

# 基于模糊数学模型的城市生态系统健康动态变化评价

官冬杰, 苏 印, 何政春

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘 要:**城市生态系统健康与否关系到城市的可持续发展,开展城市生态系统健康评价研究可为制订城市规划、生态和环境保护规划提供科学的依据。以重庆市为例,选取城市生态系统活力、组织结构、恢复力、服务功能和动态变化 5 个方面,作为城市生态系统健康评价的指标体系。基于主成分分析法确定指标的权重,运用模糊数学评价方法对重庆市 2004—2011 年的生态系统健康状况进行评价分析,另外,为了反映重庆市生态系统健康的优劣程度,选取上海、青岛和成都 2011 年的生态系统健康状况与重庆作横向对比评价。结果表明:重庆市 2004—2011 年生态系统健康状况呈逐年良性发展态势;在 2011 年城市生态系统健康状况对比评价中,上海最优,成都其次,重庆第三,青岛相对最差。最后,提出了改善城市生态系统健康水平的建议。

**关键词:**生态系统; 健康; 主成分分析法; 模糊数学; 重庆市

**中图分类号:**X171

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)05-0150-07

## Dynamic Evaluation on Urban Ecosystem Health Based on Fuzzy Mathematics Model

GUAN Dong-jie, SU Yin, HE Zheng-chun

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The health of urban ecosystem is related to the sustainable development of cities. The study of the urban ecosystem health assessment could provide the criterion for formulating schedules about the urban development and the protection of ecological environment. We took the vigor of urban ecological system, organization structure, restoring force, service function and dynamic change as the healthy criterion for the urban ecological system and applied the criterion to Chongqing City. This paper ensured the weight factor of the criterion, and adapted fuzzy mathematical evaluation method to analyze the ecological system health condition of Chongqing City from 2004 to 2011 by using principal component analysis. On the other hand, in order to identify how well the ecosystem of Chongqing City is, in corresponding, we chose other three cities, Chengdu, Shanghai and Qingdao to compare their ecosystem health condition in 2011 with Chongqing. The comparison result showed that Chongqing's ecosystem health condition was growing better yearly from 2004 to 2011; in 2011, at the evaluation of these four cities' ecosystem health condition, Shanghai is the best, followed by Chengdu and Chongqing, Qingdao City is relatively the worst. At last, this paper gave some suggestions for how to improve the urban ecosystem health condition.

**Key words:** ecosystem; health; principal component analysis (PCA); fuzzy mathematics; Chongqing City

随着全球经济的快速增长,生态环境问题日益突出,人类赖以生存和生产的生态环境不断恶化,资源日益枯竭,自然灾害频繁发生,维系经济发展和人类健康乃至全社会可持续发展的生态环境容量急剧缩减。近年来,生态系统健康评价已成为国际生态领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>,20 世纪 80 年代后期以 Schaeffer 和

Rapport 为代表的生态学家对生态系统健康的概念重新定义<sup>[4-5]</sup>,Schaeffer 等认为生态系统的功能在没有超过临界值的时候,生态系统健康一直在朝前发展,在这里临界值定义为当超过时会增加维持生态系统的不利风险的任何条件或状态。Rapport 等在 1998 年将生态系统健康的概念总结为“以符合适宜

