

# 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价

周文华, 王如松\*

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 采用基于熵权的模糊数学评价方法, 借助于相对隶属度的概念评价了北京城市生态系统在某一特定时间内(1996~ 2003 年)的相对健康状态。方法避免了主观判断城市生态系统健康标准的不确定性。评价结果表明: (1) 1996~ 2003 年, 北京市相对健康状态整体呈上升趋势, 最优年为 2003 年, 最差年为 1996 年; (2) 按照最大隶属度原则, 人类健康要素的最大隶属度 0.967 (2002), 生物群落的最大隶属度 1.000 (2003), 社会的最大隶属度 1.000 (2003), 经济的最大隶属度 0.938 (2003), 人工环境的最大隶属度 1.000 (2003), 自然环境的最大隶属度 0.795 (1998), 自然与社会经济的相互作用的最大隶属度 0.916 (2002), 对区域的影响的最大隶属度 1.000 (1996)。各评价要素的最大隶属度主要集中于 2003 年, 其概率为 37.5%。

**关键词:** 城市生态系统健康; 模糊综合评价; 熵权; 相对隶属度; 北京

文章编号: 1000-0933(2005)12-3244-08 中图分类号: O 159, Q 148 文献标识码: A

## An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China

ZHOU Wen-Hua, WANG Ru-Song\* (Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3244~ 3251

**Abstract** This research assessed the health conditions of the Beijing urban ecosystem from 1996 to 2003 through use of a fuzzy logic approach on entropy weight. The relative membership method used here avoided the uncertainty in estimating the standard of urban ecosystem health subjectively. The results showed that: (1) The relative health status of Beijing urban ecosystem health increased from 1996 to 2003. The most healthy year was 2003, and the least healthy year was 1996. (2) Based on the maximum membership degree principle, the maximum membership degree in human health group was 0.967 (2002), in biotic community group was 1.000 (2003), in social group was 1.000 (2003), in economic group was 0.938 (2003), in built-up environment group was 1.000 (2003), in natural environment group was 0.795 (1998), in interaction group between natural and social economic environment was 0.916 (2002), and in the impact on larger ecosystem group was 1.000 (1996). The maximum membership degree among all groups was in 2003, with a probability of 37.5%.

**Key words:** urban ecosystem health; fuzzy logic approach; entropy weight; relative membership; Beijing

城市是一个社会-经济-自然的复合生态系统<sup>[1]</sup>, 它不同于自然生态系统, 然而城市、住区和支持城市的系统却形成了模拟自然生态系统功能的复杂结构。因此“生态系统健康”(Ecosystem Health) 不仅应关注自然生态系统的健康和完整性<sup>[2-8]</sup>, 而且也关注城市内生活的人类的社会经济、文化和政治状态与城市环境之间复杂的相互作用。城市生态系统健康(Urban

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性研究资助项目(KZCX3-SW-424)

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2005-09-15

作者简介: 周文华(1974~), 女, 辽宁丹东人, 博士, 主要从事城市生态系统健康研究。E-mail: zwh3429@yahoo.com.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangrs@mail.cees.ac.cn

Foundation item: Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (No. KZCX3-SW-424)

Received date: 2005-04-22; Accepted date: 2005-09-15

Biography: ZHOU Wen-Hua, Ph. D., mainly engaged in urban ecosystem health. E-mail: zwh3429@yahoo.com.cn

Guidotti T. Urban ecosystem health: a new compass point for ecosystem health. In the 3rd international course ecosystem health: Ecosystem health-new thinking for new challenges. 2003

McMullan C. Indicators of urban ecosystem health. International development research center (DRC), Ottawa <http://www.idrc.ca/ecohealth/indicators.html> 1999

Ecosystem Health) 是指城市人居环境的健康, 即它作为一个群落和一个生态系统如何良好运行(包括城市生态系统内的植物和动物等生物群落健康), 和城市生态系统内人类种群的健康。目前, 国内外城市生态系统健康的评价研究不多, 多停留在理论探索阶段<sup>[10, 11]</sup>, 而且, 无论对于自然生态系统健康还是城市生态系统健康的评价研究, 其难点聚焦在“健康”状态标准的判定上, 尽管不少国外学者提出了以未经过人类干扰的生态系统的原始状态<sup>[12~14]</sup>, 以演替的“顶级状态”<sup>[15]</sup>, 以生命诞生前的热力学平衡态<sup>[16~18]</sup>等作为自然生态系统的健康状态; 以生态城市作为城市生态系统的健康状态<sup>[19, 20]</sup>, 但是此问题仍是国内外学者争论的焦点, 学者们并没有就此问题达成一致意见, 因此本文采用模糊数学的方法, 用相对隶属度的概念评价北京城市生态系统在 1996~2003 年的相对健康状态, 避免了主观判断生态系统健康标准的不确定性。

