基于熵权法的焦作市城市生态系统健康动态评价

高彩玲, 田采霞, 麻冰涓
(河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003)

摘　要:[目的] 评价焦作市城市生态系统健康动态,以便进一步提高焦作城市生态系统健康水平,优化经济结构,确保污染物的持续减排。[方法] 以综合性、代表性、可比性和可操作性为原则,结合国家生态文明建设和节能减排形势要求,从活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能及人群健康 5 个要素入手构建焦作城市生态系统健康评价指标体系;采用熵权法确定权重,从时间序列角度评价健康水平的相对状况。[结果] 2006—2012 年焦作城市生态系统健康水平逐年提高,活力和人群健康指数不断增加,组织结构指数小幅波动,恢复力和服务功能指数显著增加但显现波动。其中,经济结构变动是组织结构小幅波动的原因,污染物排放量和固废综合利用率的变化是城市恢复力及服务功能变化的主要因素。[结论] 优化经济结构,确保污染物的持续减排是提高焦作城市生态系统健康水平的关键。

关键词: 城市生态系统健康; 评价指标体系; 熵权法; 焦作市
文献标识码: B　　**文章编号**: 1000-288X(2015)03-0197-06　　**中图分类号**: X32
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.042

Assessment of Urban Ecosystem Health of Jiaozuo City Based on Entropy-weight Method

GAO Cailing, TIAN Caixia, MA Bingjuan
(*Institute of Resources and Environment, He'n Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan* 454003, *China*)

Abstract: [Objective] To evaluate the urban ecosystem health of Jiaozuo City in order to further improve the level of the city ecosystem health, optimize the economic structure, ensure the continuous reduction of pollutants emissions. [Methods] Considering indices's completeness, representativeness, comparability, maneuverability, as well as the new situation of emissions reduction and ecological civilization, the assessment indices system of urban ecosystem health of Jiaozuo City was put forward, which contains five aspects: vigor, organizational structure, resilience, ecosystem service and population health of urban ecosystem. The health state of Jiaozuo city during 2006—2012 was evaluated with the entropy-weight method. [Results] The health state of urban ecosystem of Jiaozuo City kept improving during 2006—2012, and the indices of vigor and population health of Jiaozuo City increased steadly. Although the indices of resilience and ecosystem service of urban ecosystem had fluctuated, that increased significantly during the study period. The variation of economic structure caused in a small fluctuation of organizational structure. The changes of pollutant emissions and utilization rate of solid waste were the main reasons to cause the variety of resilience and ecosystem service of Jiaozuo City. [Conclusion] To improve the level of urban ecosystem health of Jiaozuo City, it should optimize economic structure and ensure the continous reduction of pollutants emissions.

Keywords: urban ecosystem health; evaluation index system; entropy-weight method; Jiaozuo City

随着中国生态文明建设的提出,生态城市建设越来越成为关注焦点[1],享受生态、宜居的生活是每个市民的期盼。城市是以环境为体、经济为用、生态为纲、文化为常的具有高强度社会经济集聚效应和大尺度人口、资源、环境影响的地球表层微缩生态景观[2],城市生态系统健康(urban ecosystem health)是指城市人居环境的健康,即系统内人类生产生活通过与周围环境、各群落之间进行的物质和能量交换所形成持续的良性循环,以及城市生态系统内人类种群的健康[3]。由于生态系统的复杂性以及研究角度不同,城市生态系统健康的评价指标体系至今尚无定论,大致可以归结为 2 大类:(1) 根据城市生态系统的构成,

收稿日期:2014-03-16　　修回日期:2014-04-23
资助项目:河南省教育厅自然科学研究计划项目"河南省碳排放因素分解模型及其周期性波动研究"(2011B610004);河南理工大学博士基金项目"河南省碳排放研究"(B2011-012)
第一作者:高彩玲(1966—),女(汉族),河南省新郑市人,博士,副教授,主要从事城市生态和资源经济研究。E-mail:gaocl@hpu.edu.cn。

