

# 基于能值分析的合肥城市生态系统健康动态评价\*

李 恒 黄民生\*\* 姚 玲 陈诗吉

(福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

**摘 要** 随着城市化和城市环境问题的日趋突出,城市生态系统健康评价成为近年来生态学领域研究的热点。本文运用能值分析方法,采用活力、组织结构、恢复力和服务功能维持4个要素,构建了评价城市生态系统健康的能值指标——城市健康能值改良指标,并用于合肥市生态系统的健康评价,然后将评价结果与天津、芜湖、上海、宁波、福州等6座国内城市进行比较。结果表明:2004—2008年合肥市的健康程度呈现下降趋势,合肥市的城市健康改良指数高于上海、宁波、包头和天津,低于芜湖、福州;因此,合肥今后还要着重从降低环境胁迫入手,改进城市的组织结构和恢复力与服务功能,不断提升城市的健康水平。

**关键词** 能值分析;城市生态系统;健康评价;合肥市

**中图分类号** X171.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)1-0183-06

**Dynamic assessment of urban ecosystem health in Hefei City based on emergy analysis.** LI Heng, HUANG Min-sheng\*\*, YAO Ling, CHEN Shi-ji (*College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(1): 183-188.

**Abstract:** With the increasing prominence of urbanization and urban environmental issues, urban ecosystem health assessment has become a hot topic in ecology. In this paper, four elements including vigor, organizational structure, resilience, and function maintenance were collected to construct an emergy indicator, the improved emergy urban ecosystem health index (IEUEHI), to assess urban ecosystem health. This index was used for assessing the ecosystem health of Hefei City, and compared with other six cities in China, *i. e.*, Tianjin, Wuhu, Shanghai, Ningbo, Baotou, and Fuzhou. The results showed that the health level of Hefei decreased continuously from 2004 to 2008. The IEUEHI of the City was higher than that of Shanghai, Ningbo, Baotou, and Tianjin, but lower than that of Fuzhou and Wuhu. Therefore, it would be necessary to improve the health level of Hefei by decreasing the environmental threat and improving the city's organizational structure and resilience and services.

**Key words:** emergy analysis; urban ecosystem; health assessment; Hefei City.

近年来,生态系统健康研究已成为国际生态领域新的研究热点,主要研究集中在对各类型生态系统健康的内涵、评价方法的探讨。随着城市环境问题的日趋突出,城市生态系统健康评价受到学者们的广泛关注。Odum等(1979)于20世纪70年代末期提出生态系统健康概念,将生态系统看成一个有机体。Rapport等(1999)将生态系统健康总结为以符合适宜的目标为标准来定义的一个生态系统的状态、条件或表现,即应包含2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。

选择适宜的评价标准是城市生态系统健康研究的关键。近年来对城市生态系统健康评价标准的研究主要有几个特点:1)越来越多的数学模型被引入到研究中来,主要模型有模糊分析法(郭秀锐等,2002)、指标综述法(肖风劲和欧阳华,2002)、突变级数法(魏婷等,2008)等;2)多学科方法的交叉研究日益增多(颜文涛等,2007;陈广洲和汪家权,2009);3)多种方法的整合研究成为新趋势,例如距离指数和协调指数的整合(胡廷兰等,2005)、熵权的模糊物元模型的整合(刘娜等,2007),生命力指

\* 国家基础科学人才培养基金项目(J0830521)和福建省自然科学基金项目(D0610004)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: mshuang@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2010-05-24 接受日期: 2010-10-25

数与集对分析方法的整合(苏美蓉等,2010);4)评价指标体系的不断完善,更多反映城市健康状况的指标被引入到城市健康评价中来。

Odum等(1987)于20世纪80年代创立能值研究方法,以太阳能为能量参照标准,量化自然生态系统和社会经济系统中的各种能量流、物流和信息流,突破了不同质量的能量之间统一评价的难题。近年来已被广泛应用于不同类型生态系统价值分析和评估(王建源等,2007;刘森等,2008)、国家和地区可持续发展政策响应方面(熊晓波等,2004;刘浩等,2008)。

本文将能值分析方法引入合肥城市生态系统健康评价研究,来揭示合肥城市生态系统健康发展情况,并通过与天津、芜湖、上海等城市的生态系统健康程度进行比较,探讨合肥生态系统健康现状和发展趋势,以期合肥城市生态系统的发展规划提供理论支持和科学依据。