收稿日期:2013-11-14

修回日期:2013-12-15

**资助项目:**国家自然科学基金(41201546,41261038);重庆市自然科学基金(cstc2012jjA20010);国家十二五科技支撑计划专题(2011BAC02B02);国家十二五科技支撑计划项目(2012BAJ25B09)

**作者简介:**官冬杰(1980—),女,黑龙江省富锦人,教授,工学博士,主要从事生态环境及土地利用。E-mail:guandongjie\_2000@163.com

的目标为标准来定义的一个生态系统的状态、条件或表现”。因为这些概念趋于强调生态系统健康的生态学方面,很多学者认为这些概念不够完善<sup>[6-7]</sup>,更全面的是把人类健康也包括进来,也就是生态系统健康应该包含两方面内涵:满足人类社会合理要求的能力和生态系统本身自我维持与更新的能力<sup>[8]</sup>。此外,还有专家对生态系统健康的概念和内涵作出了不同的解释<sup>[9-10]</sup>。可见目前关于生态系统健康概念还没有达成共识,应该需要进一步修改和完善。尽管如此,学者们认为生态系统健康的概念所涵盖的研究问题和领域的价值是无可置疑的,在生态系统管理实践中是无法回避的。要使生态系统健康的概念具有现实意义,唯有通过对生态环境进行有效可靠的、可操作的、可广泛推广的,并能为决策者提供指导信息的健康评价来得以实现。决定评价是否成功的关键是如何选择适宜的评价指标与评价标准,目前国外关于生态系统健康的评价指标主要有三类:第一类考虑生态系统自身特点的指标体系<sup>[11]</sup>;第二类考虑生态环境的指标体系<sup>[12]</sup>;第三类考虑人类活动的指标体系<sup>[13]</sup>。随着人们对生态系统服务功能认识的逐渐深入和对生态环境质量要求的不断提高,国内学者也开始关注生态系统健康和生态系统管理这一生态学新领域的研究,并逐步成为热点问题<sup>[14-21]</sup>。城市生态系统是一个整合生态—社会经济—人类健康的复杂的巨系统,其健康不仅强调从生态学角度出发的生态系统结构合理、功能高效与完整,而且更加强调生态系统能维持对人类的服务功能,以及人类自身健康及社会经济健康不受损害。城市生态系统健康评价研究的关键在于建立适宜的评价指标体系,所以,本研究将以重庆市为例,通过对城市生态系统健康现状分析的基础上,建立一套能反映地域特色的评价指标体系及评价标准,然后选用模糊数学方法对重庆市生态系统健康状况进行评价,为了找出重庆市生态系统健康的不足和优势,本研究尝试选取其他城市作为参照,进行对比评价,期望为重庆市生态系统健康发展提供指导。

## 1 研究区概况

重庆市位于中国内陆西南部、长江上游地区,地跨东经 105°11′—110°11′、北纬 28°10′—32°13′的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带。主城区人口 795 万,面积约为 5 495 km<sup>2</sup>。重庆市的人口密度 1998—2003 年是呈上升趋势,2003 年以后,开始缓慢下降,但 2006 年又有明显的回升。日照总时数 1 000~1 200 h,冬暖夏热,无霜期长、雨量充沛、常年降雨量 1 000~1 450 mm。年平均气温在 18℃左右,属中

亚热带湿润季风气候。重庆气候温和多雾,素有“雾都”之称,是长江上游地区的经济和金融中心及航运、政治、文化、教育、科技等中心。“西部大开发”、“三峡工程建设”给重庆的城市发展带来了前所未有的契机,随着经济建设和城市化进程的加快,重庆市的生态环境问题日益突出,主要包括废水排放量大,处理率低,水质污染突出;大气污染严重,酸雨频率增加;地质灾害频发;植被破坏严重,人均绿地少,水土流失加剧。因此,评价重庆市生态系统健康状况,探讨城市生态系统发展的驱动机制,预测未来城市生态健康发展趋势,可以为重庆市城市建设管理及城市的可持续发展提供决策依据。

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标的选取

国内外文献对城市生态系统健康评价应包含的指标并没有达成统一的共识。目前较普遍的看法是通过生态系统的活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能的维持、管理选择、外部输入减少、对邻近系统的影响及人类健康影响 8 个方面来衡量生态系统的健康状况<sup>[22-23]</sup>,这主要是针对自然生态系统提出的,作者将其引申到城市生态系统中,由于城市生态系统是一种高度人工化的自然—社会—经济复合生态系统,主要从影响城市生态系统健康的自然和人文因子的角度出发,在遵循评价指标选择原则的基础上,选择活力、组织结构、恢复力、生态系统功能的维持、人群健康状况作为城市生态系统健康评价的 5 个要素,构建一套相对完整的城市生态系统健康评价指标体系(表 1)。一是从城市生态系统健康活力、结构和功能完整性出发,构建活力评价指标体系;二是从城市生态系统的自然、经济和社会结构方面出发,构建组织结构评价指标体系;三是从城市生态系统的对抗自然和人为干扰的能力以及可持续性利用能力出发,构建恢复力评价指标体系;四是从城市生态系统对社会生活的便利程度出发,构建服务功能评价指标体系。五是在考虑影响城市生态系统变化自然因素的基础上,着重从人群健康和人类素质方面选择系列因素构建动态变化评价指标体系。

### 2.2 评价指标标准的确定

健康是一种相对概念,绝对的健康标准也是不存在的<sup>[24-25]</sup>,区域生态系统健康评价,更多地应着力于探讨区域生态系统健康的时间动态与空间差异,而非人为判定某时某地生态系统的健康与否,从而保障研究的客观性。因此,为便于更直观表现城市生态健康状况,本文针对活力、组织结构、恢复力、服务功能和动态变化 5 个要素中共 20 个指标,作出对应的评价

指标标准,将城市生态系统健康评价标准分为 5 个等级:病态、不健康、亚健康、健康、很健康。

各指标的具体评价标准值参照国家城市考核指标标准,国际发达国家城市建设标准,国内城市建设最佳值或较好值,国内城市发展现状,国家环保总局颁布的生态县、生态市、生态省建设指标(试行)标准,