将其划分为自然子系统、经济子系统和社会子系统[4-6]；(2) 从系统可持续性能力的角度，划分为活力、组织结构、恢复力、服务功能和人群健康状况5个主要素进行评价，每个主要素细分指标，同时根据各指标值大小区分为病态、不健康、亚健康、较健康、很健康5个等级[7-9]。该体系最早由Costanza[10]提出，现为多数学者采纳[11-13]。然而，由于健康分级标准取值的不一致，目前研究中普遍存在"健康状态等级"标准的客观性问题[5]，致使研究结果存在一定的主观性。

焦作因煤而兴，以矿起家，历史上曾以"煤城"著称。李定策等从城市生态系统结构、功能和协调度3个方面构建评价指标体系，对1999—2000年焦作市生态状况进行评价。结果表明：焦作市各级生态指数明显偏低，生态环境状况不容乐观[14]。杜艳春等应用P—S—R模型，评价焦作市2001—2007年的生态安全状况。结果表明：2001—2003年间生态安全水平较低；2004—2007年间有所提高[15]。目前，焦作作为全国第一批资源枯竭型城市，已实现了从"黑色经济"到"绿色主题"的转型，被称为资源型城市转型的成功典范。本文选用活力、组织结构、恢复力、服务功能和人群健康状况作为评价的5个主要素，结合国家生态文明建设和节能减排形势要求，优化城市生态系统健康评价指标体系，避开健康分级标准取值问题，从时间纵向上评价2006—2012年焦作城市生态系统的相对健康状态，从而避免了由于判断健康标准的主观性而带来评价结论的不确定性。

1 评价指标体系

评价指标的选取应本着综合性、代表性、可比性和可操作性为原则。本文借鉴学术界普遍认可[16-17]的活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能和人群健康状况作为评价的5个主要素。其中，活力是指能量或活动性，主要指生产功能，体现在经济水平和经济效率两个方面；组织结构是指生态系统结构的复杂性，包括自然结构、经济结构和社会结构3方面；恢复力指系统在外界压力消失的情况下逐步恢复的能力，一定程度上可用城市生态系统的自我调节能力来体现；城市生态系统提供的服务功能通过环境质量、民生改善2方面来体现；人群健康状况从生活状况和文化教育水平2方面来反映。评价体系划分为5个主要素，11个因素，共涵盖36个指标(见表1)。

本指标体系特色为在"活力"主要素中用"GDP增长率"表征经济发展速度，但改变传统越快越好的理念，认为适度增长才是可持续发展。"十一五"期间焦作市地区生产总值年均增长13.6%，最高值为17.1%。结合焦作市"十二五"规划，本文以12%的增速做为理想值；用"单位GDP能耗"和"单位GDP水耗"来表示经济效率因素，以反映在节能减排形势下生态城市建设的响应，指标性质为逆向指标，越小越好；在"社会结构"主要素中，增加"65岁以上老人占总人口比率"代表老龄化社会现状，采取联合国划分老龄化社会新标准做为理想值；在"市区人口密度"取值方面，即考虑人口集聚带来规模效应，同时兼顾人口过度密集带来的负面影响，这里取10 000人/km做理想值；在"恢复力"主要素中除了废物处理效率外，增加了"污染减排"因素，避免了废物处理率的提高并不意味着污染物排放量的减小。污染减排涵盖COD，NH_3—N，SO_2和NOx这4个指标，与国家"十二五"主要污染物总量控制相衔接。污染减排指标的理想值本应取4个污染因子在焦作市的环境容量值，但由于缺乏这方面研究成果，外加中国正处于环境污染事故集中突发期，特将这4个指标定性为逆向指标，即排放量越少越好；在"环境质量"因素中，用"地下水监测井水质优良比"表征地下水水体质量，用"省控河流责任目标断面水质平均达标率"表征地表水水体质量；在"民生改善"因素中，"城镇居民人均住房面积"、"人均道路面积"、"千人拥有病床数"和"万人拥有公共汽车数"，尽管这些指标数值越大，城市居民生活越便利。但是由于土地资源是有限的，病床和公共汽车等公共资源也应注重利用效率，在此参考景彩娥[9]、赵帅等[16]评价指标中的健康值做为理想值。这些增加和变化显示了新形势下资源环境压力的变化，以及生态文明对经济发展的新要求，具有重要的现实意义。

