别模型的巢湖流域生态安全评价^{*}

吴开亚¹ 张礼兵² 金菊良^{2**} 孙世群³

(¹厦门大学经济学院, 福建厦门 361005; ²合肥工业大学土木建筑工程学院, 合肥 230009;

³合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要 为建立有效的流域生态安全评价模型,采用 AHP赋权方法与属性识别模型相耦合的途径,以巢湖流域生态安全为研究对象,对基于属性识别模型的巢湖流域及其次级评价单元的生态安全评价问题进行了研究。结果表明:巢湖流域 9区(县)及流域整体生态安全状况从优到劣的排序结果依次为合肥、流域整体、居巢、无为、和县、含山、舒城、庐江、肥东和肥西;合肥和肥西的生态安全状况分别为 级和 级,其它评价单元均处于 级。基于属性识别模型的流域生态安全评价方法涵义明确、计算过程简单,能同时实现生态安全等级的分类和排序,在其它生态系统综合评价中具有一定的应用价值。

关键词 生态安全; 综合评价; 属性识别模型; 巢湖流域

中图分类号 X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000 - 4890(2007)05 - 0759 - 06

Ecological security evaluation of Chaohu Lake basin based on atribute recognition model
WU Kai-ya¹, ZHANG Li-bing², JIN Ju-liang², SUN Shi-qun³ (¹School of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; ²College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; ³College of Natural Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26** (5): 759 - 764.

Abstract: By using AHP weight method and attribute recognition model, a comprehensive ecological security evaluation of Chaohu Lake basin and its secondary appraisal units was made, aimed to build an efficient model for basin ecological security evaluation. The results indicated that the ecological security level of Chaohu Lake basin declined in the sequence of Hefei, the basin as a whole, Juchao, Wuwei, Hexian, Hanshan, Shucheng, Lujiang, Feidong, and Feixi. Among them, Hefei and Feixi were in grades and , respectively, and other districts all fell into grade . Because of its explicit meanings and simple computational process, this model could sort and rank the test objects according to their ecological security level, and be applied to the comprehensive evaluation of other ecological systems.

Key words: ecological security; comprehensive evaluation; attribute recognition model; Chaohu Lake basin

1 引言

生态安全评价是生态安全研究中的一个重要而复杂的问题,根据选定的指标体系和评价标准,运用恰当的方法对环境因子及生态整体性进行生态安全状况评估(刘红等,2006)。目前国内外学者对生态安全评价方法的选择与指标体系的构建等进行过一

些探讨,并进行了不同时空尺度下不同生态系统类型的评价,但尚未形成系统的评价体系,定量评价方法与准则的确定仍处于探索阶段(肖荣波等,2004;张艳芳和任志远,2006)。采用的生态安全评价模型主要有灰色关联法(陈浩等,2003)、综合指数法(肖荣波等,2004)、层次分析法(刘勇等,2004)、物元评判法(谢花林和张新时,2004)、主成分投影法(吴开亚等,2004a)和熵权法(贾艳红等,2006)等。本质上,生态安全评价的核心问题是如何科学、客观地从高维空间到低维空间的映射,并要求这种映射能尽可能反映评价对象样本在原高维空间中的分类

*国家自然科学基金项目(50579009)、教育部人文社会科学研究规划基金项目(05JA840011)和安徽省教育厅自然科学基金重点资助项目(2003KJ043ZD)。

**通讯作者 E-mail: jinjl66@126.com

收稿日期: 2006-09-01 接受日期: 2007-01-29

信息和排序信息(金菊良等,2004)。然而生态系统作为一个开放的系统,涉及到社会、经济和自然环境等因素,这些信息都存在着不确定性。由于生态安全的评价空间是有序的,而对有序评价空间不适合于用“最大隶属度”识别准则识别和排序,这样传统的评价方法如模糊综合评判、灰色聚类分析、物元分析等应用于生态安全评价中,其结果的合理性和科学性就值得探讨(吴开亚等,2004b)。属性识别模型是建立在属性空间基础上,以最小代价原则、最大测度准则、置信度准则和评分准则为基础的新型综合评价方法,能对事物进行有效识别和比较分析,较好地克服了其它识别方法如模糊识别理论的某些不足(程乾生,1997),已成功应用在大气环境及水土资源系统的预测、评价、决策等问题中(甄苓和王来生,2000;门宝辉和梁川,2002;郭奇和曹洪洋,2004)。但总体来看,这些研究的评价系统较为简单,评价指标过少。本文在确定巢湖流域生态安全评价指标和评价标准的基础上,采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重,建立生态安全评价的属性识别模型,对巢湖流域 9 区(县)及流域整体的生态安全状况进行综合评价和分析,反映巢湖流域生态安全的状态、程度和水平,为政府有关部门制定可持续发展战略和生态安全管理提供科学依据,同时也丰富流域生态安全评价的理论与方法。

