

陈兴鹏, 张伟伟, 薛冰, 鹿晨昱, 付佳, 耿涌. 基于集对分析的城市生态系统健康评价——以兰州为例[J]. 生态科学, 2011, 30(2): 135-141.
CHEN Xing-peng, ZHANG Wei-wei, XUE Bing, LU Chen-yu, FU Jia, GENG Yong. Evaluation on urban ecosystem health by employing Set Pair Analysis: a case study in Lanzhou, China[J]. *Ecological Science*, 2010, 30(2): 135-141.

基于集对分析的城市生态系统健康评价-以兰州为例

陈兴鹏¹, 张伟伟^{1*}, 薛冰^{2,1}, 鹿晨昱³, 付佳^{2,4}, 耿涌^{2,4}

1. 兰州大学 资源环境学院人文地理研究所, 兰州 730000
2. 中国科学院 沈阳应用生态研究所 循环经济与产业生态研究组, 沈阳 110016
3. 西北师范大学 地理与环境学院, 兰州 730070
4. 沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044

【摘要】 城市生态系统是城市社会经济发展和载体, 但城市生态系统健康状况问题中包含多种不确定性因素, 而集对分析可以有效处理这种不确定性。论文以特大型综合性城市兰州为研究案例, 基于集对分析方法, 构建包括生产力、生活态、生态势和生机度的城市生命力指数, 诊断兰州城市生态系统 2002 至 2008 年间的健康状态。研究结果表明: 2002~2008 年, 兰州市城市生态系统健康状况呈上升趋势, 其健康联系度由 2002 年的 0.4751 增至 2008 年的 0.5179, 但总体水平仍不高。该研究为兰州市城市规划和生态建设推荐了重点行动领域, 同时也可作为兰州市实施可持续发展战略提供决策依据。

关键词: 城市生态系统; 健康评价; 集对分析; 兰州市

doi:10.3969/j.issn.1008-8873.2011.02.08 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2011)02-135-07

Evaluation on urban ecosystem health by employing Set Pair Analysis: a case study in Lanzhou, China

Chen Xing-peng¹, Zhang Wei-wei^{1*}, Xue Bing^{2,1}, Lu Chen-yu³, Fu Jia^{2,4}, Geng Yong^{2,4},

1. Institute of Human Geography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
3. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China
4. Key Laboratory of Regional Environment and Eco-Remediation (Shenyang University), MOE, Shenyang, 110044, China

Abstract: Evaluation of urban ecosystem health is urgently needed because it is the developmental basis of urban social-economic system. As a systematic analysis method to deal with uncertainty issues, Set Pair Analysis (SPA) is employed to evaluate the urban ecosystem health in this paper by taking Lanzhou as a case. We study the urban ecosystem by employing SPA from the index aspects consisting of productivity power, living status, ecological ascendancy and vital force, representing the situation of urban economic subsystems, social subsystem, natural subsystem, and ecological regulatory subsystem. The results show that healthy degree of Lanzhou city ecosystem rises continuously. Connection degree of health increased from 0.4751 in 2002 to 0.5179 in 2008, but generally the level is not high. The results can provide scientific reference for regional sustainable development.

Keywords: urban ecosystem, health evaluation, Set Pair Analysis, Lanzhou

收稿日期: 2010-09-06 收稿, 2010-11-16 接受

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40871061); 国家自然科学基金重点项目(71033004)

作者简介: 陈兴鹏(1963—), 男, 汉族, 甘肃庆阳人, 理学博士(后), 兰州大学教授、博士生导师, 主要从事人地关系、区域可持续发展与循环经济研究。E-mail: chenxp@lzu.edu.cn;

通讯联系人: 张伟伟, E-mail: 2004034005@163.com

1 引言 (Introduction)

城市,作为全球经济中最活跃的部分^[1],自工业革命以来,在取得了巨大经济发展成就的同时,也出现了人口过度膨胀、水资源短缺、大气污染、能源匮乏等各种环境及生态问题^[2-4]。到2008年末,城市已经聚集了世界人口的一半以上,温室气体排放总量占全球排放总量的75%左右^[5,6]。中国作为世界上人口最多的发展中国家,46%的人口居住在城市,迄2008年末止,中国城市总数达到655个,比1991年增加176个,城市化率达到了45.68%,相对于1991年提高十九个百分点,预计到2050年将达到75%左右,中国城镇化正处于加速进行过程中¹⁾。在人口超过10万的城市中,60%的城市缺乏充足的水资源,城市周边90%的河流受到严重污染^[7];中国城市的代谢量统计显示:城市消耗了全国钢铁的86%,铝材的88%,铜材的92%,水泥的75%,能源的80%,排放的CO₂占全国的90%^[6]。随着不断加快的城市化进程,城市也因此变得越来越脆弱,频繁发生的气候灾害威胁到了城市居民正常的生产生活,中国城市也难以幸免^[8]。