2 焦作城市生态系统健康评价

2.1 数据来源及说明

评价指标中人均GDP，GDP增长率，第三产业增加值比重，城镇化率，人均公共绿地面积，建成区绿化覆盖率，森林覆盖率，城镇居民恩格尔系数，人口自然增长率，千人拥有病床数，万人拥有公共汽车数，文教科卫事业费占财政支持比例，R&D经费等数值源于《焦作统计年鉴》；城镇登记失业率、65岁以上老人占总人口比率、城镇居民人均住房面积、人均道路面积、燃气普及率等数值源于《河南统计年鉴》；高技术产业完成增加值源于《焦作市国民经济和社会发展统计公报》，高技术产业增加值与当年地区生产总值的比值即为高技术产业占GDP比重；R&D经费与当年地区生产总值的比重即为R&D经费占GDP的比重。

表 1　焦作城市生态系统健康评价指标体系及其权重

主要素层	因素层	指 标	指标性质或理想值	权 重
活 力	经济生产力	人均 GDP/元	正向	0.035 2
		GDP 增长率/%	12.00	0.002 3
	经济效率	单位 GDP 能耗(TCE/万元)	逆向	0.042 8
		单位 GDP 水耗(t/万元)	逆向	0.028 9
组织结构	经济结构	第三产业增加值比重(%)	正向	0.060 4
		高技术产业占 GDP 比重(%)	正向	0.034 7
		R&D 经费占 GDP 比重(%)	正向	0.038 5
	社会结构	市区人口密度(人/km^2)	10 000	0.000 1
		城镇化率(%)	正向	0.039 4
		城镇登记失业率(%)	3.50	0.000 1
		65 岁以上老人占总人口比率(%)	7.00	0.000 1
	自然结构	人均公共绿地面积(m^2/人)	13.00	0.000 1
		森林覆盖率(%)	25.00	0.002 9
		建成区绿化覆盖率(%)	40.00	0.000 2
恢复力	废物处理能力	生活污水处理率(%)	正向	0.050 5
		生活垃圾无害化处理率(%)	正向	0.025 6
		工业废水达标排放率(%)	正向	0.027 5
		工业固废综合利用率(%)	正向	0.076 1
	污染减排	COD 排放量(t)	逆向	0.043 6
		NH_3－N 排放量(t)	逆向	0.033 4
		SO_2 排放量(t)	逆向	0.047 8
		NOx 排放量(t)	逆向	0.041 8
服务功能	环境质量	空气良好天数(d)	正向	0.028 8
		区域噪声达标覆盖率(%)	正向	0.051 1
		地下水监测井水质优良比(%)	正向	0.066 1
		省控河流责任目标断面水质平均达标率(%)	正向	0.026 4
	民生改善	城镇居民人均住房面积(m^2/人)	35.00	0.000 6
		人均道路面积(m^2/人)	22.00	0.001 0
		千人拥有病床数(张/千人)	7.00	0.005 0
		万人拥有公共汽车数(辆/万人)	10.00	0.000 2
		燃气普及率(%)	正向	0.023 6
		人均生活用水量(m^3/人)	120.00	0.001 0
人群健康	生活状况	城镇居民恩格尔系数(%)	逆向	0.043 1
		人口自然增长率(‰)	4.79	0.000 1
		城镇居民人均可支配收入(元)	正向	0.043 1
	文化教育水平	文教科卫事业费占财政支持比例(%)	正向	0.026 5
		平均每万人在校大学生人数(人)	正向	0.051 4

空气良好天数、区域噪声达标覆盖率、地下水监测井水质优良比、省控河流责任目标断面水质平均达标率源于《焦作市环境质量报告》;主要污染物 COD,NH_3—N,SO_2 和 NOx 年排放量源于河南省环境保护厅网站公布的《河南省环境统计年报》。