国际大都市的平均值,中等发达国家的标准值作为很健康的标准值,以全国最低值为病态的限定值,在前者基础上向下浮动 20%作为健康和亚健康的标准值,在后者基础上向上浮动 20%作为不健康和亚健康的标准值,前后两次确定的亚健康标准值相互调整得到最终值<sup>[26-27]</sup>(表 2)。

表 1 重庆市生态系统健康评价指标体系

评价要素	评价指标	具体指标	序号	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
活力	经济生产力	人均 GDP/万元	X <sub>1</sub>	1.08	1.24	1.39	1.66	2.05	2.29	2.76	3.43
	能耗效率	能源消费弹性系数	X <sub>2</sub>	1.36	1.25	0.75	0.81	0.48	0.71	0.63	0.6
组织结构	自然结构	森林覆盖率/%	X <sub>3</sub>	27.1	30	32	32	34	40	37	39
		建成区绿化覆盖率/%	X <sub>4</sub>	20.9	21.6	22.9	30	34.1	35.76	39.48	35.2
	社会结构	城市居民平均每户就业人口/人	X <sub>5</sub>	1.61	1.63	1.72	1.7	1.62	1.59	1.55	1.45
		城市人口失业率/%	X <sub>6</sub>	4.12	4.02	4	3.98	3.96	3.96	3.9	3.5
		进出口总值/亿美元	X <sub>7</sub>	38	42	54	74	95	77	124	150
	经济结构	第三产业占 GDP 比重/%	X <sub>8</sub>	40.5	41.5	42.2	39	37.3	37.9	36.4	36.2
		财政收入占 GDP 比重/%	X <sub>9</sub>	20.9	21.6	22.9	30	34.1	36.76	39.48	40.28
恢复力	环境废物处理指数	工业废水排放达标率/%	X <sub>10</sub>	93.4	93.7	93.9	92.1	93.5	94.3	94.7	95.1
		工业二氧化硫排放量/万 t	X <sub>11</sub>	64.11	68.32	71.08	68.31	62.72	58.61	57.27	58.31
		工业固废综合利用率/%	X <sub>12</sub>	70.93	72.07	73.7	76.71	79.07	79.8	80.4	76.9
服务功能	生活便利程度	人均住宅面积/m <sup>2</sup>	X <sub>13</sub>	22.76	22.17	24.52	27.31	27.34	27.41	27.55	28.35
		人均道路面积/m <sup>2</sup>	X <sub>14</sub>	6.33	6.63	8.58	8.42	8.94	9.29	9.09	9.97
		人均公共绿地面积/m <sup>2</sup>	X <sub>15</sub>	4.09	4.93	6.59	6.97	8.91	9.57	14.03	17.01
		用水普及率/%	X <sub>16</sub>	77.4	79.2	88.2	88.3	89.8	91.3	91.5	91.7
动态变化	人群健康	死亡率/‰	X <sub>17</sub>	7.47	4.4	4.68	5.15	7.57	8	6.4	5.9
		恩格尔系数/%	X <sub>18</sub>	37.8	36.4	36.3	37	39.1	38.2	37.5	38.5
		人口自然增长率/‰	X <sub>19</sub>	3.27	5.31	6.81	8.73	5.76	6	6.83	6.54
	文化水平	每万人中在校大学生/人	X <sub>20</sub>	97	113	128	136	145	149	171	184