## 1 方法

自然生态系统健康评价主要有指示物种法和系统指标评价法两种。鉴于生态系统的复杂性有必要使用指示类群监测生态系统健康, 但是根据 Hilty 等对作为自然生态系统健康指示生物的 100 种脊椎动物和 32 种无脊椎动物类群的研究发现大多数指示物种都缺乏与生态系统变化的相关关系, 目前选择指示生物的标准存在问题<sup>[21]</sup>; 而系统指标法通常采用能够代表系统结构、功能和过程的指标综合反映系统的健康程度, 由于其提供信息的全面性和综合性而被广泛使用在森林、河流、湿地等生态系统的健康评价中。因此, 本文应用系统指标法评价城市生态系统健康。

目前应用的城市生态系统指标评价方法主要有主成分分析法、层次分析法、能值分析法、生态学分析法、模糊评价法、神经网络法等。这些评价方法各有优点和适应范围, 在分析不同问题时需根据实际情况确定采用的评价方法。模糊数学是处理现实世界中客观存在的模糊现象的一种精确的数学方法。在普通集合中, 任一元素只能是或属于该集合, 或不属于该集合, 二者择其一; 而在模糊集合中, 很难确定某一元素是属于该集合或者是不属于该集合, 即该集合中的元素存在亦此亦彼的特点。城市生态系统健康正是这样一种具有模糊性质的概念, 由于“健康”、“不健康”的定义没有明确的边界, 例如在 1996~2003 年的城市生态系统评价中, 很难明确回答 1996 年的北京城市生态系统是否属于健康这一集合, 比较合理的回答是 1996 年北京城市生态系统有某种程度的“健康”成分, 也有某种程度的“不健康”成分。因此城市生态系统健康的评价就是一个模糊集合。

基于熵权的北京生态系统健康模糊综合评价的程序分为 6 步: 指标识别与选择、设定模糊评价集、建立相对隶属度矩阵、确定权重分配向量、建立综合评价矩阵、分析评价结果。根据最大隶属度的原则确定 1996~2003 年北京城市生态系统健康的优劣排序。

### 1.1 指标识别与选择

Hancock 认为城市生态系统健康包括 6 个不同的范畴:

- (1) 城市人口在身体和心理方面的健康状态, 包括健康和福利在社区不同部分之间的分配(健康平等);
- (2) 城市社区的健康- 它的社会福利- 包括社会的、经济的和文化的状况, 管理过程的有效性(包括教育、参与和获取决策力), 和这些以及其它健康决定因素的分配(社会平等);
- (3) 人工环境的质量包括住房质量方面、交通、污水排放和水供应、道路和公共交通系统、公园和娱乐设施和其它文明设施;
- (4) 城市环境在空气、水、土壤和噪音污染方面的质量, 这是环境质量的测量方法;
- (5) 生物群落的健康, 包括生境质量和遗传的、物种的多样性;
- (6) 城市生态系统对自然生态系统的影响(城市生态系统是自然生态系统的一部分, 城市生态足迹), 这是环境可持续性的估量方法。

上述评价指标体系较好的总结了城市系统的关键要素, 但是这种方法的着眼点在要素或局部, 虽然在几百年来特定范围内行之有效, 但是它不能如实地说明城市系统的整体性, 不能反映城市系统要素之间的相互作用和联系, 它只适应认识较为简单的事物, 而不胜任于对城市这一复杂系统的研究。因此本文在构建北京生态系统健康的评价指标体系时, 增加了自然与社会经济环境的相互作用要素, 使之更加完善; 另外, 在指标选取过程中, 由于一部分指标的不可获得性和数据监测方法的不一致性等原因只能使用其它的指标来代替, 如以每公顷耕地的化肥、农药使用量代替土壤的质量; 以绿化覆盖率、自然保护区面积来代替生物群落健康的指标; 以非正常死亡率表示政府管理能力等, 或暂时搁置没有列入指标栏中, 如人群心理健康指标的判定等。据此提出的北京城市生态系统健康的评价指标体系共包括八种要素, 29 个类别, 48 个指标(表 1)。