单位 GDP 能耗只有在同一基准年不变价的基础上对比才有意义。《焦作统计年鉴》中 2006—2010 年单位 GDP 能耗是 2005 年不变价,而 2011—2012 年数据是 2010 年不变价。由于不同基期的不变价缺乏可比性,本评价采用折算后的 2005 年不变价的单位 GDP 能耗进行研究。单位 GDP 水耗由当年总用水量减去生活用水量,然后除以当年地区生产总值(2005 年不变价)的计算得来,当年用水量和生活用水量数据源于《焦作统计年鉴》。

2.2　评价方法

2.2.1　**原始数据准化**　为消除各评价指标单位、数据性质等量纲存在的差异,需要对数据进行标准化处理。本文分 3 种情况进行处理:

(1) **正向指标**。指标数值越大越好,其处理模型为:

$$r_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{i,\min}}{X_{i,\max}-X_{i,\min}} \quad (1)$$

(2) 负向指标。指标数值越小越好,其处理模型为:

$$r_{ij}=\frac{X_{i,\max}-X_{ij}}{X_{i,\max}-X_{i,\min}} \quad (2)$$

(3) 适度指标。指标与理想值越接近越好,其处理模型:

$$r_{ij}=1-\frac{|X_{ij}-X_{ij}^{*}|}{X_{ij}^{*}} \quad (3)$$

式中:r_{ij}——无量纲后的数据样本值;X_{ij}——第 i 指标第 j 年的原始值($i=1,2,3,\cdots,n$;$j=1,2,3,\cdots,m$);$X_{i,\min}$,$X_{i,\max}$——研究期内同一指标的最小值和最大值;X_{ij}^{*}——第 i 指标的理想值。本研究评价指标 n 个,$n=36$;研究期限为 2006—2012 年,$m=7$。

2.2.2 权重 确定权重的方法主要有 2 种:(1) 主观赋权法,如 AHP 法、Delphi 法等;(2) 客观赋权法,如熵权法、变异系数法。本研究采用熵权法确定各项指标权重。

熵权法是一种客观的赋权方法,它是利用各指标的熵值所提供的信息量的大小来决定指标权重的方法,可以避免人为因素干扰,使评价结果更符合实际[18]。计算步骤:

(1) 定义熵。第 i 个指标的熵定义为:

$$e_i=-k\sum_{j=1}^{m}f_{ij}\ln f_{ij} \quad (4)$$

$$f_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{j}r_{ij}} \quad (0\leqslant f_{ij}\leqslant 1) \quad (5)$$

式中:e_i——第 i 个指标的熵;常数 k 与系统样本数 m 有关,$k=1/\ln m$;f_{ij}——第 i 个指标第 j 年标准值的比重;如果 f_{ij} 为 0,则用 0.00 001 代替计算[15]。

(2) 定义熵权。第 i 个指标的熵权定义为:

$$w_i=(1-e_i)/\sum_{i}(1-e_i) \quad (6)$$

式中:w_i——第 i 个指标的熵权,即权重($0\leqslant w_i\leqslant 1$,$\sum_{i}^{n}w_i=1$)。

2.2.3 样本评价 各主要素中每个指标都从不同侧面反映城市生态系统健康水平,要想从总体上认识城市生态系统健康状况,需要进行综合评判。在此,采用线性加权函数计算城市生态系统健康指数,其评价模型为:

$$H_{ij}=\sum_{i=1}^{n}w_i r_{ij} \quad (7)$$

式中:H_{ij}——第 i 个评价指标第 j 年健康指数。

3 结果与分析

3.1 活力指数

经过标准化处理后,活力指数如图 1 所示。指数标准化后数值越大,活力越大,生态系统健康程度越高。从图 1 可以看出,2006—2012 年间活力指数逐年上升,经济生产力和经济效率指数稳步增加。原因在于 2006—2012 年间,焦作市人均生产总值不断增加,单位 GDP 能源消耗和单位 GDP 水耗不断下降,尽管经济发展速度虽有所波动,但总体处于适度发展。