从结构、功能、活动、发展演化规律等方面来看,城市具有生命体特征,土地、交通、建筑、能源、资源、人口等城市生命体的基本结构要素相互作用,共同完成生命体的各种功能^[9,10];同时,城市生态系统各组成要素间的能量流通是否顺畅,能量分配是否合理,能量存量是否足以支撑城市发展等,都对城市生态系统的正常运行与可持续发展有重要影响^[11]。因此,作为许多重大环境问题的显著表现场所,开展城市生态系统健康评价研究,对于实现城市可持续发展具有现实意义^[10,12,13]。

1788年,Hutton首次将健康概念引入生态系统研究^[13],随后,关于城市生态系统健康的研究取得了长足进展,并认为,城市生态系统健康主要包括:1)生态系统服务维持生产能力;2)系统的完整性是生态系统健康的关键要素;3)城市生态系统健康评估必须基于系统视角^[9,13]。在城市生态系统健康标准上,主要包含生态的永续、社会公平、公众健康、有效的社区管理^[13,14-17],即包含自然生态系统的健康、城市社会经济系统健康和人类健康

^[13]。在评价方法上,模糊综合评价模型^[18]、RVC模型^[19]、系统动力学建模法^[20]、能值分析法^[21]、信息熵法^[22]、投影寻踪法^[23]、PSR模型^[24,25]等方法得以从不同角度予以广泛应用。但是,由于城市生态系统的复杂性及健康概念的模糊性等原因,其发展中存在着模糊、随机、中介和信息不完全等导致的各种不确定性^[26,27],如果能够在健康评价的方法中尽量降低不确定性,将使得评价结果更加客观。

本文以兰州市为例,引入能够对不确定性系统刻画、并已在多属性评价中得到广泛应用的集对分析方法,对2002~2008年兰州的生态系统相对健康状况进行评价,揭示其主要影响因素,为城市规划和生态建设提供决策依据,同时也为丰富城市生态系统健康评价方法体系提供新的案例。

2 研究区域 (Study Area)

兰州是甘肃省省会,是甘肃省政治、文化、经济、金融、交通、教育中心,是西陇海兰新经济带的重要支点,是西北交通枢纽和物流中心。随着西部大开发十年的发展,兰州成为黄河上游最大的工业城市和西部重要的原材料工业基地,社会经济持续快速增长,市民生活水平不断提高。2009年实现生产总值925.98亿元,其中,第一产业增加值30.55亿元,第二产业增加值433.62亿元,第三产业增加值461.81亿元,三次产业比例为3.3:46.83:49.87。全市常住人口332.18万人,其中,市区人口210.47万人。

随着对自然资源的利用和消耗不断增加,兰州的污染物排放量日趋增大。由于河谷盆地型城市的特殊地形限制,使污染物难于扩散稀释,造成兰州市大气污染比较严重。2009年,兰州市区空气质量优良天数为236d,仅占全年总天数的64.66%;可吸入颗粒物年平均浓度为 $1.50 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,废水排放量为 $1.69 \times 10^{11} \text{ kg}$,其中工业废水排放量 $2.94 \times 10^{10} \text{ kg}$,占总排放量的17.5%;生活及其它污水排放量为 $1.39 \times 10^{11} \text{ kg}$ 。

3 评价方法 (Methodology)

3.1 集对分析

集对分析是关于确定及不确定系统的同、异、反定量分析的系统分析方法^[28]。其核心思想是在某一具体问题背景下,把客观事物的确定性联系与不

1) 王永志.中国城镇化率逾四成五 三大都市圈 GDP 超十万亿 [EB/OL].<http://www.chinanews.com.cn/cj/cj-gncj/news/2009/09-17/1872017.shtml>, 2009-09-17