2 生态安全评价的属性识别模型

2.1 样本属性综合测度值的计算

设研究对象空间 X 中有 n 个样本 x_1, x_2, \dots, x_n , 各样本的 m 个评价指标, I_1, I_2, \dots, I_m , 第 i 个样本 x_i 的第 j 个指标 I_j 的评价值为 x_{ij} , 因此,第 i 个样本 x_i 可以表示为一个向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}), 1 \leq i \leq n$ 。设 F 为 X 中元素的某类属性空间, (C_1, C_2, \dots, C_K) 为属性空间 F 的分割,这里将 F (生态安全等级) 分为 5 级,且彼此不相交,满足 $(C_1 > C_2 > \dots > C_K)$, (C_1, C_2, \dots, C_K) 是属性空间 F 的有序分割(程乾生,1997)。根据已知的各指标等级分类标准,写成分类标准判断矩阵为:

$$\begin{matrix}
 & C_1 & C_2 & \dots & C_K \\
 \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mK} \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

其中, μ_{ijk} 为评价样本第 j 个属性第 k 个评价等级的值,且满足 $\mu_{ij1} < \mu_{ij2} < \dots < \mu_{ijK}$ 或 $\mu_{ij1} > \mu_{ij2} > \dots > \mu_{ijK}$ 。

利用属性识别模型进行综合评价的关键是计算每个样本的属性测度,也就是求 x_{ij} 具有属性 C_k 的程度 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij}, C_k)$ 。为方便不妨假定 $\mu_{ij1} < \mu_{ij2} < \dots < \mu_{ijK}$, 定义单样本线性属性函数如图 1 所示(郭奇和曹洪洋,2004)。

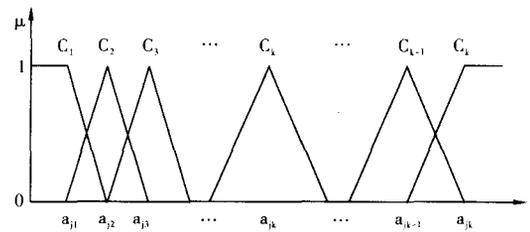


图 1 单指标属性测度函数

Fig 1 Attribute measure function of single index

当 $x_{ij} = a_{j1}$ 时,取 $\mu_{ij1} = 1,$

$\mu_{ij2} = \mu_{ij3} = \dots = \mu_{ijK} = 0$

当 $x_{ij} = a_{jK}$ 时,取 $\mu_{ijK} = 1,$

$\mu_{ij1} = \mu_{ij2} = \dots = \mu_{ij,K-1} = 0$

当 $a_{j,l} < x_{ij} < a_{j,l+1}$ 时 $(1 \leq l < K - 1),$

取 $\mu_{ijl} = \frac{a_{j,l+1} - x_{ij}}{a_{j,l+1} - a_{j,l}}, \mu_{ij,l+1} = \frac{x_{ij} - a_{j,l}}{a_{j,l+1} - a_{j,l}}$

其它情况下,取 $\mu_{ijk} = 0;$ (其中, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, K$)。

获得样本 x_i 的所有 m 个单指标评价值的属性测度后,采用 AHP 法求出各指标权重 $(w_1, w_2, \dots, w_m), w_j > 0, \sum_{j=1}^m w_j = 1,$ 按式 (1) 计算该样本的综合测度值:

$$\mu_{ik} = \mu(x_i, C_k) = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

2.2 识别与比较分析

获得了综合属性测度就可以进行样本识别以及比较分析。按照置信度准则,对置信度 α , 如果

$$k_i = \min \{ k: \sum_{l=1}^k \mu_{x_i}(C_l) \geq \alpha, 1 \leq k \leq K \} \quad (2)$$