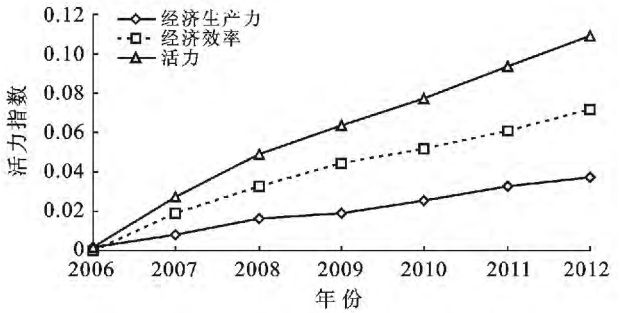


图 1 焦作市城市生态系统健康评价活力指数

3.2 组织结构指数

由组织结构指数(图 2)可知,2006—2012 年间,焦作市经济结构指数与组织结构指数同步波动,社会结构指数稳步增长,自然结构指数小幅增加。由此表明,经济结构是导致组织结构波动的主要原因。焦作市产业层次较低,尽管近些年提出“旅游强市”战略,但以旅游业、现代物流业、金融商贸为代表的服务业比重依然偏低,工业结构不尽合理。由于 2008 年和 2010 年第三产业比重的下降,进而导致经济结构指数下跌,由此引起组织结构指数的强烈波动。2012 年焦作市第三产业比重 24.0%,河南省为 31.0%,全国为 44.6%。由此可见,焦作市经济结构不合理问题突出,第三产业比重即低于河南省水平,更低于全国水平。因此,焦作市应突出转型发展,以提升、转型、优化为方向,大力发展高成长性产业,提升综合经济实力。

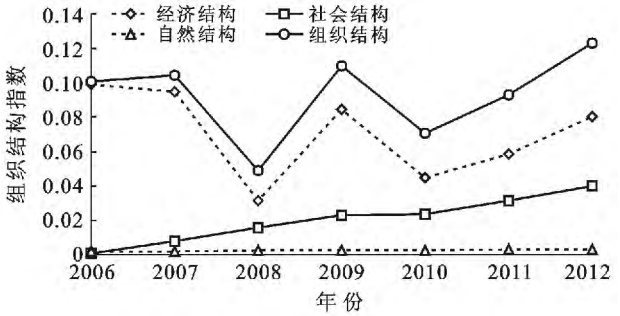


图 2 焦作市城市生态系统健康评价组织结构指数

3.3 恢复力指数

由恢复力指数(图 3)可以看出,2006—2012 年间,恢复力指数波动显著,改善明显;除 2010 年外,污

染减排指数几乎与恢复力指数同步波动;废物处理能力指数整体呈现上升态势但 2011 年下降明显。由此可以看出,污染减排是引起恢复力变化的主要原因。2010 年焦作市 COD 和 NH_3—N 排放量的增加,引起污染减排能力指数的下降;而 2011—2012 年间,固废综合利用率的下降是导致废物处理指数下降的原因。因此,提高固废资源化率,实现主要污染物的持续减排,是改善恢复力的关键因素。

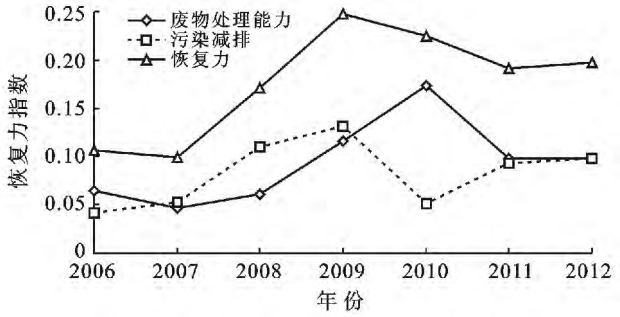


图 3　焦作市城市生态系统健康评价恢复力指数

3.4　服务功能指数

从服务功能指数(图 4)可以看出,2006—2012 年间,环境质量和生态服务功能指数同步波动,整体改善;民生改善指数于 2007 年上升后基本稳定。由此可见,环境质量是影响生态服务功能指数的主要因素。由于 2009 年环境空气质量优良天数的下降、2011 年地下水测井优良比和省控河流责任目标断面水质平均达标率下降,分别造成 2009 年和 2011 年环境质量指数下滑。因此,大力加强污染减排,改善大气环境和水环境质量,可以提升城市服务能力。