## 1 基于能值的健康评价

### 1.1 单要素能值评价

本研究选择与能值指标相对应的4个要素,即活力(vigor)、组织结构(organizational structure)、恢复力(resilience)和服务功能维持(function maintenance),作为合肥市生态系统健康评价的要素。

活力是指生态系统的物质与能量输入输出循环容量,指标包括能值投资率(emergy investment ratio, EIR)、电力能值比及净能值产出率(net emergy yield ratio, NEYR)。能值投资率是来自经济活动的反馈能值与本区域能值输入的比值。其值越大表明系统经济发展程度越高,系统活力越强,其值越小说明发展水平越低,对环境的依赖越强(蓝盛芳等,2002)。电力的使用可以反映系统的开发程度和居民的生活水平,并可进一步衡量该系统的效率性、竞争力以及活力(黄书礼,2004)。净能值产出率反映了系统产出对经济的贡献大小,其值越大,表明获得一定的投入,系统的环境资源能值与经济反馈能值的利用效率越高(隋春花和蓝盛芳,2001)。

组织结构需要考察的是生态系统结构及组成的多样性,包括不可更新资源能值比和能值交换率(emergy exchange ratio, EER)2个指标。前一个指标反映系统的资源利用结构即对不可更新资源的依赖程度。后一个指标反映了系统与外界能值使用的交互情形,即系统的能值在发展中是不断流失还是

不断地富集。

郭秀锐等(2002)认为恢复力是生态系统维持结构与格局的能力,即胁迫消失时,系统克服压力及反弹回复的容量。指标包括环境负荷率(environmental loading ratio, ELR)、人口承载力以及废弃物产生率(emerge emergy of waste, EEW),分别表征系统在当前胁迫状态下对环境、人口的承载能力和运行过程所受的环境影响。服务功能维持能力是指城市生态系统为人类生产、生活提供相关载体的能力,包括指标有能值自给率(emergy self-sufficiency ratio, ESR)、能值货币比率和能值密度。

### 1.2 城市生态系统健康能值改良指数(IEUEHI)

在系统可持续发展能值指标研究中, Brown 和 Ulgiat(1997)提出了基于能值可持续指数(emergy sustainability index, ESI),即  $ESI = NEYR/ELR$ 。陆宏芳等(2002)针对 ESI 难以反映系统能值产出收益的缺陷,构建了评价系统可持续发展能力的能值指标(emergy index of sustainable development, EISD),即  $EISD = NEYR \times EER/ELR$ 。之后又进一步修正了 EISD 指数,即  $EISD = NEYR \times EER/(ELR + EWI)$  (Lu *et al.*, 2003)。刘耕源等(2008)首次用能值的方法进行城市生态系统的健康评价,并构建了城市健康能值指数(emergy-based urban ecosystem health index, EUEHI),即  $EUEHI = NEYR \times EER \times ED/ELR \times EMR$ 。

本文对 EUEHI 进行了适当的修改,以期更准确地反映系统的健康状况。以净能值产出率(NEYR)、能值交换率(EER)、能值自给率(ESR)分别代表系统的活力、组织结构和服务功能维持3个方面,以环境负荷率(ELR)和废弃物产生率(EEW)的乘积代表恢复力。综合以上指标构建了改良的城市生态系统健康指数(improved emergy-based urban ecosystem health index, IEUEHI),以期综合评价城市生态系统的健康水平。其数学表达式为:

$$IEUEHI = \frac{NEYR \times EER \times ESR}{ELR \times EEW} \quad (1)$$

改进后的城市生态系统健康能值指数,着重从系统自我发展的能力以及系统对发展所带来的废弃物的控制和处理能力方面来评价城市的健康状态。健康的城市系统通常具有较强的自我发展能力以及较低的废弃物排放和较强的废物处理能力。该健康指标可用于某一城市健康发展趋势研究,也可用于不同城市之间的横向比较研究。通常 IEUEHI 越高