则认为 x_i 属于 C_{k_i} 类。

按照式 (3) 的评分准则,计算样本 x_i 的得分:

$$q_{x_i} = \sum_{l=1}^k n_l \mu_{x_i}(C_l) \quad (3)$$

式中, n_l 为 C_l 的分值,是单调减小的正整数,通常根据经验来确定取值范围。这样即可按照 q_{x_i} 的大小对

样本 x_i 进行比较和排序。

3 以巢湖流域为例进行生态安全评价

3.1 巢湖流域概况

巢湖位于安徽省中部,为中国五大淡水湖泊之一,流域总面积 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省的 9.66%,涵盖合肥市区、居巢区以及肥西、肥东、含山、和县、庐江、无为和舒城等县域,人口 890 万人,是全省社会经济较为发达的地区。近年来,随着经济迅速发展,流域生态环境日趋退化,生态安全态势已经成为制约流域社会经济自然协调发展的主要因素。

3.2 生态安全评价指标体系和标准

在进行巢湖流域生态安全评价指标选择时,充分考虑流域生态环境现状、对生态安全有潜在影响的重要因素的变化和人类活动的能动反映,结合世界经济合组织 (OCED) 提出的压力-状态-响应 (PSR) 模型的概念框架以及国内相关研究成果 (左伟等, 2002;王顺久和李跃清, 2006),建立了巢湖流域生态安全评价指标体系 (图 2)。该指标体系包含 3 个层次结构,以流域生态安全综合状况为目标层 (O)、“压力-状态-响应”为准则层 (A)、29 个指标为指标层 (B)。其中,系统压力 A_1 包含 $B_1 \sim B_{10}$ 等 10 个指标,反映了人为活动给流域生态环境造成的负荷;系统状态 A_2 包含 $B_{11} \sim B_{22}$ 等 12 个指标,表征流域生态环境质量、自然资源与生态系统状况;系统响应 A_3 包含 $B_{23} \sim B_{29}$ 等 7 个指标,表征政府与公众对生态环境问题所采取的对策与措施。

评价标准设定的合理与否将直接影响评价结果的准确性。根据国际通用分类标准 (如人均水资源量、第三产业比例、人均耕地等指标)、科学研究已判定的生态效应 (如农业污染指标等指标)、生态建设标准 (如水土流失面积、保护土地占土地总面积比等指标)、类似发达地区的水平 (如经济密度、农民人均纯收入等指标),将巢湖流域生态安全状况划分为 5 个等级: 级为很不安全 (恶劣)、级为较不安全 (较差)、级为安全 (一般)、级为较安全 (良好)、级为很安全 (理想),各安全等级的划分标准见表 1。

3.3 AHP法确定指标权重

生态安全评价指标权重的确定可采用主观赋权、客观赋权及组合赋权等,这些方法各有优点和局限性。AHP法是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法,特别适用于难以完全定量

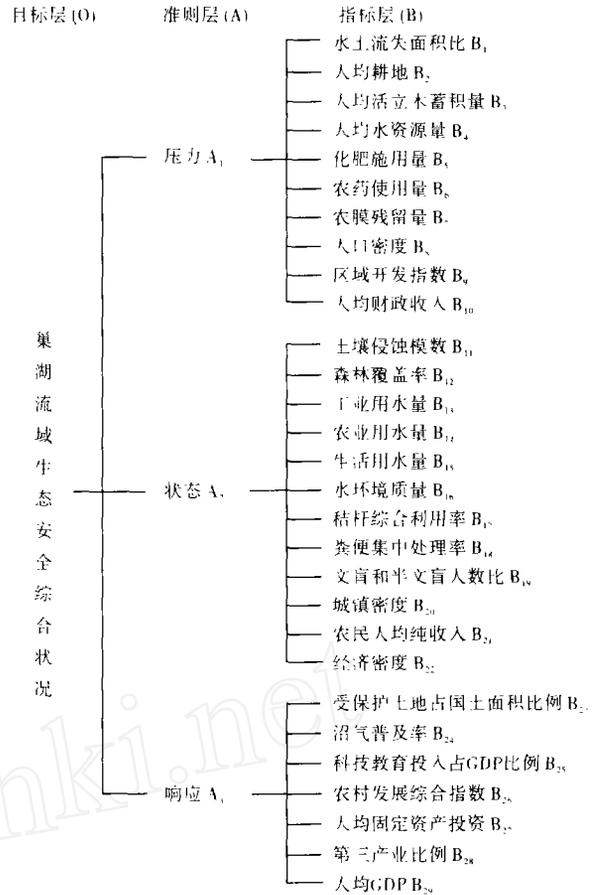


图 2 巢湖流域生态安全评价指标体系
Fig 2 Index system of ecological security evaluation in Chaohu Lake basin