注:数据来源于重庆市 2004—2011 年统计年鉴。

表 2 重庆市生态系统健康评价指标标准

评价要素	评价指标	具体指标	序号	病态	不健康	亚健康	健康	很健康	依据
活力	经济生产力	人均 GDP/万元	X <sub>1</sub>	<0.7	0.7~3.0	3.0~6.0	6.0~8.0	>8.0	⑤
	能耗效率	能源消费弹性系数	X <sub>2</sub>	>1.5	1.5~1.3	1.3~1.0	1.0~0.6	<0.6	⑤
组织结构	自然结构	森林覆盖率/%	X <sub>3</sub>	<20	20~30	30~40	40~50	>50	⑤
		建成区绿化覆盖率/%	X <sub>4</sub>	<20	20~30	30~45	45~50	>50	⑤
	社会结构	城市居民平均每户就业人口/人	X <sub>5</sub>	<1.0	1.0~1.2	1.2~1.5	1.5~1.7	>1.7	⑤
		城市人口失业率/%	X <sub>6</sub>	>4.8	4.8~3.6	3.6~3.0	3.0~1.2	<1.2	⑥
		进出口总值(亿万美元)	X <sub>7</sub>	<20	20~40	40~60	60~80	>80	⑤
	经济结构	第三产业占 GDP 比重/%	X <sub>8</sub>	<30	30~40	40~60	60~80	>80	⑦
		财政收入占 GDP 比重/%	X <sub>9</sub>	<7	7~14	14~21	21~35	>35	⑤
恢复力	环境废物处理指数	工业废水排放达标率/%	X <sub>10</sub>	<70	70~80	80~90	90~95	>95	①
		工业二氧化硫排放量/万 t	X <sub>11</sub>	>60	60~50	50~40	40~30	<30	①
		工业固废综合利用率/%	X <sub>12</sub>	<60	60~80	80~90	90~95	>95	①
服务功能	生活便利程度	人均住宅面积/m <sup>2</sup>	X <sub>13</sub>	<14	14~20	20~28	28~40	>40	③
		人均道路面积/m <sup>2</sup>	X <sub>14</sub>	<10	10~15	15~20	20~28	>28	③
		人均公共绿地面积/m <sup>2</sup>	X <sub>15</sub>	<7	7~10	15~20	16~20	>20	③
		用水普及率/%	X <sub>16</sub>	<65	65~75	75~85	85~95	>95	③
动态变化	人群健康	死亡率/‰	X <sub>17</sub>	>15	12~15	12~10	10~8	<8	②
		恩格尔系数/%	X <sub>18</sub>	>50	50~40	40~30	30~20	<20	⑤
		人口自然增长率/‰	X <sub>19</sub>	>11	11~9	9~7	7~5	<5	②
	文化水平	每万人中在校大学生/人	X <sub>20</sub>	<80	80~120	120~140	140~160	>160	④

2.3 评价指标权重的确定

在城市生态系统健康评价中,因评价指标的目的不同而对指标集中某项的重视程度不同,或因某项指标的影响程度不同而在评价时给予不同的重视,因此在评价的过程中应对各个指标赋予不同的权重。目前关于指标权重的确定方法很多,本文利用主成分分析法来确定重庆市生态系统健康权重,其步骤为:① 对数据进行标准化处理;② 求出样本的相关系数矩阵;③ 计算其特征值、主成分的贡献率及累积贡献率;④ 求出主成分荷载,确定主成分个数,最后,将主成分载荷矩阵和贡献率相乘,得到城市生态系统健康评价指标权重(表 3),其具体操作可借助 SPSS 软件进行统计计算。

表 3 重庆市生态系统健康评价指标权重				
评价要素	权重	具体指标	序号	权重
活力	0.11	人均 GDP	$X_1$	0.06
		能源消费弹性系数	$X_2$	0.05
		森林覆盖率	$X_3$	0.062
		建成区绿化覆盖率	$X_4$	0.057
		城市居民平均每户就业人口	$X_5$	0.037
组织结构	0.374	城市人口失业率	$X_6$	0.054
		进出口总值	$X_7$	0.051
		第三产业占 GDP 比重	$X_8$	0.054
		财政收入占 GDP 比重	$X_9$	0.06
		工业废水排放达标率	$X_{10}$	0.033
恢复力	0.128	工业二氧化硫排放量	$X_{11}$	0.042
		工业固废综合利用率	$X_{12}$	0.053
		人均住宅面积	$X_{13}$	0.06
服务功能	0.24	人均道路面积	$X_{14}$	0.061
		人均公共绿地面积	$X_{15}$	0.06
		用水普及率	$X_{16}$	0.059
		死亡率	$X_{17}$	0.024
动态变化	0.148	恩格尔系数	$X_{18}$	0.029
		人口自然增长率	$X_{19}$	0.032
		每万人中在校大学生	$X_{20}$	0.063

2.4 评价模型的构建

模糊数学是研究和处理模糊性现象的一种数学理论和方法。很显然,城市生态系统健康状况的好坏是相对于标准值而言的,很难对某生态系统是健康的或不健康的作出明确的结论,健康与否只是一个相对概念。因此,城市生态系统健康与否可以作为一个模糊问题来处理。模糊数学方法(Fuzzy Mathematics)的基本思想是应用模糊关系合成的原理,根据被评价对象本身存在的性态或隶属上的亦此亦彼性,从数量上对其所属成分都给以刻画和描述。因此,应用模糊数学的概念和方法建立的城市生态系统健康评价模