的系统,其相对健康程度也就越高。

## 2 实证研究

### 2.1 研究区概况

合肥市是安徽省省会(31°31'N—32°37'N, 116°40'E—117°52'E),位于长江淮河之间、巢湖之滨,具有承东启西、贯通南北的重要区位优势,年均气温 15.7℃,年降雨量 1000 mm,年日照 2100 h,四季分明,雨量适中,属亚热带湿润季风气候。合肥是全省政治、经济、文化中心,全国重要的科研教育基地、现代制造业基地和区域性交通枢纽。全市面积 7047 km<sup>2</sup>,主要由低矮的江淮丘陵和平原组成。改革开放以来,特别是近年来,合肥市经济社会发展取得了瞩目的成就,经济增速持续全国领跑,城市竞争力逐年提升,对安徽经济的快速发展起到重要的拉

动作用。合肥市作为安徽省的核心龙头城市、皖江城市带承接产业转移的中心城市以及重要的现代制造业基地、高新技术产业基地、现代服务业基地,其健康发展必将对整个安徽省乃至中部地区的崛起都具有重要意义。

### 2.2 资料来源与方法

本文以合肥市统计年鉴(合肥市统计局, 2005—2009)和各相关部门的统计资料为基础,获取了相关的合肥市 2004—2008 年物质、能量、货币流动数据,并参照蓝盛芳等(2002)、Odum(1996)等研究中的能值指标的计算方法,对数据整理、计算,得到统一的太阳能值数据,分类归并后得到合肥市生态经济系统的能值流简表(表 1)。然后将这些数据带入到上述能值评价指标的计算中,即可得到评价城市生态经济系统健康的动态能值指标(表 2)。

表 1 合肥市生态系统能值流简表(2004—2008 年)

Table 1 Energy flow table of urban ecosystem in Hefei (2004—2008)

指标	表达式	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
可更新资源能值( $\times 10^{20}$ sej)	$R$	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57
不可更新资源能值( $\times 10^{22}$ sej)	$N$	1.42	1.53	1.68	1.93	2.34
进口能值( $\times 10^{21}$ sej)	$IMP$	3.31	3.48	3.68	4.88	5.70
出口能值( $\times 10^{21}$ sej)	$EXP$	3.19	4.07	4.98	6.28	7.93
总能值用量( $\times 10^{22}$ sej)	$U=N+R+IMP-EXP$	1.52	1.56	1.64	1.88	2.20
废弃物能值( $\times 10^{21}$ sej)	$W$	2.42	2.49	2.51	3.12	3.07
人口( $\times 10^6$ 人)		4.45	4.56	4.70	4.79	4.87
GDP( $\times 10^{10}$ 美元)		0.71	1.09	1.38	1.79	2.44

$R$  为可更新资源能值; $N$  为不可更新资源能值; $IMP$  为进口能值; $EXP$  为出口能值; $U$  为总能值用量。

表 2 合肥市生态经济系统健康能值评价指标汇总(2004—2008 年)

Table 2 Energy evaluation table for the urban ecosystem health in Hefei (2004—2008)

指标	表达式	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
活力						
能值投资率(EIR)	$IMP/(R+N)$	0.22	0.22	0.21	0.24	0.24
电力能值比(FER)	$ele/U$	0.20	0.24	0.25	0.26	0.25
净能值产出率(NEYR)	$(R+N+IMP)/IMP$	5.56	5.63	5.79	5.12	5.26
组织结构						
不可更新资源能值比	$N/U$	0.68	0.73	0.79	0.82	0.85
能值交换率(EER)	$IMP/EXP$	1.04	0.86	0.74	0.77	0.72
恢复力						
环境负荷率(ELR)	$(U-R)/R$	16.74	17.21	18.14	20.94	24.67
人口承载力( $\times 10^4$ 人)	$(R/U) \times pop$	25.01	24.80	24.50	21.75	18.87
废弃物产生率(EEW)	$W/U$	0.20	0.18	0.15	0.13	0.11
服务功能维持						
能值自给率(ESR, %)	$(N+R-EXP)/U$	78.09	77.51	76.37	73.88	73.27
能值货币比率(EMR)( $\times 10^{12}$ sej·美元 <sup>-1</sup> )	$U/GDP$	2.13	1.42	1.19	1.05	0.90
能值密度(ED)( $\times 10^{12}$ sej·m <sup>-2</sup> )	$U/area$	2.16	2.21	2.33	2.67	3.12
综合指标						
基于能值可持续指数(ESI)	$NEYR/ELR$	0.332	0.327	0.319	0.245	0.213
可持续发展能力能值指标(EISD)	$NEYR \times EER/ELR$	0.345	0.281	0.236	0.188	0.153
城市生态系统健康改良能值指标(IEUEHI)	$(NEYR \times EER \times ESR)/(ELR \times EER)$	1.79	1.36	1.19	0.82	0.80