由于各评价指标之间可能存在着重复性, 需要对原始指标进行相关性检验, 采用 SPSS 的 Pearson 相关性分析工具对各要

Hancock, T. 2000. Urban ecosystems and human health. A paper prepared for the seminar on CID-DRC and urban development in Latin America, Montevideo, Uruguay, April 6~7 2000. <http://www.idrc.ca/lacro/does/conferencias/hancock.html>

Hancock, T. 2000. Urban ecosystems and human health. A paper prepared for the seminar on CID-DRC and urban development in Latin America, Montevideo, Uruguay, April 6~7 2000. <http://www.idrc.ca/lacro/does/conferencias/hancock.html>

表 1 北京城市生态系统健康评价指标体系

Table 1 The indicator system of Beijing ecosystem health assessment

要素 Component	类别 Catalogue	原始指标 Ordinary indicators	评价指标 Processed indicators	熵权 Entropy weight	
I 人类健康	1 人群健康	(1) 人口自然增长率			
		(2) 婴儿死亡率		0.137	
	2 健康平等	(3) 人口死亡率集中指数		0.040	
		3 文化教育	(4) 万人在校大学生数		
	(5) 文化教育娱乐消费支出比重				
	4 健康服务		(6) 千人拥有医生数		
		(7) 千人拥有医院床位		0.002	
II 生物群落	5 自然保护区	(8) 自然保护区面积			
	6 绿地	(9) 绿化覆盖率			
		(10) 人均公共绿地面积(包括水面)		0.045	
III 社会	7 生活质量	(11) 城镇居民恩格尔系数		0.038	
		(12) 农村居民恩格尔系数			
	8 社会公平	(13) 城乡居民可支配收入比			
		9 社会安定	(14) 失业率		
	(15) 每万人刑事犯罪案件受理数				
	10 政府管理能力	(16) 非正常死亡率			
IV 经济	11 经济活力	(17) 人均 GDP			
		(18) GDP 年均增长率		0.085	
		(19) 通货膨胀率			
	12 经济效率	(20) 万元 GDP 能耗			
		(21) 万元 GDP 水耗		0.235	
V 人工环境	13 住房	(22) 人均居住面积		0.022	
	14 公共交通	(23) 每万人拥有公共车辆数			
	15 水供给设施	(24) 自来水供水面积			
	16 污水处理设施	(25) 污水管铺设长度			
	17 供热设施	(26) 热化率			
	18 供气设施	(27) 气化率			
	19 道路	(28) 每公里道路车辆数			
	20 公园	(29) 公园面积			
	VI 自然环境	21 空气	(30) SO <sub>2</sub> 年平均浓度		
			(31) TSP 年平均浓度		0.034
(32) NO <sub>x</sub> 年平均浓度				0.014	
22 地表水		(33) 达标河段占实测河段长度比重		0.014	
		(34) 达标湖泊容量百分比			
		(35) 达标水库容量百分比		0.001	
23 地下水		(36) 年末地下水埋深		0.089	
24 土壤		(37) 每公顷耕地使用化肥量		0.003	
		(38) 每公顷耕地农药施用量		0.197	
25 噪声		(39) 建成区道路交通噪声平均值			
	(40) 建成区区域噪声平均值				

续表 1

要素 Component	类别 Catalogue	原始指标 Ordinary indicators	评价指标 Processed indicators	熵权 Entropy weight
V II 自然与社会经济相互作用	26 土地利用	(41) 林地所占比重		0.003
	27 环境管理	(42) 城市污水处理率		
		(43) 工业固体废物综合利用率		0.004
		(44) 工业废水排放达标率		
		(45) 生活垃圾无害化处理率		
		(46) 环境投资占 GDP 的比值%		
	28 公众参与	(47) 环境问题公众来信来访数		
V III 对区域影响	29 生态影响	(48) 生态足迹 与生态承载力的比值		0.038