确定性联系作为一个确定、不确定系统来分析和处理, 确定性联系分为同一性联系和对立性联系, 分别简称为“同联系”和“反联系”; 不确定联系称为差异性联系, 简称为“异联系”。集对分析就是从同、异、反三个方面进行分析, 并用联系度描述两个集合的关系:

$$\mu_{A-B} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \dots\dots\dots(1)$$

式中: μ_{A-B} 为联系度; N 为集对所具有的特性总数; S 为集对中两个集合共同具有的特性个数; P 为集对中两个集合相互对立的特性个数; F 为集对中两个集合既不共同具有、也不相互对立的特性个数; i 为差异不确定系数, 通常在 $[-1,1]$ 内取值, i 取-1与1时, 都是确定性的, i 在-1→1之间变化时, 令 $i \rightarrow 0$, 不确定性明显增加; j 为对立度系数, 通常取-1。令 $a=S/N$, $b=F/N$, $c=P/N$, 式(1)可简化为:

$$\mu_{A-B} = a + bi + cj \dots\dots\dots(2)$$

式中: a 为同一度, b 为差异度, c 为对立度, 其中 a 、 c 为相对确定的, b 为相对不确定的, 三者的统一形成了两集合联系的整体, 故有 $a+b+c=1$ ^[27,28,29]。

3.2 指标体系

衡量城市的生态系统健康状况, 既要考虑经济总体实力和社会文明程度, 又要考虑资源和生态环境的限制, 因此, 指标的选择应涵盖经济子系统、社会子系统、自然子系统及生态调控子系统 4 个层面, 也就是从生产力、生活态、生态势、生机度 4 个维度来综合表征城市生态系统发展状态^[11,13]。本文基于兰州市情及评价指标选择的科学性、典型性、动态性、易获取性、可操作性等原则^[30], 通过查阅《中国城市年鉴》(2003~2008)、《兰州统计年鉴》(2003~2009), 并在咨询专家的基础上最终选择了 34 个指标构建兰州市生态系统健康评级指标体系(表 1)。

3.3 权重确定

指标权重的确定分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法主要有专家打分法、层次分析

法、模糊聚类法等。但由于主观赋权法一般存在着较大的主观随意性^[29], 因此, 本文选择客观赋权法中常用的熵值法对评价指标进行赋权, 其具体评价指标的权重见表 1。

3.4 函数构建

利用集对分析方法开展兰州市生态系统健康状况评价, 步骤包括^[11,27,28,29]:

(1) 诸多属性问题 $Q = \{S, M, H\}$, 其中 $S = \{s_k\}$ ($k=1, 2, \dots, i$) 为评价区域时间集, s_k 为第 k 个年份; $M = \{m_r\}$ 为指标集 ($r=1, 2, \dots, n$), 通常 M 有不通的类型指标, 记 M_1 为正向型指标, M_2 为负向型指标(城镇登记失业率、城市居民与农村人均收入倍数差异、居民最低生活保障人数比例、恩格尔系数、人口自然增长率、男女比例、社会福利救济费用、单位 GDP 能耗为负向型指标, 其他均为正向型指标), m_r 为第 r 个指标; 则基于集对分析的关于问题 Q 的决策矩阵 $H = (h_{kr})_{i \times n}$, h_{kr} 为时间段 s_k 关于指标 m_r 的属性值。

(2) 构造最优评价集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和最劣评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 其中, u_r 、 v_r 分别为指标 m_r 的最优值和最劣值。

(3) 针对每一时间段 s_k , 计算指标 m_r 与 u_r 、 v_r 的同一隶属度 a_{kr} 和对立隶属度 c_{kr} , 结合每一个指标的权重加权求和得到 s_k 与 U 的平均同一隶属度 a_k 和平均对立隶属度 c_k 。

对于 $m \in M_1$, 比较区间为 $[u_r, v_r]$, 则在论域 $X_r = \{h_{kr}, u_r, v_r\}$, ($k=1, 2, \dots, p$) 上定义集对 $\{h_{kr}, u_r\}$ 的同一隶属度 a_{kr} 和对立隶属度 c_{kr} :

$$a_{kr} = \frac{h_{kr}}{u_r + v_r} \dots\dots\dots(3)$$

$$c_{kr} = \frac{h_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) h_{kr}} \dots\dots\dots(4)$$

a_{kr} 和 c_{kr} 分别表示 h_{kr} 与 u_r 、 v_r 的接近程度。同理, 对于 $m_r \in M_2$ 在比较区间 $[u_r, v_r]$ 得到集对同一隶属度 a_{kr} 和对立隶属度 c_{kr} :