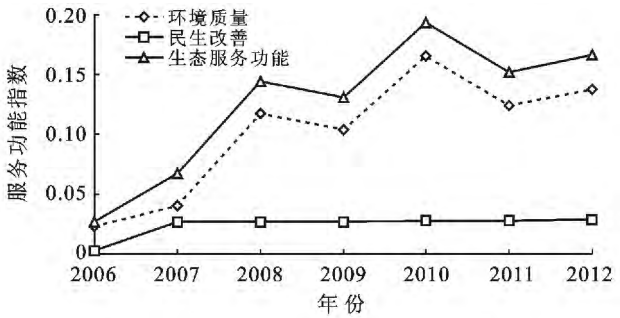


图 4　焦作市城市生态系统健康评价服务功能指数

3.5　人群健康指数

从人群健康指数(图 5)可以看出,2006—2012 年间,生活状况与人群健康指数同步变化,文教水平指数稳定上升。由此可见,生活状况是影响人群健康指数的主要原因。2008 年受经济危机影响,城镇居民恩格尔系数上升,导致生活状况指数略有下降。

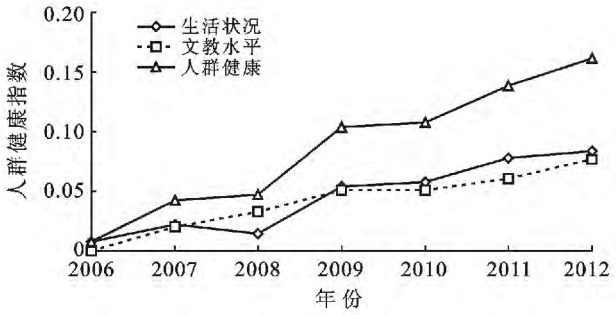


图 5　焦作市城市生态系统健康评价人群健康指数

3.6　综合指数

从综合指数(图 6)可以看出,2006—2012 年焦作城市生态系健康走势是稳中有升,健康程度不断提高。其中,2006—2009 年健康指数增长明显,2009—2012 年间增加平缓。究其原因:2005 年焦作市曾被列入全国“十大污染城市”,这一结果在社会上引起了强烈的震动和反响。为此,焦作市市长公开道歉,并痛下决心“脱胎换骨”,承认环保部门在推动科学发展、建设生态文明的历史进程中承担着重大历史使命[19],进而将调整工业布局、整治重污染企业、推广清洁能源等做为污染治理工作的重中之重,相继组织实施了以“关闭一批,搬迁一批,转产一批,治理一批”为核心的环境污染综合整治。通过污染整治,2006—2009 年间主要污染物排放量显著减少,市区环境空气优良天数逐年增加,由此引发城市恢复力和服务功能的显著提高。之后,随着 SO_2 和 NOx 排放量的反弹和固废综合利用率的下降,进而导致城市恢复力指数下滑,最终使得城市生态系统健康指数增长变缓。

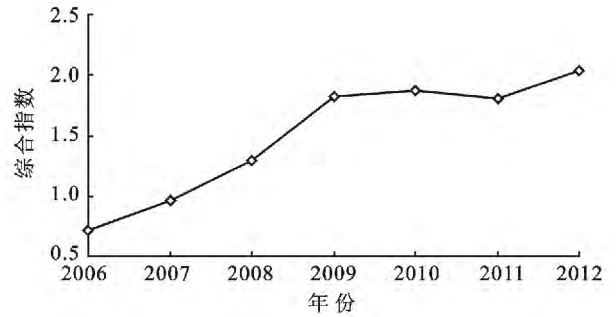


图 6　焦作市城市生态系统健康评价综合指数

4　结论与建议

研究结果表明,2006—2012 年焦作城市生态系统健康水平呈逐年提高,活力和人群健康指数不断增大,组织结构指数小幅波动,恢复力和服务功能指数显著增加但有波动。经济结构变动是导致组织结构波动的主要原因,污染物的持续减排是改善恢复力的