数据来源北京市统计年鉴 1996~ 2003, 北京市水资源公报 1996~ 2003 和北京市环境质量公报 1996~ 2003 The data come from Beijing Statistic Yearbook published by Beijing Statistic Bureau (1996~ 2003), Beijing Water Resources Bulletin organized by Beijing Water Authority (1996~ 2003), and Beijing Environmental Quality Bulletin organized by Beijing Environment Protection Bureau (1996~ 2003, unpublished); 由交通事故和火灾死亡人数的比重计算的非正常死亡率 Represents population death rate for abnormal reasons calculated by the sum of proportion of population death rate of traffic accident and fire disaster in total population death rate; 公共车辆指公共汽车, 小公共汽车, 无轨电车和地铁机车 Public traffic vehicles indicate that bus, mini-bus, trolleybus, and subway; 生态足迹按照食物资源与能源帐户来计算, 参数参照 Wackernagel<sup>[22]</sup> 计算中国生态足迹时的参数定义 Ecological footprint is calculated by food and energy accounts based on the parameters of Wackernagel<sup>[22]</sup> in calculating the ecological footprint of China

I Human health, II Biotic community, III society, IV Economy, V Built-up environment, VI Natural environment, VII Interactive action between natural and social economic environment, VIII Impact on regional system

1 Population health, 2 Health equality, 3 Cultural education, 4 Health service, 5 Natural conservation area, 6 Green areas, 7 Life quality, 8 Social equality, 9 Social stability, 10 Government management power, 11 Economic vigor, 12 Economic efficiency, 13 Housing, 14 Public transport, 15 Water supply facility, 16 Sewage water facility, 17 Heating supply facility, 18 Gas supply facility, 19 Roads, 20 Park, 21 Air, 22 Surface water, 23 Groundwater, 24 Soil, 25 Noise, 26 Land use, 27 Environment management, 28 Public participation, 29 Ecological influence on regional ecosystem

(1) Population natural growth rate, (2) Infant death rate, (3) Population death rate CI, (4) Average number of undergraduate student per 10000 population, (5) Percentage of education, cultural, and recreation expenditures on living expenditures, (6) Doctors per 10000 population, (7) Hospital beds per 10000 population, (8) Area of natural reserves, (9) Coverage of city green areas, (10) Per capita public green area (including surface water area), (11) Engel coefficient of urban households, (12) Engel coefficient of rural households, (13) Ratio of annual discretionary urban household income to rural household income, (14) Unemployment rate, (15) Criminal cases accepted and closed by court per 10000 population, (16) Population death rate for abnormal reasons, (17) GDP per capita, (18) Average annual GDP growth rate, (19) Inflation rate, (20) Energy consumption per 10000 GDP, (21) Water consumption per 10000 GDP, (22) Housing area per capita, (23) Public traffic vehicles per 10000 population, (24) Area of water supply, (25) Length of sewage pipes, (26) The rate of households with access to heating, (27) The rate of the gasification of the resident, (28) The number of vehicles per kilometer, (29) Area of parks, (30) Average annual SO<sub>2</sub> concentration, (31) Average annual TSP concentration, (32) Average annual NO<sub>x</sub> concentration, (33) Percentage of river compliance, (34) Percentage of lake compliance, (35) Percentage of reservoirs compliance, (36) Year-end groundwater depth, (37) Consumption of chemical fertilizer per hectare cropland, (38) Consumption of pesticide per hectare cropland, (39) Average of traffic noise, (40) Average noise value, (41) Percentage of forestry area, (42) Urban wastewater treatment rate, (43) Industrial solid waste comprehensive utilization, (44) Industrial wastewater effluent compliance, (45) Domestic garbage treatment rate, (46) Percentage of environment invest, (47) Public appealing times on environment issues, (48) The ratio of ecological footprint to ecological capacities

素内部指标间的两两相关性进行分析处理。此处以人类健康组的相关分析矩阵为例进行说明, 表 2 中显示指标 (3) 和 (7) 与其它指标并无相关性, 予以保留, 而其余指标均不同程度的相关 ( $p < 0.05$ ), 根据分析结果指标 (2) 予以保留。由于相关分析是寻求数据在统计学上关系的一种方法, 也就是说即使是毫无联系的指标之间也可能存在统计学上的相关性, 因此在判断指标相关性结果时, 保留哪个指标成为了难点, 本文采取统计学分析与主观判断相结合的原则, 因此虽然指标 (2) 与其他指标间的相关性并不强于指标 (4)、(5) 和 (6), 仍予以保留。其它要素类指标的处理方式同上。最终分析结果表明 62.5% 的指标与 37.5% 的指标具有很强的相关性 ( $p < 0.05$ ), 需要合并指标, 结果如表 1, 经过处理后保留了 18 个指标。

表 2 人类健康要素组内指标间的相关关系矩阵

Table 2 The bivariate correlations among the indicators in the human health group