$ele$  为系统年内消耗的电力总能值; $pop$  为系统年内的实际人口数量; $area$  为研究区域的总面积。

## 2.3 结果与分析

**2.3.1 单要素分析** 1) 生态系统活力。从活力指标分析,从2004—2008年,合肥市能值投资率在波动中升高,说明系统开发程度在不断增强,城市竞争力不断提升,这与合肥市近年来的大开发大建设密切相关。电力能值比从2004年的20%上升到2007年的26%,虽然2008年略有下降,但总体上保持上升的态势,说明合肥市的工业化水准逐渐上升,居民生活水平不断提高,用电需求量大增,电力能值消耗所占比重不断上升,城市活力有所增强。净能值产出率除在2007年有所下降外,总体上呈现波动上升趋势,表明合肥市经济发展对生态经济系统外反馈能值的依赖基本上是逐年增强的,系统发展的需求强劲,生产效率处在较高的水平,且有上升的趋势。上述3个指标综合说明合肥市经济效率在发展中不断升高,系统活力稳步提升。

2) 生态系统组织结构。从不可更新资源能值比的变化可以看出,5年来合肥市不可更新资源能值比逐年上升,不可更新资源占系统总能值用量的比重较大,表明系统资源利用结构尚不合理,仍处于以不可更新资源利用为主的状态,系统发展建立在对不可再生的石化能源大量消耗的基础之上。能值交换率逐年下降,一方面表明合肥市近年进、出口持续增长,但出口增幅大于进口增幅;另一方面反映了合肥作为一个加工制造业城市,经济发展较多依赖本地资源,不合理的能值交换结构导致本地能值的不断流失,城市能值财富贮存日减。从组织结构要素指标变化趋势可知合肥生态系统结构不合理,仍需要进一步的调整、改善。

3) 生态系统恢复力。从结果可知,5年来合肥的能值投资率随着城市开发强度的加大逐年上升,环境负荷也逐年加大。合肥的环境负荷率从2004年的16.74上升到2008年的24.67,系统处于高负荷状态,经济发展对环境系统的压力越来越大。主要原因是合肥近年经济发展迅速,一方面是对本地的可更新资源消耗过大,另一方面过多的依赖外界的反馈能值。合肥市的人口承载力逐年减小,从2004年的25.01万人下降到2008年的18.07万人,下降幅度明显;而合肥市实际人口总数却逐年增大,2008年的实际人口487万,是合理人口承载力的25.01倍,人口超载十分严重,人口压力逐年增大。废弃物产生率指标近年来略有下降,但废弃物能值占总能值使用量的比例较高,废弃物对生态环境的压

力较大,系统的资源利用效率有待提高,更要加强对废弃物的循环利用。从生态系统恢复力要素来看,系统对发展中产生的污染和影响的恢复能力较弱,有待于进一步提高能源利用效率、加强环境保护、提高废弃物处理消化能力,不断增强系统的恢复力。

4) 生态系统服务功能维持。能值自给率反映城市对自然资源的开发程度和系统自我支持的能力。由结果可知,近5年合肥的能值自给率从0.781下降到0.733,表明合肥市的发展对于内部资源的开发利用程度较高、依赖较大,购买能值的投入不够。但随着近年来的开放招商引资,促进了对反馈能值的利用,购买能值投入有所增加,本地资源的依赖程度有所缓解。再有合肥本地资源的相对匮乏,近年来对本地资源的开发强度已经很大,也促使合肥逐年降低了对本地资源的利用。能值货币比由2004年的 $2.03 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{美元}^{-1}$ 下降至2008年的 $9.02 \times 10^{11} \text{ sej} \cdot \text{美元}^{-1}$ ,能值密度则是从 $2.16 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$ 上升到 $3.12 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$ ,可见合肥市经济开发程度逐年提高,信息、科技和劳务等越来越多的驱动着合肥的经济发展,居民的生活福祉在快速的经济增长下日渐提高。