型比传统的评价方法能够更符合实际地描述现实情况。

本文应用模糊数学方法拟定的城市生态系统健康评价模型  $Z=W \cdot U$ , 式中  $Z$  为城市生态系统健康诊断结果,  $W$  为 5 个健康评价要素(活力、组织结构、恢复力、服务功能、动态变化)对总体健康程度的权重矩阵,  $W=(W_1, W_2, W_3, W_4, W_5)$ ;  $U$  为各个生态系统健康评价要素对各级健康标准的隶属度矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} & U_{15} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} & U_{25} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} & U_{35} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} & U_{45} \\ U_{51} & U_{52} & U_{53} & U_{54} & U_{55} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $U_{mn}$ ——第  $m$  个健康评价要素对第  $n$  级健康标准的隶属矩阵,  $m=5, n=5$ 。相对隶属度的计算主要分正向指标和负向指标两种计算方法,等级健康标准值取范围的平均值。对正向指标计算公式为:

当  $x_i \geq r_{i,5}$  时,  $U_{i,5}=1, U_{i,1}=U_{i,2}=U_{i,3}=U_{i,4}=0$  (2)

当  $r_{i,j} \leq x_i \leq r_{i,j+1}$  时,  $U_{i,j} = f_i - f_j \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right|$

$$U_{i,j+1} = w_i \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right| \quad (3)$$

当  $x_i \leq r_{i,1}$  时,  $U_{i,1}=1, U_{i,2}=U_{i,3}=U_{i,4}=U_{i,5}=0$  (4)

对负向指标其计算公式为:

当  $x_i \geq r_{i,1}$  时,  $U_{i,1}=1, U_{i,2}=U_{i,3}=U_{i,4}=U_{i,5}=0$  (5)

当  $r_{i,j+1} \leq x_i \leq r_{i,j}$  时,  $U_{i,j} = w_i - w_j \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right|$

$$U_{i,j+1} = w_i \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right| \quad (6)$$

当  $x_i \leq r_{i,5}$  时,  $U_{i,5}=1, U_{i,1}=U_{i,2}=U_{i,3}=U_{i,4}=0$  (7)

式中:  $U_{ij}$ ——第  $i$  个指标对第  $j$  级标准的相对隶属度;  $w_i$ ——第  $i$  个指标的权重系数;  $x_i$ ——第  $i$  个指标的现状值;  $r_{i,j}$ ——第  $i$  指标的第  $j$  级健康标准值。当  $1 \leq I \leq 2$  时,  $U_{ij}$  组成矩阵  $U_{1j}$ ; 当  $3 \leq i \leq 9$  时,  $U_{ij}$  组成矩阵  $U_{2j}$ ; 当  $10 \leq i \leq 12$  时,  $U_{ij}$  组成矩阵  $U_{3j}$ ; 当  $13 \leq i \leq 16$  时,  $U_{ij}$  组成矩阵  $U_{4j}$ ; 当  $17 \leq i \leq 20$  时,  $U_{ij}$  组成矩阵  $U_{5j}$ 。

3 结果与分析

3.1 重庆市与不同城市生态系统对比分析

通过横向对比不同城市同一年的生态系统,分析各城市生态系统的健康状况,得出重庆市生态系统健康的优劣程度。本文通过查询上海、青岛、成都和重庆 4 个城市 2011 年的年鉴构建了评价指标现状值(表 4)。

表 4 2011 年上海、青岛、成都和重庆评价指标体系现状值

评价要素	评价指标	指标	上海	青岛	成都	重庆
活 力	经济生产力	$X_1$	8.26	5.3	7.37	3.43
	能耗效率	$X_2$	0.61	0.6	0.67	0.6
组织结构	自然结构	$X_3$	12.6	44.3	40.2	39
		$X_4$	38.2	38.4	43.6	35.2
	社会结构	$X_5$	1.58	1.53	1.51	1.45
		$X_6$	4.2	4	4.1	3.5
	经济结构	$X_7$	4374	713	478	150
		$X_8$	58.05	47.74	33.4	36.2
恢复力	环境废物处理指数	$X_9$	17.87	8.56	45.6	40.28
		$X_{10}$	98.4	93.2	96.3	95.1
		$X_{11}$	20	10	56	58.31
		$X_{12}$	86.5	87.2	83.2	76.9
服务功能	生活便利程度	$X_{13}$	17	19.3	18.3	28.35
		$X_{14}$	18.44	17.2	19.2	9.97
		$X_{15}$	13.1	14.6	14.58	17.01
		$X_{16}$	99.99	91.3	98.69	91.7
		$X_{17}$	7.85	7.26	6.81	5.9
动态变化	人群健康	$X_{18}$	34.5	36.4	37.6	38.5
		$X_{19}$	-0.68	6.3	2.98	6.54
	文化水平	$X_{20}$	480	360	216	184