指标 Indicators	相关系数 Pearson correlation						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	1	0.813(*)	-0.262	-0.716(*)	-0.804(*)	0.754(*)	-0.109
	0.000	0.014	0.531	0.046	0.016	0.031	0.797
(2)	0.813(*)	1	-0.440	-0.793(*)	-0.839(**)	0.832(*)	-0.495
	0.014	0.000	0.276	0.019	0.009	0.010	0.213
(3)	-0.262	-0.440	1	0.207	0.104	-0.046	-0.117
	0.531	0.276	0.000	0.623	0.807	0.914	0.782
(4)	-0.716(*)	-0.793(*)	0.207	1	0.940(**)	-0.945(**)	0.159
	0.046	0.019	0.623	0.000	0.001	0.000	0.707
(5)	-0.804(*)	-0.839(**)	0.104	0.940(**)	1	-0.936(**)	0.320
	0.016	0.009	0.807	0.001	0.000	0.001	0.439
(6)	0.754(*)	0.832(*)	-0.046	-0.945(**)	-0.936(**)	1	-0.293
	0.031	0.010	0.914	0.000	0.001	0.000	0.481
(7)	-0.109	-0.495	-0.117	0.159	0.320	-0.293	1
	0.797	0.213	0.782	0.707	0.439	0.481	

\* 显著性水平在 0.05 水平(双侧检验)Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); \*\* 显著性水平在 0.01 水平(双侧检验)Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

1.2 模糊集设定

根据北京市生态系统健康评价的时间, 指标和评价内容, 设定评价对象集  $O = \{1996, 1997, 1998, \dots, 2003\}$ , 指标集  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{18}\}$  与评语集  $V = \{\text{健康, 不健康}\}$ , 为了便于计算, 使用 2 个等级健康和 unhealthy 作为评语集的两个属性。

1.3 相对隶属度矩阵

在模糊集合中, 通常用隶属度来表达其本质, 但是绝对隶属度的确定含有人脑思维的加工过程, 会有一些的主观成分, 而相对隶属度的出现可以减少甚至消除在确定隶属度过程中主观任意性的缺陷, 相对隶属度是指在有限的论域中的不同决策之间作优劣比较, 与论域外的决策无关<sup>[23]</sup>。相对隶属度概念的提出不仅使隶属度与隶属函数的概念更加完善, 而且还巧妙的弥补了国内外在“生态系统健康”评价中的难点问题。

根据相对隶属度的这一属性, 在模糊集设定的基础上, 建立了北京城市生态系统健康评价的相对隶属度矩阵  $R$ , 即相对健康隶属度  $R_h$ , 相对不健康隶属度  $R_{uh}$ 。由于各指标的量纲和属性不一致, 需要通过某种数学变换来消除指标的量纲, 计算其相对健康隶属度为  $[0, 1]$  之间, 1 表示 1996~2003 年内某一年的某一指标相对于其它年的同一指标的健康状态; 0 表示 1996~2003 年内某一年某一指标相对于其它年同一指标的不健康状态。0~1 区间表示相对于 1 或 0, 即健康或不健康状态的隶属程度。

(1) 正指标相对健康隶属度公式:

$$u_h = \begin{cases} 1 & x = x_{max} \\ \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} & x_{min} < x < x_{max} \\ 0 & x = x_{min} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 逆指标相对健康隶属度公式:

$$u_h = \begin{cases} 1 & x = x_{min} \\ \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} & x_{min} < x < x_{max} \\ 0 & x = x_{max} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 相对健康隶属度与不健康隶属度的关系:

$$u_h + u_{uh} = 1 \quad (3)$$

式中,  $U_h$  表示各指标的健康隶属度,  $U_{uh}$  表示各指标的不健康隶属度。

(4) 相对隶属度矩阵如下:

$$R_h = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $r_{ij} = u_h(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 18$ ;  $j = 1, 2, \dots, 8$

### 1.4 权重-熵权法

权重用来表示各指标变量或要素对于上一层次等级要素的相对重要程度的信息, 通常权重的确定方法有主观赋权和客观赋权两种. 主观赋权法如综合指数法, 德尔菲法等是依据研究者的实践经验和主观判断来确定, 客观赋权法如主成分分析法, 因子分析法, 熵权法等是依据指标反映的客观信息来反映其相对重要程度. 为尽量减少主观因素对各指标相对重要程度的影响, 本文采用熵权法计算.