**2.3.2 3类指标的比较** 基于能值分析的可持续发展指数(ESI)为净能值产出率与环境负荷率的比值。如果一个国家或地区的经济系统净能值产出率高而环境负荷率又相对较低,则它是可持续的;反之则不可持续,但并不是此值越大,可持续性越高。 $<1$ ,这一系统是消费驱动的经济系统;它在 $1 \sim 10$ 生态经济系统富有活力和发展潜力; $>10$ 则是系统经济不发达的象征(Ulgiati & Brown, 1998)。由图2可以看出,从2004—2008年,合肥的可持续发展指数(ESI)从0.332下降到0.213,系统的可持续能力下降。下降的原因是系统的净能值产出率(NEYR)是在波动中下降的,而环境负载率(ELR)是逐年上升的。5年间合肥的ESI都 $<1$ ,表明合肥是消费驱动型的经济系统,经济较发达。

根据陆宏芳等(陆宏芳等,2002)对改进型可持续发展性能指数(EISD)的定义,系统的可持续发展能力与指标成正比关系,即EISD越高的系统,在可持续发展的长远尺度上越具竞争优势。由图1可看出,合肥的EISD从2004年的0.345下降到2008年的0.153,可持续发展能力逐年下降。由于系统的发展过多的依赖不可更新的石化燃料、原材料的大量投入,废弃物的大量排放,导致环境压力的加

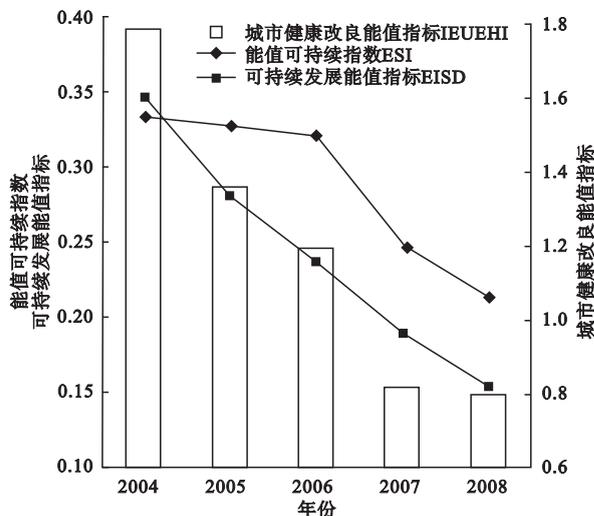


图1 3种综合评价指标的比较

Fig.1 Comparison of three different assessment indices

大,使得系统可持续发展能力的不断降低。另外,系统交换性能能值损失较多,造成系统本身经济能值的外流,可持续发展能力下降。

近年来,合肥经济发展水平不断的提高,居民生活水平有所提高。但是系统的能值自给率呈下降态势,城市生态系统系统服务功能维持方面无明显好转。系统的活力指标也稳步提升,但系统的组织结构尚不合理,生态系统的环境负荷不断的加大,承载能力在下降。由图2所示,合肥城市生态系统健康改进指数从2004年以来逐年下降,到了2007年之后,下降幅度有所放缓。系统的健康水平总体不断地降低,健康程度有所恶化,主要是因为合肥5年来的可持续发展能力不断降低,系统发展排放的污染物越来越多,生态环境压力日益增大,系统资源对经济发展的支撑能力不断下降等。2007年之后合肥市健康水平快速下降的趋势得到一定程度的遏制,表明

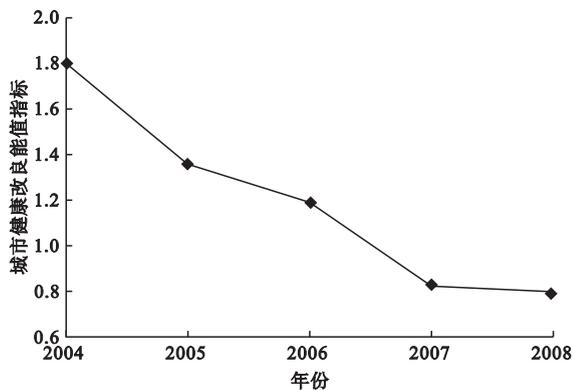


图2 合肥城市健康改进能值指数

Fig.2 Improved energy-based urban ecosystem health index of Hefei

合肥近几年重视调整产业结构,推进节能减排的作用开始显现。

**2.3.3 合肥与其他城市健康程度的比较** 通过将合肥的健康程度与其他城市进行对比,可以了解合肥在中国各城市中所处的位置,从而为合肥城市的健康发展提供一把标尺。本文根据有关研究成果的指标数据,经过相应推算得到各个城市的生态系统健康能值改良指数 IEUEHI,用于比较研究。