注：数据通过查询上海、青岛、成都和重庆 4 个城市 2011 年的年鉴获得。

将指标代入(式 1—7)计算出评价指标 5 个要素层的健康隶属度,模糊综合结果分析最常用的方法是最大隶属度法,但其存在一定的局限性,当评判对象对不同等级的隶属度相差不大时,可能会得到不合理的评价结果。在此采用加权平均原则求隶属等级的方法对模糊综合评价结果向量进行分析,以避免用最大隶属度原则所带来的局限性。公式如下：

$$B^* = \frac{\sum_{j=1}^5 U_j^k \cdot j}{\sum_{j=1}^5 U_j^k} \tag{8}$$

式中： $B^*$ ——隶属度； $j$ ——健康等级， $k=2$ ，目的是控制较大的  $U_j$  所起的作用。

根据公式(8)，按照加权平均原则， $B^* < 1.5$  为病态， $1.5 \leq B^* < 2.5$  为不健康， $2.5 \leq B^* < 3.5$  为亚健康， $3.5 \leq B^* < 4.5$  为健康， $B^* \geq 4.5$  为很健康，进而分别得出上海、青岛、成都、重庆 4 个城市的活力、组织结构、恢复力、服务功能和动态变化 5 个要素的隶属度特征值  $B^*$  (图 1)。

从图 1 中可以看出，在 2011 年重庆活力子系统比其他三个城市都差，处于亚健康状态，其主要原因是重庆市人均 GDP 比其他三个城市都低；而上海活力子系统最强，处于很健康状态，因为其人均 GDP 在全国居首；成都处于健康状态；青岛也处于亚健康状态。重庆组织结构子系统和上海、青岛都处于亚健康

状态；成都处于健康状态，成都组织结构子系统比其他三个城市好的原因主要是其财政收入占 GDP 的比重最高，虽然成都的组织结构子系统最强，但彼此间的差距不大。重庆市恢复力子系统最低，青岛第三，成都第二，但都处于亚健康状态；上海恢复力子系统最高，处于很健康状态；上海恢复力子系统比青岛、成都和重庆好的原因是前两个城市的工业固废综合利用率和工业废水排放达标率比后两个城市高，而且工业二氧化硫排放量较后两个城市低。重庆、上海、青岛和成都服务功能子系统都处于亚健康状态；主要是由于 4 个城市的人均绿地面积与人均住宅面积以及人均道路面积比较低。重庆、上海、青岛和成都动态变化系统处于很健康状态；其原因主要是这 4 个城市的人口自然增长率较低，而每万人在校大学生人数比较高。

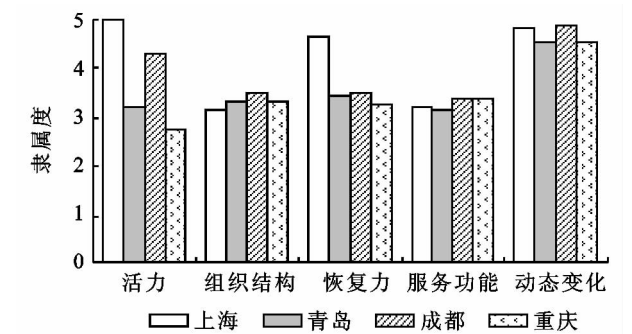


图 1 2011 年上海、青岛、成都和重庆五要素隶属度特征值

为了对上海、青岛、成都和重庆生态系统健康整体状况进行评价,利用评价模型  $Z=W \cdot U$ ,分别得出城市生态系统健康状态的隶属度值如图 2 所示。

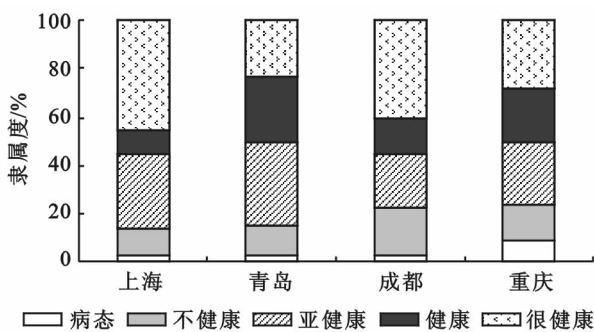


图 2 2011 年上海、青岛、成都和重庆生态系统健康综合评价  
按照加权平均健康等级原则,2011 年各城市的综合健康等级次序为:上海>成都>重庆>青岛(图 2)。重庆、上海和成都都处于健康状态,只有青岛处于亚健康状态。其原因是重庆自然组织结构方面的森林覆盖率低于成都,城市绿化率不如上海和成都;在恢复力方面工业固废气废的利用率和排放达标率也比上海、成都低;而成都经济水平和恢复力系统方面略低于上海;青岛市比其他三个城市健康状况差的原因主要有:财政收入占 GDP 比重较小、工业废水排放达标率较低。