熵 (Entropy) 的概念源于热力学, 用来描述离子或分子运动的不可逆现象, 后在信息论中度量事物出现的不确定性. 现被许多学者用来作为多元综合评价中权重的确定方法<sup>[24, 25]</sup>, 信息熵权的原理为: 对于某项指标, 指标值间的差距越大, 表明该指标在综合评价中所起的作用越大, 如果差异为零, 表明该指标在综合评价中不起作用.

根据表 1 所示权重的计算结果, 可以看出 18 个指标的熵权中前 3 位为万元 GDP 水耗 (0.235)、每公顷耕地农药施用量 (0.197) 和婴儿死亡率 (0.137); 最后 3 位是达标水库容量百分比 (0.001)、千人拥有医院床位 (0.002) 和林地所占比重 (0.003). 结果符合北京的实际情况, 适合作为北京城市的生态系统健康评价的权重确定方法.

### 1.5 综合评价矩阵

根据相对健康隶属度矩阵和各指标权重, 建立综合评价矩阵

$$B = w \cdot R_h \tag{5}$$

## 2 结果

(1) 1996~ 2003 年北京城市生态系统健康总评价结果为: {0.273, 0.451, 0.592, 0.549, 0.714, 0.761, 0.780, 0.817}, 根据最大隶属度原则北京城市生态系统的健康优劣排序结果为 2003, 2002, 2001, 2000, 1998, 1999, 1997, 1996. 根据评价结果 (图 1) 可以看出从 1996 到 2003 年间, 北京市城市生态系统健康除了 1999 年下降外, 整体上相对稳定上升的.