进行分析的复杂问题 (姜启源, 1999)。

构造比较判断矩阵。这是采用 AHP法确定权重的数据基础,共采用 5 份专家调查问卷,使用两两比较法确定各指标之间的相对重要性,按 1—9 尺度量化,并依据成对比较法构造出判断矩阵 O-A (表 2)、 A_1 -B (表 3),同理 A_2 -B 和 A_3 -B 也可构造判断矩阵。

计算层次单排序。计算每一个判断矩阵的最大特征值和对应特征向量,并作一致性检验,经计算 CR 均 < 0.10 ,一致性检验通过,计算所得的特征向量 (归一化后)作为子层权重。

计算层次总排序。计算指标层 (B)对目标层 (O)的层次总排序,并进行组合一致性检验, $CR = 0.0799 < 0.10$,所得的层次总排序可以作为总体权重 (表 4)。

3.4 评价结果

根据生态安全评价属性识别模型步骤,对巢湖流域 9 区 (县)以及流域整体共 10 个评价单元 (样

表 1 巢湖流域生态安全评价等级及指标取值范围

Tab 1 Classification standard of ecological security evaluation and range of indexes in Chaohu Lake basin

| 指标 | 生态安全等级 | | | | |
|--|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | | |
| B ₁ 水土流失面积比 (%) | [20, 50] | [10, 20] | [5, 10] | [2, 5] | [0, 2] |
| B ₂ 人均耕地 (hm ² · 人 ⁻¹) | [0, 0.04] | [0.04, 0.053] | [0.053, 0.067] | [0.067, 0.08] | [0.08, 0.1] |
| B ₃ 人均活立木蓄积量 (m ³ · 人 ⁻¹) | [0, 0.5] | [0.5, 2.5] | [2.5, 4] | [4, 7.5] | [7.5, 20] |
| B ₄ 人均水资源量 (m ³ · 人 ⁻¹) | [0, 1000] | [1000, 1700] | [1700, 2300] | [2300, 3000] | [3000, 8000] |
| B ₅ 化肥施用量 (t · hm ⁻²) | [0.5, 1] | [0.4, 0.5] | [0.25, 0.4] | [0.1, 0.25] | [0, 0.1] |
| B ₆ 农药使用量 (kg · hm ⁻²) | [40, 100] | [20, 40] | [10, 20] | [5, 10] | [0, 5] |
| B ₇ 农膜残留量 (kg · hm ⁻²) | [50, 60] | [35, 50] | [20, 35] | [10, 20] | [0, 10] |
| B ₈ 人口密度 (人 · km ⁻²) | [500, 650] | [350, 500] | [200, 350] | [100, 200] | [0, 100] |
| B ₉ 区域开发指数 (%) | [85, 100] | [60, 85] | [45, 60] | [30, 45] | [0, 30] |
| B ₁₀ 人均财政收入 (元 · 人 ⁻¹) | [0, 800] | [800, 1200] | [1200, 1600] | [1600, 2000] | [2000, 5000] |
| B ₁₁ 土壤侵蚀模数 (t · km ⁻² · a ⁻¹) | [2500, 25000] | [1000, 2500] | [500, 1000] | [100, 500] | [0, 100] |
| B ₁₂ 森林覆盖率 (%) | [0, 10] | [10, 15] | [15, 20] | [20, 30] | [30, 50] |
| B ₁₃ 工业用水量 (m ³ · 万元 ⁻¹) | [160, 300] | [120, 160] | [80, 120] | [40, 80] | [0, 40] |
| B ₁₄ 农业用水量 (m ³ · 万元 ⁻¹) | [3000, 4000] | [1800, 3000] | [1600, 1800] | [1000, 1600] | [500, 1000] |
| B ₁₅ 生活用水量 (L · 人 ⁻¹ · d ⁻¹) | [150, 300] | [120, 150] | [90, 120] | [50, 90] | [0, 50] |
| B ₁₆ 水环境质量 (%) | [0, 50] | [50, 70] | [70, 80] | [80, 90] | [90, 100] |
| B ₁₇ 秸秆综合利用率 (%) | [0, 60] | [60, 70] | [70, 80] | [80, 90] | [90, 100] |
| B ₁₈ 粪便集中处理率 (%) | [0, 60] | [60, 70] | [70, 85] | [85, 95] | [95, 100] |
| B ₁₉ 文盲和半文盲人数比 (%) | [2, 5] | [1, 2] | [0.5, 1] | [0.1, 0.5] | [0, 0.1] |
| B ₂₀ 城镇密度 (个 · 100 km ⁻²) | [12, 25] | [6, 12] | [3, 6] | [1, 3] | [0, 1] |
| B ₂₁ 农民人均纯收入 (元) | [0, 2000] | [2000, 3000] | [3000, 4000] | [4000, 5000] | [5000, 8000] |
| B ₂₂ 经济密度 (万元 · km ⁻²) | [0, 100] | [100, 300] | [300, 400] | [400, 600] | [600, 1000] |
| B ₂₃ 受保护土地占国土面积比例 (%) | [0, 6] | [6, 9] | [9, 12] | [12, 15] | [15, 20] |
| B ₂₄ 沼气普及率 (%) | [0, 5] | [5, 15] | [15, 20] | [20, 30] | [30, 50] |
| B ₂₅ 科技教育投入占 GDP 比例 (%) | [0, 1] | [1, 3] | [3, 4] | [4, 6] | [6, 10] |
| B ₂₆ 农村发展综合指数 (%) | [0, 60] | [60, 80] | [80, 85] | [85, 95] | [95, 100] |
| B ₂₇ 人均固定资产投资 (元) | [0, 2000] | [2000, 4000] | [4000, 6000] | [6000, 8000] | [8000, 10000] |
| B ₂₈ 第三产业比例 (%) | [0, 20] | [20, 30] | [30, 50] | [50, 64] | [64, 80] |
| B ₂₉ 人均 GDP (元 · 人 ⁻¹) | [0, 5000] | [5000, 8000] | [8000, 10000] | [10000, 16000] | [16000, 24000] |