合肥与其他城市的健康比较(表3)结果显示,2006年福州的健康指数最高,为1.47。2007年天津的健康指数最低,为0.21。2008年合肥城市健康指数为0.80,在7个城市中位列第3,健康程度好于宁波(2000年)、包头(2004年)、上海(2003年)、天津(2007年);低于福州(2006年)以及同省的芜湖(2005年)。比较看出,虽然合肥的健康水平在各大城市中处于中上游,但和福州以及同省的芜湖等城市还有一定的差距。说明合肥生态系统中还存在影响合肥城市健康发展的不协调因素,城市的健康水平有待于进一步提高。

表3 合肥与其他城市健康比较表

Table 3 Comparison of health levels between Hefei and other cities

城市	净能值产出率	能值交换律	能值自给率	环境负载率	废弃物生产率	城市生态系统健康改良能值指标	数据来源
合肥(2008年)	5.26	0.72	0.73	24.67	0.14	0.80	本研究
天津(2007年)	2.62	1.50	0.45	14.45	0.60	0.21	孟伟庆等,2009
芜湖(2005年)	11.89	2.32	0.91	35.22	0.60	1.18	夏永久和王静,2007
上海(2003年)	1.02	2.56	0.58	17.34	0.30	0.29	隋春花和蓝盛芳,2006
宁波(2000年)	3.13	0.96	0.35	28.60	0.08	0.46	李加林和张忍顺,2003
包头(2004年)	1.31	60.30	0.22	696.02	0.07	0.36	刘耕源等,2008
福州(2006年)	4.92	1.25	0.69	47.91	0.06	1.47	胡晓辉和黄民生,2007

### 3 结论

研究表明,5年来合肥的可持续发展指标(ESI和EISD)是逐年下降的,城市健康程度也呈现下降的状态,健康等级在社会经济发展的过程中有所降低。说明合肥市近年来资源利用结构不够合理,效率不高,生态系统环境压力逐年加大,组织结构尚不合理,生态系统服务功能维持方面有待进一步改善,虽然城市生态系统的活力不断增强,但城市健康程度总体上呈逐年下降趋势,下降幅度在2007年之后有所放缓。通过与其他城市的比较发现,虽然合肥城市生态系统的健康水平在6个城市中处在中上游,但是健康水平下滑的趋势没有得到根本性的遏制。合肥今后还要着重从以下3个方面入手,不断地提高城市生态系统的健康水平和可持续发展能力:1)调整优化产业结构,转变经济增长方式。大力发展金融、保险、商贸、旅游、信息等服务性产业,转变以资金、原材料与劳动的大量投入来实现经济增长的传统模式,提高第三产业在区域经济结构中的比重。依靠科技进步,降低单位产品的能值消耗量,提高资源综合利用效率;加大可更新资源能值的开发利用,减轻对不可再生资源的依赖强度,降低区域的环境压力。2)减少废弃物排放,加强生态环境保护和治理。合肥的经济发展是建立在对资源的高消耗、污染物的高排放和较高的生态环境压力基础上的。为了实现系统的健康发展,今后要做好环境污染的治理,提高资源的循环利用率,降低废弃物排放,更好地保护自然资源和环境,扩大区域发展的环境容量。3)扩大开放,加强外来能值的引入。由于低附加能值商品出口比重较大,导致合肥本地能值的不断流失。今后要加大开放程度,广泛引入外来能值,充分利用区外资源,缓解本区的资源压力,同时也要重视高素质人才、先进技术等科技能值的引进,通过消化和创新,提升出口商品的技术含量,增加产品的附加能值,为区域健康发展累积能值财富。

### 参考文献

陈广洲,汪家权. 2009. 基于投影寻踪的城市生态系统健康评价. *生态学报*, **29**(9): 4918-4923.  
 郭秀锐,杨居荣,毛显强. 2002. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, **22**(6): 525-529.  
 合肥市统计局. 2005—2009. 合肥市统计年鉴(2005—2009年). 北京: 中国统计出版社.  
 胡廷兰,杨志峰,何孟常,等. 2005. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用. *环境科学学报*, **25**(2): 269-274.  
 胡晓辉,黄民生. 2007. 基于能值分析的福州与厦门城市生态系统比较研究. *生态科学*, **26**(6): 553-558.