$$a_{kr} = \frac{h_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) h_{kr}} \dots\dots\dots(5)$$

$$c_{kr} = \frac{h_{kr}}{u_r + v_r} \dots\dots\dots(6)$$

表 1 兰州市生态系统健康评价指标体系

Table 1 Assessment Index of Urban Ecosystem Health in Lanzhou City

准则层 (Criteria level)	要素层 (Feature layer)	指标层(Pointer layer)	权重 (Weight)	
生产力 (Productivity power)	经济发展水平 (Economic development level)	人均 GDP/元 (GDP per capita/RMB Yuan)	0.0317	
		城镇化率/% (Urbanization rate/%)	0.0302	
	经济结构 (Economic structure)	财政收入/亿元 (Fiscal revenue/ 10^8 RMB Yuan)	0.0305	
		第一产业贡献率/% (Contribution rate from primary industry/%)	0.0305	
		第二产业贡献率/% (Contribution rate from primary industry/%)	0.0288	
	经济竞争力 (Economic competitive ability)	第三产业贡献率/% (Contribution rate from primary industry/%)	0.0308	
		外资占 GDP 比重/% (Ratio to GDP of FDI/%)	0.0285	
		出口总额占 GDP 比重/% (Ratio to GDP of exports volume/%)	0.0307	
		社会消费品零售总额/亿元 (Social retail goods/ 10^8 RMB Yuan)	0.0301	
生活态 (Living status)	社会公平 (Social justice)	城镇登记失业率/% (Urban registered unemployment rate/%)	0.0302	
		城市居民与农村人均收入倍数差异 (Times of Income Inequality between urban residents and rural resident)	0.0294	
		居民最低生活保障人数比例/% (Ratio of receiving subsistence allowance/%)	0.0291	
	科教水平 (Scientific and educational level)	科技支出占地方财政支出比重/% (Ratio of technology expense/%)	0.0238	
		教育支出占地方财政支出比重/% (Ratio t of educational expense/%)	0.0304	
			每万人在校大学生数/人 (Number of university students per 10^4 persons/person)	0.0294
	生活质量 (The quality of life)	万人拥有医院床位数/张 (Hospital beds per 10^4 persons/beds)	0.0251	
		在岗职工年平均工资/元 (Per capita salary of on-the-job workers/RMB Yuan)	0.0307	
		城镇居民人均住房面积/ m^2 (The per-capita floor space of residents/ m^2)	0.0296	
			恩格尔系数 (Engel's coefficient)	0.0306
生态势 (Ecological ascendancy)	资源条件及利用 (Resources and utilization)	人均生活用水量(m^3 /人) (Daily household water consumption per capita/ m^3)	0.0302	
		人均城市道路面积/ m^2 (The per-capita urban road/ m^2)	0.0292	
	生态环境质量与安全 (Ecological quantity and safety)	建成区绿化覆盖率/% (Green coverage rate in established districts/%)	0.0297	
		人均居民生活用电量/Kw.h (Electricity consumption per capita/ Kw.h)	0.0288	
		空气质量优良率/% (Rate of good-air-quality days/%)	0.0276	
			工业废水排放达标率/% (Attainment rate of the industrial waste water/%)	0.0311
			城镇生活污水集中处理率/% (Concentrated sewage treatment rate/%)	0.0267
			生活垃圾无害化处理率/% (Rate of domestic garbage harmless/%)	0.0296
		工业固废综合利用率/% (Utilization rate of industrial solid waste/%)	0.0273	
生机度 (Vital force)	管理与调控能力 (Management and adjustment ability)	环保投入占 GDP 比重/% (Ratio to GDP of environmental protection invest/%)	0.0301	
		人口自然增长率/% (Rate of natural population increase/%)	0.0301	
	系统协调度 (Coordinate Index)	男女比例 (The proportion of men to women)	0.0299	
		旅游人数/万人次 (Number of tourists/ 10^4 person.time)	0.0307	
		社会福利救济费用/万元 (Social relief/ 10^4 RMB Yuan)	0.0285	
		单位 GDP 能耗/吨标煤*万元 ⁻¹ (Unit GDP Energy consumption/tce: 10^4 Yuan ⁻¹)	0.0304	