表 2 O-A 判断矩阵

Tab 2 O-A judgment matrix

| O | A ₁ | A ₂ | A ₃ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A ₁ | 1 | 2 | 0.033 |
| A ₂ | 0.5 | 1 | 0.033 |
| A ₃ | 3 | 3 | 1 |

本)的生态安全状况进行综合评价,各样本生态安全指标值以及 AHP 确定的各指标权重 (表 4)。根

表 3 A₁-B 判断矩阵

Tab 3 A₁-B judgment matrix

| A ₁ | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | B ₅ | B ₆ | B ₇ | B ₈ | B ₉ | B ₁₀ |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| B ₁ | 1 | 0.333 | 0.333 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 1 | 0.333 |
| B ₂ | 3 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 3 | 1 |
| B ₃ | 3 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 3 | 1 |
| B ₄ | 0.333 | 0.2 | 0.2 | 1 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.5 | 0.333 | 0.333 |
| B ₅ | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 1 | 1 |
| B ₆ | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 1 | 1 |
| B ₇ | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 1 | 1 |
| B ₈ | 5 | 3 | 5 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 |
| B ₉ | 1 | 0.333 | 0.333 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.333 | 1 | 0.5 |
| B ₁₀ | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 2 | 1 |

据表 1 评价标准划分的流域生态安全等级为: C₁ = { 很不安全 }, C₂ = { 较不安全 }, C₃ = { 一般安全 }, C₄ = { 较安全 }, C₅ = { 很安全 }。取置信度水平 = 0.70, 由式 (2) 置信度准则判别各样本级别; 应用评分准则则 $n_i = 6 - l$ (l = 1, 2, 3, 4, 5), 按式 (3) 计算各样本分数, 评价结果见表 5。