黄书礼. 2004. 都市生态经济与能量. 中国台北: 詹氏书局.  
 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 2002. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社.  
 李加林,张忍顺. 2003. 宁波市生态经济系统的能值分析研究. *地理与地理信息科学*, **3**(2): 73-76.  
 刘浩,王青,李广军,等. 2008. 辽宁省循环经济发展水平的能值评估. *生态学杂志*, **27**(2): 245-249.  
 刘森,胡远满,常禹,等. 2008. 四川省汶川县生态经济系统能值分析. *生态学杂志*, **27**(11): 1997-2001.  
 刘娜,艾南山,方艳,等. 2007. 基于熵权的模糊物元模型在城市生态系统健康评价中的应用. *成都理工大学学报(自然科学版)*, **34**(5): 589-595.  
 刘耕源,杨志峰,陈彬,等. 2008. 基于能值分析的城市生态系统健康评价——以包头市为例. *生态学报*, **28**(4): 1720-1728.  
 陆宏芳,蓝盛芳,李雷,等. 2002. 评价系统可持续发展能力的能值指标. *中国环境科学*, **22**(4): 380-384.  
 孟伟庆,郝翠,李洪远,等. 2009. 天津市生态经济系统能值分析及其可持续性评价. *经济地理*, **29**(9): 1542-1546.  
 苏芙蓉,杨志峰,陈彬. 2010. 基于生命力指数与集对分析的城市生态系统健康评价. *中国人口·资源与环境*, **20**(2): 122-128.  
 隋春花,蓝盛芳. 2001. 广州城市生态系统能值分析研究. *重庆环境科学*, **23**(5): 21-26.  
 隋春花,蓝盛芳. 2006. 广州与上海城市生态系统能值的分析比较. *城市环境与城市生态*, **19**(4): 1-3.  
 王建源,薛德强,田晓萍,等. 2007. 山东省农业生态系统能值分析. *生态学杂志*, **26**(5): 718-722.  
 魏婷,朱晓东,李扬帆. 2008. 基于突变级数法的厦门市生态系统健康评价. *生态学报*, **28**(12): 6312-6320.  
 夏永久,王静. 2007. 基于能值分析理论的芜湖市生态经济系统可持续发展研究. *安徽农业科学*, **35**(36): 12084-12086.  
 肖风劲,欧阳华. 2002. 生态系统健康及其评价指标和方法. *自然资源学报*, **17**(2): 203-208.  
 熊晓波,代力民,邵国凡,等. 2004. 生态经济系统的能值分析与可持续发展——以吉林省延边地区为例. *生态学杂志*, **23**(5): 206-211.  
 颜文涛,袁兴中,邢忠. 2007. 基于属性理论的城市生态系统健康评价——以重庆市北部新区为例. *生态学杂志*, **26**(10): 1679-1684.  
 Brown MT, Ulgiati S. 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustain ability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, **9**: 51-69.  
 Lu HF, Ye Z, Zhao XF, et al. 2003. A new emergy index for urban sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, **23**: 1363-1368.  
 Odum EP, Finn JT, Franz EH. 1979. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient. *Bioscience*, **29**: 3492-352.  
 Odum HT. 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons.  
 Odum HT, Diamond C, Brown MT. 1987. Ecology and Economy: Emergy analysis and public policy in Texas. Policy Research Project Report Series, No. 12: 54-57.  
 Rapport DJ, Bohm G, Buckingham D, et al. 1999. Ecosystem health: The concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, **5**: 822-90.  
 Ulgiati S, Brown MT. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystem. *Ecological Modelling*, **108**: 23-26.

作者简介 李恒,男,1984年生,硕士研究生。主要从事区域产业布局与区域开发方面的研究。E-mail: liheng968@qq.com

责任编辑 刘丽娟