### 3.2 重庆市各年份生态系统对比分析

利用 SPSS 主成分分析法计算得到指标对应的权重,再运用模糊数学方法计算隶属度,最后按照加权平均原则,就可以得出重庆市 2004—2011 年活力、组织结构、恢复力、服务功能和动态变化 5 大要素隶属度特征值  $B^*$ 。重庆市活力要素和组织结构要素都是 2004—2005 年处于不健康状态;2006—2009 年处于亚健康状态;2010—2011 年处于健康状态,有向很健康状态发展的趋势(图 3)。

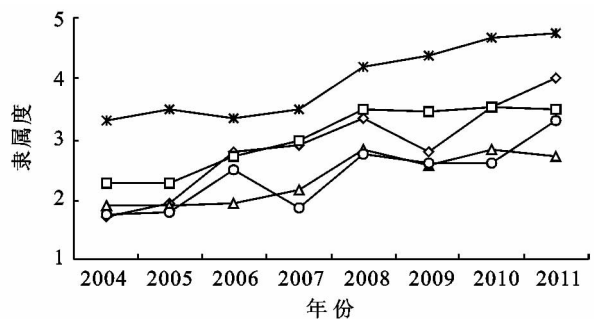


图 3 重庆市 2004—2011 年五大要素特征值

在具体评价指标中,人均 GDP、进出口总值和建成区绿化覆盖率明显上升,而城市人口平均每户就业率和失业率的波动最大,在今后发展中,应努力提供更多的就业岗位,同时注意分散城市中心的人口压

力。2004—2011 年重庆市生态系统健康的恢复力要素和服务功能要素由前四年的不健康状态逐渐过渡到后三年的亚健康状态,具体是由于人均住宅面积、人均道路面积、人均公共绿地面积、用水普及率在不断的提升。重庆市动态变化要素 2004—2006 年处于亚健康状态;2007—2009 年处于健康状态;2010—2011 年处于很健康状态,并且趋于稳定。究其原因是万人在校大学生人数在逐年递增而人群健康状况在不断的波动,人群健康状况成为重要的胁迫因子,要保持在很健康的稳定状态,就要保证人群健康的稳定。

利用权矩阵综合评价及加权平均原则,对重庆市 2004—2011 年的生态系统健康评价结果进行综合评价,得到重庆市生态系统健康状况总体趋势。

由图 4 可以看出,2004—2005 年重庆市生态系统综合健康状态变化不是很大,都处于不健康状态;2006—2009 年健康状况发展有所上升,处于亚健康状态;2010—2011 年健康状态变化上升,处于健康状态。总的来说,重庆市生态系统在不断的改善,状态一直往好处发展。这归功于重庆市走了集中型和分散型城市化相结合的道路,依托现有中心城市,因地制宜,走大中小城市协调发展之路,在城市生态环境建设中,注意当地生物资源的保护,有效控制有害的外来物种,强化政府职能建设,在进一步发展经济的同时,积极采取转变经济发展模式和经济增长方式,控制污染源和高效利用能源与资源等措施以保护生态环境。并且特别考虑人口发展与环境容量的关系,注意生物安全、环境安全、资源安全、食品安全、人类安全和生态系统等生态安全问题。

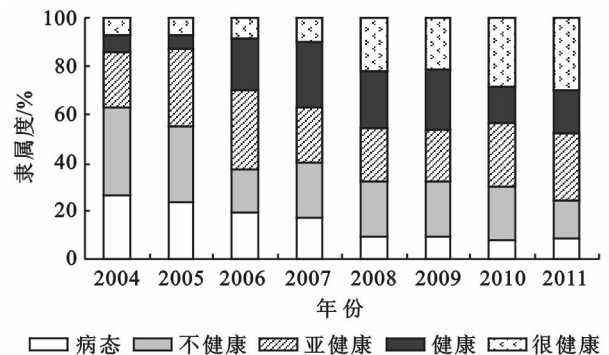


图 4 2004—2011 年重庆市生态系统健康评价结果

## 4 结论

本文将生态系统健康的理论运用于城市生态系统健康研究,从自然、经济、社会方面构建了评价指标体系,运用主成分分析法确定指标权重,建立了模糊数学评价模型,并将其运用到对重庆、上海、青岛和成

都的生态系统健康评价中,得到了下列结论:

(1) 重庆市生态系统健康 2004—2011 年发生了很大变化,2004—2005 年重庆市生态系统健康状况处于不健康状态;2006—2009 年处于亚健康状态;2010—2011 年处于健康状态,并且有向很健康状态发展的趋势;

(2) 重庆与上海、青岛和成都 2011 年的生态系统健康状况横向对比中,重庆、上海和成都都处于健康状态,只有青岛处于亚健康状态。但总排序重庆位于第三,上海第一,成都次之,青岛相对最差;