从表 5 可知, 属性识别模型计算的各评价单

表 4 巢湖流域生态安全评价指标值及权重

Tab 4 Value and weight of evaluation indexes in Chaohu Lake basin

| 指标 | 合肥 | 肥东 | 肥西 | 居巢 | 庐江 | 含山 | 无为 | 和县 | 舒城 | 流域 | 权重 |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B ₁ | 12.11 | 0.24 | 5.99 | 8.31 | 10.18 | 8.58 | 5.54 | 7.35 | 28.7 | 10.34 | 0.0264 |
| B ₂ | 0.007 | 0.082 | 0.072 | 0.057 | 0.062 | 0.051 | 0.063 | 0.077 | 0.043 | 0.055 | 0.0220 |
| B ₃ | 1.551 | 0.598 | 0.548 | 0.643 | 0.793 | 1.635 | 0.680 | 0.877 | 2.169 | 1.029 | 0.0240 |
| B ₄ | 493 | 526 | 769 | 1473 | 957 | 1993 | 936 | 1583 | 1472 | 1015 | 0.0112 |
| B ₅ | 0.44 | 0.506 | 0.327 | 1.412 | 0.687 | 0.539 | 0.425 | 0.826 | 0.392 | 0.59 | 0.0190 |
| B ₆ | 5.4 | 5.5 | 12 | 20 | 18.8 | 20.9 | 19.8 | 20.1 | 14 | 14.8 | 0.0175 |
| B ₇ | 0.5429 | 0.0478 | 0.2333 | 1.4908 | 0.4973 | 3.4786 | 0.0761 | 2.4118 | 1.1486 | 0.7854 | 0.0447 |
| B ₈ | 2654.8 | 481.8 | 417.2 | 384.7 | 504.6 | 419.0 | 561.2 | 457.7 | 467.9 | 534.9 | 0.0566 |
| B ₉ | 74.13 | 74.01 | 70.74 | 58.04 | 78.25 | 84.95 | 79.97 | 70 | 83.99 | 75.54 | 0.0093 |
| B ₁₀ | 1670.8 | 157.5 | 169.7 | 120.9 | 157.6 | 217.2 | 143.8 | 177.5 | 208.8 | 397.4 | 0.0531 |
| B ₁₁ | 101.28 | 101.25 | 124.62 | 247.39 | 185.52 | 200.95 | 157.76 | 157.18 | 362.23 | 192.89 | 0.0094 |
| B ₁₂ | 11.8 | 13.8 | 11.3 | 14.9 | 20.9 | 27 | 18.1 | 22.7 | 43.8 | 17.97 | 0.0189 |
| B ₁₃ | 146.3 | 125.3 | 392.9 | 181.8 | 526 | 276.4 | 477.6 | 160.6 | 150 | 201.4 | 0.0098 |
| B ₁₄ | 4342 | 4472.3 | 8186.9 | 1005.8 | 1353.7 | 2534.2 | 1512.8 | 609.1 | 6900 | 2935.4 | 0.0270 |
| B ₁₅ | 244 | 61.7 | 77.7 | 164.6 | 130.4 | 232.7 | 145.5 | 180 | 61.6 | 130 | 0.0122 |
| B ₁₆ | 69.22 | 96.76 | 23.08 | 78.02 | 91.19 | 82.79 | 74.87 | 82.42 | 69.13 | 81.92 | 0.0217 |
| B ₁₇ | 30 | 70 | 45 | 20 | 68 | 22 | 20 | 28 | 50 | 45.2 | 0.0138 |
| B ₁₈ | 70 | 60 | 70 | 80 | 83.9 | 75 | 72.6 | 76.6 | 77 | 72.6 | 0.0032 |
| B ₁₉ | 2.24 | 6.27 | 5.46 | 5.88 | 3.93 | 8.34 | 5.12 | 2.92 | 6.3 | 5.36 | 0.0115 |
| B ₂₀ | 9 | 13 | 12 | 16 | 16 | 9 | 23 | 8 | 17 | 14 | 0.0126 |
| B ₂₁ | 3877 | 2024 | 2004 | 2271 | 1984 | 2176 | 1960 | 2177 | 1683 | 2239.6 | 0.0126 |
| B ₂₂ | 5182.42 | 133.63 | 88.72 | 247.14 | 116.53 | 170.65 | 178.39 | 144.52 | 123.75 | 305.95 | 0.1016 |
| B ₂₃ | 1.24 | 0.76 | 0.02 | 0.0024 | 0.024 | 0.027 | 0.004 | 0.03 | 0.045 | 0.016 | 0.1082 |
| B ₂₄ | 0.2 | 5.1 | 2.2 | 0.24 | 0.1 | 0.7 | 0.5 | 0.25 | 2.7 | 0.63 | 0.0528 |
| B ₂₅ | 1.13 | 4.06 | 4 | 1.17 | 3.4 | 1.8 | 2.2 | 1.89 | 4.14 | 1.86 | 0.0818 |
| B ₂₆ | 75.77 | 51.47 | 52.31 | 57.80 | 55.20 | 56.79 | 70.39 | 57.35 | 52.35 | 57.98 | 0.0276 |
| B ₂₇ | 8980.4 | 645.9 | 625.4 | 1057.8 | 677.8 | 1406.1 | 1178.8 | 1286.7 | 811.9 | 2160.8 | 0.0654 |
| B ₂₈ | 41.41 | 35.46 | 28.65 | 36.7 | 27.96 | 29.3 | 31.88 | 30.27 | 30.7 | 37.11 | 0.0275 |
| B ₂₉ | 19520.9 | 2773.3 | 2126.9 | 6425.1 | 2309.3 | 4072.5 | 3178.5 | 3157.5 | 2645.9 | 5719.5 | 0.0986 |