故此,

$$a_k = \sum_{i=1}^n w_r a_{kr} \dots \dots \dots (7)$$

$$c_k = \sum_{i=1}^n w_r c_{kr} \dots \dots \dots (8)$$

(4) 计算 s_k 与 U 的相对联系度 r_k , r_k 值越大, 表示城市生态系统健康状况越好。

$$r_k = \frac{a_k}{a_k + c_k} \dots \dots \dots (9)$$

综上所述, 利用集对分析方法, 可将评价城市生态系统健康状况的多个指标系统合成一个与最优评价集的相对联系度, 用来反映城市生态系统健康状况。

4 评价结果与分析 (Results and Analysis)

4.1 评价结果

根据各指标数据及熵值权重, 根据公式 (3) - (9), 计算兰州市城市生态系统指数与最优城市评价集的相对联系度 r_k 的值 (表 2), 进而评价兰州市 2002~2008 年城市生态系统相对健康状况。

研究结果表明, 2002~2008 年, 兰州城市生态系统的相对健康联系度 r_k 总体呈上升趋势, 2002 年代 0.4751 上升到 2008 年的 0.5179, 可以说明生态系统健康状况逐渐稳步提高。

表 2 兰州市生态系统健康评价指标值 (2002~2008)

Table 2 Values of Urban Ecosystem Healthy Assessment in Lanzhou (2002~2008)

项目 Items	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
a_k	0.4652	0.4805	0.4848	0.4860	0.4901	0.4940	0.5133
c_k	0.5140	0.4926	0.4833	0.4744	0.4684	0.4699	0.4779
r_k	0.4751	0.4938	0.5008	0.5060	0.5113	0.5125	0.5179

4.2 要素分析

为更好地分析各准则层要素对兰州市生态系统

健康指数的影响, 本文针对生产力、生活态、生态势、生机度 4 个准则层分指数开展集对分析, 其计算原理及步骤见本文第 3 部分。

就生产力而言, 其起伏变化较大, 尤其是 2003 年及 2006 年两大转折点。其中, 第一大转折点, 主要是 9 个经济指标的均衡增长, 尤其是财政收入、外资占 GDP 比重、出口总额 S 占 GDP 三项, 其联系度分别由 2002 年的 0.2033、0.8406、0.5161 增长到 2003 年的 0.4699、0.9209、0.7077; 第二大转折点主要影响因素是外资占 GDP 比重, 其联系度由 2005 年的 0.8998 迅速下降至 0.1590。说明“十五”期间兰州市抓住了西部大开发的有利机遇, 推动市场化建设, 实施“开放带动”和“工业强市”等战略为兰州经济发展做出了突出贡献。但随着“十一五”期间对高耗能产业的限制, 使得工业发展融资渠道狭窄, 外资利用率下降。故在以后经济发展中需重点培育低能耗、高技术的战略性新兴产业, 坚持循环经济道路, 同时提供适宜的招商引资优惠政策, 创建开放、统一、竞争、有序的利用外资的市场体制, 从而进一步提高经济竞争力 (图 1)。

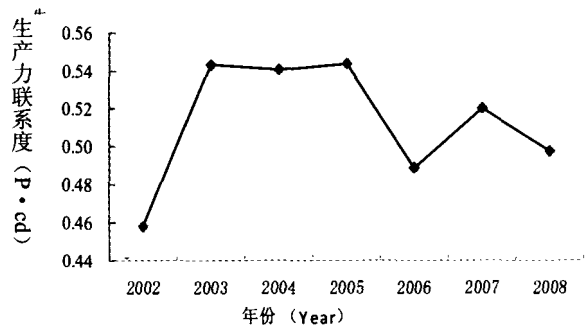


图 1 兰州市生产力联系度变化趋势

Fig. 1 Trend of connection degree of Productivity Power (p-cd)

就生活态而言, 其呈现上升趋势, 有效的说明了政府实施的民生政策卓有成效, 社会公平得以维护、科教水平得以提高、生活质量得以改善。其中居民最低生活保障人数比例与教育支出占地方财政支出比重的联系度, 分别由 2002 年的 0.347 6、0.346 7 增长到 2008 年的 0.652 4、0.653 3, 这主要得益于兰州市加快社会保障体系建设和实施“科教兴市”战略, 但 2007、2008 年兰州市的恩格尔系数尚高于全国平均水平, 说明兰州仍不富裕, 人民生活水平仍需大幅提升 (图 2)。