(3) 在 2004—2011 年影响重庆生态系统健康的因素当中,有利因素是恢复力子系统和功能子系统,不利因素是组织结构当中的社会结构;

(4) 和另外三个城市生态系统健康对比中,对重庆有利的因素是服务功能,不利因素是活力、恢复力和动态变化;

(5) 未来重庆市生态系统要想保持良好的健康发展水平,应进一步加强服务功能建设,增加人均道路面积和绿地面积,提高居民生活出行便利条件。重点是改善恢复力、活力和动态变化,提高废气废渣的排放达标率和利用率、降低万元 GDP 能耗、加大力度吸引高层次人才。

#### 参考文献:

- [1] Odum E P. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient[J]. *Bioscience*,1979,29(6):349-352.
- [2] Ryder R. A Ecosystem health, a human perception:Definition, detection and the dichotomous key[J]. *Journal of Great Lakes Research*,1990,16(4):619-624.
- [3] Guan D J, Gao W, Watari K, Fukahori H, et al. Study on integrated evaluation of urban ecosystem health[J]. *Journal of South China University of Technology*,2007,35(s):175-178.
- [4] Schaefer D J, Herricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: Measuring ecosystem health[J]. *Environmental Management*,1988,12(3):445-455.
- [5] Rapport D J, Gaudet C, Karr J R, et al, et al. Evaluating landscape health: integrating societal goals and biophysical process[J]. *Journal of environmental Management*,1998,53(1):1-15.
- [6] Suter G W I. Critique of ecosystem health concepts and indexes[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*,1993,12(9):1533-1539.
- [7] Wicklum D, Davies R W. Ecosystem health and integrity[J]. *Canadian Journal of Botany*,1995,73(7):997-1000.
- [8] Rapport D J. Gaining respectability: development of quantitative methods in ecosystem health[J]. *Ecosystem Health*,1999,5(1):1-2.
- [9] Smol J P. Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management[J]. *Journal of Aquatic Ecosystem health*,1992,1(1):42-59.
- [10] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health[J]. *Ecosystem Health*,1995,1(4):201-213.
- [11] Cairns J, McCormick P V, Niederhieser B R. A proposed frame work for developing indicators of ecosystem health[J]. *Hydrobiologia*,1993,263(1):1-44.
- [12] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*,1993,12(9):1521-1531.
- [13] Rapport D J, Regier H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress [J]. *The American Naturalist*,1985,125(5):617-640.
- [14] 房莉,吕光辉. 库尔勒市生态城市建设研究[J]. *水土保持研究*,2008,15(1):166-168.
- [15] 李双江,罗晓,胡亚妮. 快速城市化进程中石家庄城市生态系统健康评价[J]. *水土保持研究*,2012,19(3):245-249.
- [16] 官冬杰,苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. *环境科学学报*,2006,26(10):1716-1723.
- [17] 陈克龙,苏茂新,李双成,等. 西宁市城市生态系统健康评价[J]. *地理研究*,2010,29(2):214-222.
- [18] 石惠春,刘伟,何剑等. 一种城市生态系统现状评价方法及其应用[J]. *生态学报*,2012,32(17):5542-5549.
- [19] 吴宜进,廖乐,袁绪英. 基于信息熵的武汉市城市生态系统演化分析研究[J]. *长江流域资源与环境*,2013,22(1):21-26.
- [20] 钱翌,王灵,陈敬锋. 乌鲁木齐城市生态系统健康模糊综合评价[J]. *水土保持研究*,2008,15(6):128-132.
- [21] 杨木,奚砚涛,李高金. 徐州市生态环境—社会经济系统耦合态势分析[J]. *水土保持研究*,2012,19(2):137-141.
- [22] 肖风劲,欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. *自然资源学报*,2002,17(3):203-209.
- [23] 孔红梅,赵景柱,姬兰柱,等. 生态系统健康评价方法初探[J]. *应用生态学报*,2002,13(4):486-490.
- [24] 彭建,王仰麟,吴健生,等. 区域生态系统健康评价:研究方法进展[J]. *生态学报*,2007,27(11):4877-4885.
- [25] 宋轩,杜丽平,李树人,等. 生态系统健康的概念、影响因素及其评价的研究进展[J]. *河南农业大学学报*,2003,37(4):375-378.
- [26] 宋永昌,戚仁海,由文辉,等. 生态城市的指标体系与评价方法[J]. *城市环境与城市生态*,1999,12(5):16-19.
- [27] 曾勇,沈根祥,黄沈发,等. 上海城市生态系统健康评价[J]. *长江流域资源与环境*,2005,14(2):208-212.