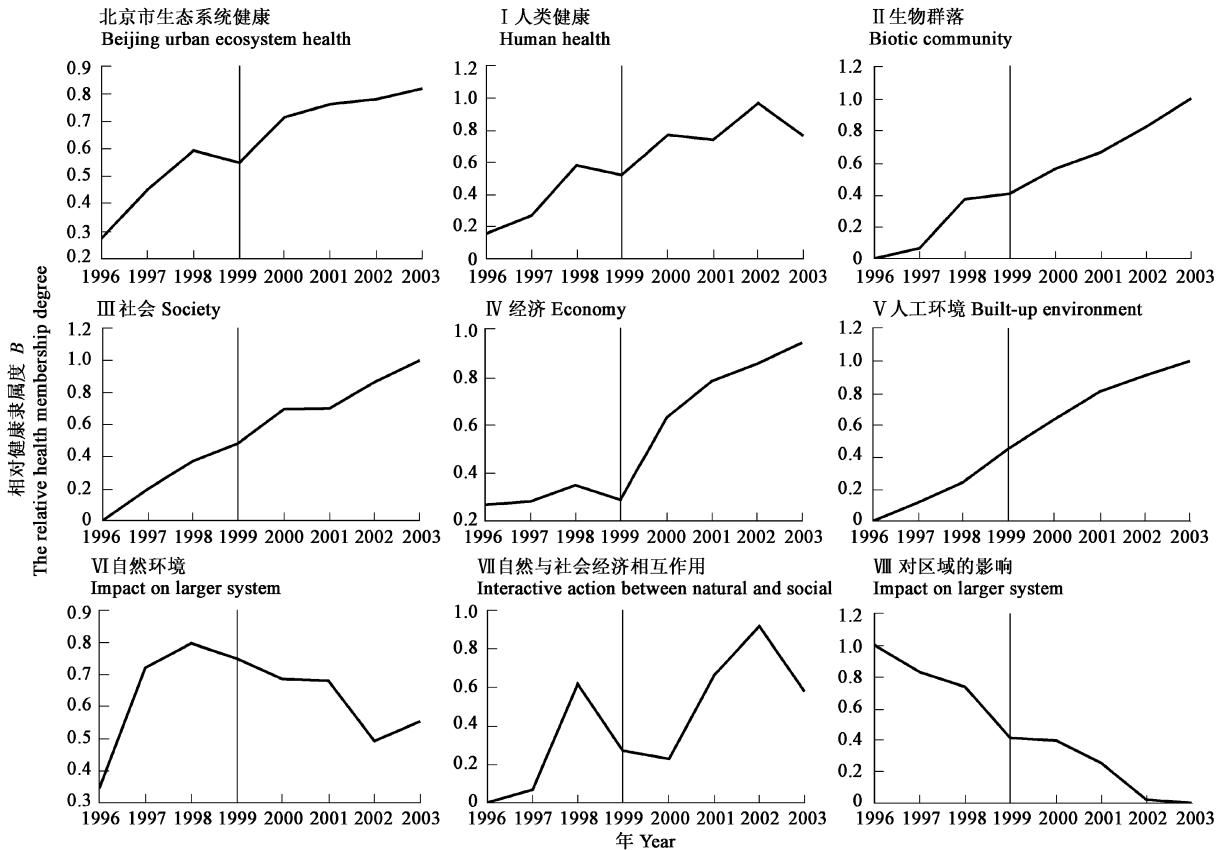


图 1 1996~ 2003 年北京城市生态系统整体及各要素相对健康评价图

Fig. 1 The map of relative health assessment of Beijing urban ecosystem and all the group within it

(2) 1996~ 2003 年北京城市生态系统各评价要素按最大隶属度原则排序结果如图 1 所示: 人类健康要素的最大隶属度

0.967(2002), 即 2002 年为  $8a$  中的此要素的相对健康状态, 同理, 生物群落的最大隶属度 1.000(2003 年), 社会的最大隶属度 1.000(2003), 经济的最大隶属度 0.938(2003), 人工环境的最大隶属度 1.000(2003), 自然环境的最大隶属度 0.795(1998), 自然与社会经济的相互作用的最大隶属度 0.916(2002), 对区域的影响的最大隶属度 1.000(1996)。各评价要素的最大隶属度主要集中于 2003 年, 其概率为 37.5%。

(3) 由上述分析结果可以看出: 北京市  $8a$  来的总体建设取得了很好的成绩, 城市生态系统的相对健康程度正在逐步上升, 但是也不否认尽管某些要素的整体趋势较好如: 人类健康, 生物群落, 社会, 经济和人工环境要素, 仍有某些要素的相对健康状态令人担忧, 主要是自然环境和对区域的影响要素; 由于自然与社会经济的相互作用极为复杂, 因此其随时间的发展并没有明显的趋势, 其原因有待于进一步探讨; 1999 年北京市生态系统相对健康状态下降的原因是由于 1999 年人类健康、经济、自然、自然与经济的相互作用要素的相对健康隶属度均下降造成的。

### 3 结论与讨论

根据上述分析, 可以得出以下结论和讨论:

(1) 此方法简便易行, 避免了长期困扰国内外生态系统健康研究领域健康标准的判定给评价结果带来的不确定影响的问题, 但是由于数据获得性等限制, 还有许多因子如生物多样性, 土壤质量状态等并未考虑, 且研究年限仅为  $8a$ , 跨越时间并不长, 而只有长时间序列的城市生态系统健康研究才可以对其健康演变进行深入分析, 为进一步探讨城市生态系统的健康状况奠定基础, 因此北京城市生态系统健康的未来研究尚有继续发展的空间。

(2) 由于城市生态系统是一个社会-经济-自然复合生态系统, 城市系统中各要素不是孤立地存在, 每个要素在系统中都处于一定的位置上, 起着特定的作用。要素之间相互关联、互相依存、互相影响, 构成了一个不可分割的有机整体, 因此在评价过程中需要综合考虑之间的相互作用。

(3) 北京城市生态系统健康的评价结果: 1996~2003 年中北京市相对健康状态为 2003 年, 相对不健康状态为 1996 年;  $8a$  来人类健康, 生物群落, 社会, 经济和人工环境要素整体发展趋势较好, 自然环境和对区域的影响要素整体发展趋势较差。此结果可以为决策者和公众提供的正面信息为  $8a$  来北京的总体建设取得了较好的成绩, 负面信息为北京市的自然环境状态令人担忧, 应继续加强以治理大气污染, 改善大气环境质量, 控制水体污染, 建设节水城市为主的城市环境发展战略, 另外北京市的发展是建立在对区域的生态影响的基础之上的, 北京的生态足迹远远超出了其土地本身的生态承载力, 首都今后的发展急需考虑减少北京对区域的生态影响。

(4) 在指标要素内部的相关性检验中, 尽量保持客观性检验, 但是如果评价指标间的相关性结果较难判断和取舍时, 宜采用统计学分析与主观判断相结合的原则, 因为主观判断是基于目前城市生态学研究的基本认识, 但是国内外在城市生态系统结构、功能和过程的机理研究中还远不够, 认识有待逐步深入, 这也是为什么本文并没有考虑要素之间的相关性的原因, 因此随着城市生态学的进一步发展, 城市生态系统各要素之间的相互关系才能更为清晰, 判断才能更为准确。