B₁, B₂, ..., B₂₉所对应指标同表 1。

表 5 巢湖流域生态安全评价结果

Tab 5 Results of ecological security evaluation in Chaohu Lake basin

| | 综合属性测度 | | | | | 等级 | q _{xi} |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|-----------------|
| | μ _{i1} | μ _{i2} | μ _{i3} | μ _{i4} | μ _{i5} | | |
| 合肥 | 0.462 | 0.121 | 0.073 | 0.122 | 0.222 | | 3.479 |
| 肥东 | 0.671 | 0.086 | 0.090 | 0.057 | 0.096 | | 4.374 |
| 肥西 | 0.702 | 0.092 | 0.133 | 0.016 | 0.057 | | 4.448 |
| 居巢 | 0.577 | 0.288 | 0.049 | 0.046 | 0.041 | | 4.315 |
| 庐江 | 0.669 | 0.146 | 0.095 | 0.030 | 0.059 | | 4.368 |
| 含山 | 0.667 | 0.215 | 0.038 | 0.058 | 0.022 | | 4.365 |
| 无为 | 0.649 | 0.194 | 0.089 | 0.010 | 0.057 | | 4.336 |
| 和县 | 0.669 | 0.163 | 0.050 | 0.073 | 0.044 | | 4.341 |
| 舒城 | 0.690 | 0.132 | 0.095 | 0.019 | 0.064 | | 4.367 |
| 流域 | 0.620 | 0.255 | 0.060 | 0.008 | 0.057 | | 4.179 |

元生态安全等级为:合肥市区生态安全处于 级;肥东、含山、和县、庐江、无为、舒城以及流域整体的生态安全为 级;肥西生态安全为 级。属性识别模型不仅评判各生态安全等级,同时能给出其精确排序,如肥东、居巢、庐江、含山、无为、和县、舒城、流域

整体虽然同属生态安全 级(较不安全),但它们的生态安全状况还是有差别的,生态安全状况从优到劣的排序为流域(4.179)、居巢(4.315)、无为(4.336)、和县(4.341)、含山(4.365)、舒城(4.367)、庐江(4.368)、肥东(4.374)。属性识别模型的概念清晰、数学理论严谨,评价结果不仅能客观地反映流域生态安全的实际情况,而且还能给出各评价样本评分值。如居巢与庐江的生态安全等级虽同属于 级,但二者差异还是较为明显的,一般的综合方法如模糊评判法等却无法给出这种细微差别。

生态安全不仅要反映生态环境状态,更重要的是要反映对生态安全有潜在影响的重要因素的变化情况以及政府与公众的能动性反应。考虑到巢湖流域是重要的农业区,建立生态安全评价指标体系时,选取了大量反映农业、经济和社会方面的指标,而工业污染等方面指标选取较少;在 AHP 赋权过程中,人对生态环境的反馈作用即响应类指标(如经济和