关键因素。正是由于焦作市实施了一系列的污染治理措施，使得 2006—2009 年主要污染物的快速减排，环境质量明显改善，进而促进了焦作城市生态系统健康程度的快速改善。要持续提高焦作城市生态系统健康水平，进一步优化经济结构，确保主要污染物的持续减排是关键。

城市生态系统健康评价是当代可持续发展研究的热点，正处在一个发展阶段，其评价指标体系还不够完善。尽管设计评价体系时考虑了指标间互不重迭，但指标数量多少适宜仍有待进一步研究。通常，评价指标数量越多，给予的信息量越大，越能真实反映实际状况；然而，由于经济现象自相关性的存在，评价指标过多会引起指标间的自相关性问题，如果选择有重复性的指标则会影响评价结果的科学性。然而现实是，要做到指标间完全不重迭是相当困难的。目前，可以采取主成分分析法、因子分析法等方法努力消除指标间的相关关系，相关问题有待于进一步探讨。

[参 考 文 献]

[1] 高彩玲，高歌，张现文. 基于 P—S—R 模型的郑州生态城市建设评价[J]. 地域研究与开发，2013，32(2)：79-83.

[2] 王如松，刘晶茹. 城市生态与生态人居建设[J]. 现代城市研究，2010(3)：28-31.

[3] 周文华，王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价[J]. 生态学报，2005，12(25)：3244-3251.

[4] 李茂娟，李天奇，王欢，等. 基于模糊综合评判的长春市生态系统健康评价[J]. 水土保持研究，2013，20(1)：254-259.

[5] 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.

[6] 周云凯，白秀玲，吕晓龙. 开封城市生态系统健康动态变化研究[J]. 地域研究与开发，2013，31(5)：162-165.

[7] 谷雨，刘昕，邓红兵. 基于层次分析法的重庆市城乡结合部生态系统健康评价[J]. 中国环境科学，2010，30(11)：1573-1578.

[8] 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.

[9] 景彩娥，张福平. 太原市城市生态系统健康评价及其趋势预[J]. 水土保持通报，2013，33(3)：280-286.

[10] Costanza R，Mageau M. What is a healthy ecosystem [J]. Aquatic Ecology，1999，33(1)：105-115.

[11] 孙燕，周杨明，张秋文，等. 生态系统健康：理论、概念与评价方法[J]. 地球科学进展，2011，26(8)：887-896.

[12] 孟伟庆，李洪远. 基于模糊综合评价模型的天津滨海新区城市生态系统健康评估[J]. 生态经济，2011(9)：174-177.

[13] 陈克龙，苏茂新，李双成，等. 西宁市生态系统健康评价[J]. 地理研究，2010，29(2)：214-222.

[14] 李定策，齐永安，杨雪梅. 焦作市城市生态现状评价[J]. 焦作工学院学报：自然科学版，2003，22(3)：180-183.

[15] 杜艳春，姜畔，毛建素. 基于 P—S—R 模型的焦作市生态安全评价[J]. 环境科学与技术，2011，34(S1)：280-285.

[16] 赵帅，柴立和，李鹏飞，等. 城市生态系统健康评价新模型及应用：以天津市为例[J]. 环境科学学报，2013，33(4)：1173-1179.

[17] 郭锐利，郑钦玉，刘娟，等. 基于熵值法和 GM(1，1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J]. 中国环境科学，2012，32(6)：1148-1152.

[18] 章穗，张梅，迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报，2010，7(1)：34-42.

[19] 翟传森. 焦作：实践科学发展观扎实推进环境保护[J]. 环境保护，2009，423(13)：50-51.