(5) 标准化方法和指标赋权是该综合评价的核心, 但是由于目前国内外尚无权威的赋权方法, 主观和客观赋权法均有其缺点, 本文采取的极差法的缺陷在于很难判断该指标是正指标或是逆指标, 因为事实上大多数指标是相对最优值的正(逆)指标, 而最优值的确定非常困难, 国内外尚无更好的方法, 因此标准化方法和赋权问题仍是需要进一步研究的问题。

### References

- [1] Wang R S. Toward ecopolis: urban ecology and its development strategy. *Journal of City and Planning*, 1991, 18 (1): 1~ 17.
- [2] Rapport D J, Regier H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress. *Am. Nat.*, 1985, 125: 617~ 640.
- [3] Karr J R, Fausch K D, Angemeier P L, et al. Assessing Biological Integrity in Running Waters: A Method and its Rationale. Champaign, Illinois National History Survey. Special Publication 5, 1986.
- [4] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: Costanza R, Norton B G, Haske B D, eds. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington, DC: Island Press, 1992. 239~ 256.
- [5] Rapport D J, Gandet C L, Callow P. *Evaluating and monitoring the health of large scale ecosystem*. Berlin: Springer verlag, 1994.
- [6] Rapport D J, Epstein P R, and Levins R, et al. *Ecosystem Health*. Oxford: Blackwell Science, 1998. 1~ 356.
- [7] Rapport D J, Lasley W L, Rolston D E, et al. *Managing for Healthy Ecosystem*, LLC: CRC Press, 2002.
- [8] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, et al. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355~ 370.
- [9] Guidotti T L. Perspective on the health of urban ecosystems. *Ecosystem health*, 1995, 1(3): 141~ 149.
- [10] Annalee Y, Pedro M, Mariano B, et al. Applying an ecosystem approach to the determinants of health in centro Habana. *Ecosystem health*, 1999, 5(1): 3~ 19.

- [11] Jerry M S, Mariano B, Annalee Y, *et al*. Developing ecosystem health indicators in centro Habana: a community-based approach. *Ecosystem health*, 2001, **7**(1): 15~ 26
- [12] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, **1**: 201~ 213
- [13] Wicklums D, Davies R W. Ecosystem health and integrity? *Canadian Journal of Botany*, 1995, **73**: 997~ 1000
- [14] Costanza R, Mageau M, Norton B, *et al*. Predictors of ecosystem health. In: Rapport D, Costanza R, Epstein P R, *et al* eds. *Ecosystem Health*. Malden, Massachusetts: Blackwell Science Inc, 1998. 240~ 257.
- [15] Callicott J B. Aldo Leopold's metaphor. In: Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. *Ecosystem Health: New goals for environmental management*. Washington D C: Island Press, 1992. 42~ 56
- [16] Jorgensen S E, Mejer H. Ecological buffer capacity. *Ecological Modelling*, 1977, **3**: 39~ 61.
- [17] Jorgensen S E. Ecosystem theory, ecological buffer capacity, uncertainty and complexity. *Ecological Modelling*, 1990, **52**: 125~ 134
- [18] Xu F L, Jorgensen S E, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modelling*, 1999, **116**: 77~ 106
- [19] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, **22**(6): 525 ~ 529
- [20] Richard R. *Ecocities: Building Cities in Balance with Nature*. Berkeley: Berkeley hills books, 2002
- [21] Hilty J, Merenlender A. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, 2000, **92**: 185~ 197.
- [22] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al*. Ecological footprints of Nations, Commissioned by the Earth Council for the Rio Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, Toronto, 1997.
- [23] Chen S Y, Talking about the relative membership degree. *Exploration of Nature*, 1993, **12**(44): 25~ 27.
- [24] Mond L, Cheng C H, Lin J C. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, **62**(2): 127~ 134
- [25] Zhang W M, An J W, Han C. The application of entropy weight on the assessment of urban sustainable development. *Quantitative and Technical Economics*, 2003, (6): 115~ 118

#### 参考文献:

- [19] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 525~ 529.
- [23] 陈守煜. 论相对隶属度. *大自然探索* 1993, **12**(44): 25~ 27.
- [25] 张卫民, 安景文, 韩朝. 熵值法在城市可持续发展评价问题中的应用. *数量经济技术经济研究*, 2003, (6): 115~ 118