社会发展类指标)被赋予了较大权重。合肥作为安徽省的省会,经济较发达,社会发展较完善,环境保护意识强,环保投入也较大,生态安全状况良好,评级结果为较安全。而巢湖流域其它 8 个县以农业为主要产业,水土流失严重,经济实力和环保意识相对较弱,生态环境保护投入力度不够,生态安全处于较不安全等级(肥西处于很不安全等级)。尽管合肥的生态安全状况较好,但绝大部分地区的生态安全状况较差,就全流域整体而言,仍处于较不安全等级。该评价结果可以识别巢湖流域生态安全状况,为促进巢湖流域资源 社会 经济的协调发展提供了科学的决策依据。

4 结 论

生态安全评价方法选择和数学模型建立是生态安全状况定量化的一个难点,采用 AHP 赋权方法与属性识别模型相耦合的途径,来建立有效的流域生态安全评价模型,这在一定程度上丰富和发展了生态安全评价方法。实例分析表明了巢湖流域生态安全状况从优到劣的排序结果依次为合肥、流域整体、居巢、无为、和县、含山、舒城、庐江、肥东和肥西;合肥和肥西的生态安全状况分别为 级和 级,其它评价单元均处于 级。基于属性识别模型的流域生态安全评价方法涵义明确、计算过程简单,能同时实现生态安全等级的分类和排序,克服了模糊综合评价等方法在样本对各级评价标准的从属度数值相差不大时可能无法作出正确判别的问题,提高了评价结果的分辨率,在具有评价标准的其它生态系统综合评价问题中具有一定的应用价值。当然,属性识别模型与 AHP 赋权方法相耦合的途径,在生态安全评价领域的应用尚属尝试,该模型与其它赋权方法耦合的适用性问题还有待进一步探讨。

参考文献

陈 浩,周金星,陆中臣,等. 2003 荒漠化地区生态安全

- 评价——以首都圈怀柔县为例. 水土保持学报, 17(1): 58 - 62
- 程乾生. 1997. 质量评价的属性数学模型和模糊数学模型. 数理统计与管理, 16(6): 18 - 23
- 郭 奇,曹洪洋. 2004 大气环境质量评价的属性识别法. 环境监测管理与技术, 16(3): 41 - 44
- 贾艳红,赵 军,南忠仁,等. 2006 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例. 生态学杂志, 25(8): 1003 - 1008
- 姜启源. 1999. 数学模型. 北京: 高等教育出版社: 305 - 335.
- 金菊良,黄慧梅,魏一鸣. 2004. 基于组合权重的水质评价模型. 水力发电学报, 23(3): 13 - 19.
- 刘 红,王 慧,张兴卫. 2006 生态安全评价研究述评. 生态学杂志, 25(1): 74 - 78
- 刘 勇,刘友兆,徐 萍. 2004. 区域土地资源生态安全评价——以浙江嘉兴市为例. 资源科学, 26(3): 69 - 75.
- 门宝辉,梁 川. 2002 属性识别方法在水资源系统可持续发展程度综合评价中的应用. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 28(6): 675 - 678
- 王顺久,李跃清. 2006 投影寻踪模型在区域生态环境质量评价中的应用. 生态学杂志, 25(7): 869 - 872
- 吴开亚,何 琼,孙世群. 2004a 区域生态安全的主成分投影评价模型及应用. 中国管理科学, 12(1): 106 - 109.
- 吴开亚,李如忠,孙世群,等. 2004b 区域生态环境的未知测度模型评价及应用. 环境科学研究, 17(2): 24 - 28
- 肖荣波,欧阳志云,韩艺师,等. 2004 海南岛生态安全评价. 自然资源学报, 19(6): 769 - 775.
- 谢花林,张新时. 2004 城市生态安全水平的物元评判模型研究. 地理与地理信息科学, 20(2): 87 - 90
- 张艳芳,任志远. 2006 区域生态安全定量评价与阈值确定的方法探讨. 干旱区资源与环境, 20(2): 11 - 16
- 甄 苓,王来生. 2000 属性层次模型的决策方法与应用. 中国农业大学学报, 5(6): 8 - 11.
- 左 伟,周慧珍,王 桥. 2003 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究. 土壤, 35(1): 2 - 7.

作者简介 吴开亚,男,1968年生,博士,副教授。主要从事生态经济方面的研究,发表论文 40 余篇。E-mail: wuky2000@vip.sina.com
责任编辑 刘丽娟