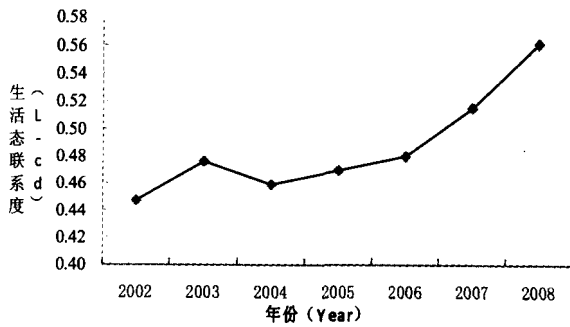


图2 兰州市生活态联系度变化趋势

Fig. 2 Trend of connection degree of living status (L-cd)

就生态势而言,其呈“单峰”现象。2006年生态健康度尤其突出,主要是生活垃圾无害化处理率的联系度由2005年的0.3673增长到2006年的0.6380,说明兰州清洁沼气的普及提升了当地生态环境质量。此后,生态势联系度急剧下降,影响指标主要是人均生活用水量、人均城市道路面积、建成区绿化覆盖率,三者联系度由2006年的0.6159、0.6318、0.6685降到2008年的0.3505、0.4622、0.5197,说明兰州资源利用不足,城市设施水平较低,在今后的发展中从高效节水的观点出发,建设节水型社会,同时科学规划城市路网布局,优先发展公交,解除水资源缺乏、“哑铃”状地形条件的限制,加强城市绿化,加快形成人与自然较为和谐的生态环境(图3)。

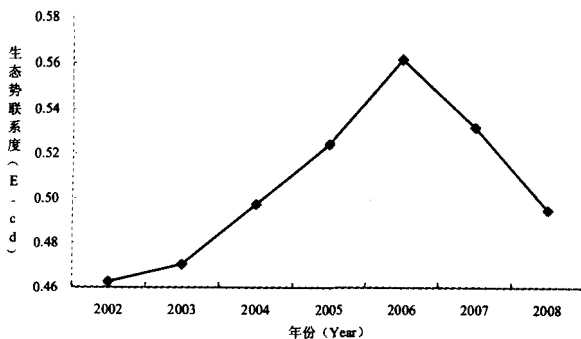


图3 兰州市生态势联系度变化趋势

Fig. 3 Trend of the connection degree of ecological ascendancy (E-cd)

就生机度而言,兰州城市生态系统的生机度呈现了高低循环不稳定现象,说明政府须加强管理与系统协调职能,提升调控能力,从法律、制度层面

上为市场竞争创造和保持良好的环境,采取必要的、适当的政策对城市发展中出现的矛盾和问题进行宏观调控,运用各种收入分配政策,建立健全社会保障和社会救助体系,使全市人民共享繁荣果实(图4)。

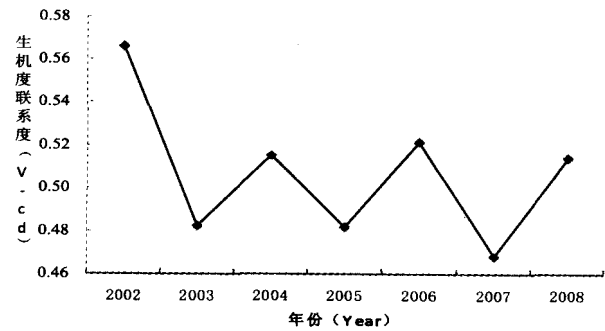


图4 兰州市生机度联系度变化趋势

Fig. 4 Trend of connection degree of vital force (V-cd)

5 结论与展望 (Conclusion and Prospect)

本文鉴于城市生态系统健康的不确定性,采用在解决系统中存在确定性与不确定性问题的集对分析方法来评估其生态系统健康程度,从生产力、生活态、生态势、生机度四个子系统出发,选择34个指标建立评价指标体系,通过计算各指标指数与最优评价集的相对联系度,对2002~2008年兰州城市生态系统健康进行评价,结果显示兰州市生态系统健康状况不断改善。其中,发展循环经济和高效外资利用是促进生产力提高的着力点,增加人民收入和提高生活水平是健康生活态的要求,完善城市建设和打造良好生态环境是兰州市的长期发展目标,加强政府管理和健全调控机制是实现兰州城市生态系统健康发展的保障。

关于城市生态系统健康评价,如何兼顾时空维度,开展西部十二个省会城市健康系统评级并预测未来生态健康发展趋势,将是下一步工作的研究重点,同时,如何提高其测度的精确度,进而具体辨识影响城市生态系统健康的关键因子,为城市发展提供更明晰的依据,也是未来一段时期内的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] 胡秀莲. 建设低碳城市: 路在何方——探寻低碳城市发展之路[N]. 科技日报, 2009-09-04.
- [2] Nancy B. Grimm, Stanley H. Faeth, Nancy E.

- Golubiewski, Charles L. Redman, Jianguo Wu, Xuemei Bai and John M. Briggs. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [3] 史宝娟, 赵国杰. 城市生态系统承载力理论及评价方法[J]. *生态经济*, 2008, (10): 341-344.
- [4] 仇保兴. 第三次城市化浪潮中的中国范例——中国快速城市化的特点、问题与对策[J]. *城市规划*, 2007, 31(6): 9-15.
- [5] 秦大河. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(6): 311-314.
- [6] 章轲. 低碳城市化: 中国式探路[N]. *第一财经日报*, 2009-0-02.
- [7] Nancy B Grimm, David Foster, Peter Groffman, J Morgan Grove, Charles S Hopkinson, Knute J Nadelhoffer, Diane E Pataki, and Debra PC Peters. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climate and societal gradients[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(5): 264-272.
- [8] 余瀛波. 全球气候变化期待大国合作[N]. *法制日报*, 2009-2-20.
- [9] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 王华峰. 城市生态系统长期研究展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(8):328-335.
- [10] 黄国和, 陈冰, 秦肖生. 现代城市“病”诊断、防治与生态调控的初步构想[J]. *厦门理工学院学报*, 2006, 14(3):1-10.
- [11] 苏美蓉, 杨志峰, 陈彬. 基于能值-生命力指数的城市生态系统健康集对分析[J]. *中国环境科学*, 2009,29(8):892-896.
- [12] Fu B J, Zhuang X L, Jiang G B, Shi J B, Lü YH. Environmental problems and challenges in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(22): 7597-7602.
- [13] Meirong Su, Brian D Fath, Zhifeng Yang. Urban ecosystem health assessment: A review[J]. *Science of The Total Environment*, 408(12): 2425-2434
- [14] Ryder R A. Ecosystem health, a human perception: definition, detection and the dichotomous key[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1990, 16(4):619 - 24.
- [15] WHO Regional Office for Western Pacific Region. Regional guidelines for developing a healthy cities project[R]. Manila:Western Pacific Region Office, 2000.
- [16] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem health: new goals for environmental management [M]. Washington, D.C: Island Press, 1992.
- [17] Peng J, Wang Y L, Wu J S, Zhang Y Q. Evaluation for regional ecosystem health: methodology and research progress[J]. *Acta Ecoogical Sinica*, 2007, 27(11):4877 - 85.
- [18] 陶晓燕. 我国典型资源枯竭型城市生态系统健康综合评价[J]. *地域研究与开发*, 2010, 29(1):119-123.
- [19] Sang Y H, Chen X G, Wu R H, Peng X C. Comprehensive assessment of urban ecosystem health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1280 - 1285.
- [20] 施佩, 涂国平. 系统动力学建模法在城市生态系统健康评价中的应用[J]. *统计与决策*, 2007, (8):37-38.
- [21] 宋豫秦, 曹明兰. 京津唐城市生态系统能值比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(11):5882-5890
- [22] 马海虎, 王奇, 柯强, 李光明, 徐竟成. 温州城市生态系统演化和可持续发展能力分析[J]. *生态经济*, 2008, (10):137-141
- [23] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 1~79
- [24] 张晓琴, 石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3):77-82.
- [25] 史永亮, 杨东峰, 王如松, 陈亮. 基于 PSR 模型的大丰市城市生态系统健康综合评价[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2):120-123.
- [26] 郁亚娟, 郭怀成. 城市病诊断与城市生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2008, (4):42-48.
- [27] 苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. *地理学报*, 2010, 65(4): 454-464.
- [28] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定理论与应用[J]. *系统工程*, 1996, 14(1): 18-23.
- [29] 苏美蓉, 杨志峰, 陈彬. 基于生命力指数与集对分析的城市生态系统健康评价[J]. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(2):122-128.
- [30] 苏美蓉, 杨志峰, 王红瑞, 杨小华. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(12):2072-2079.