

基于能值分析的城市生态系统健康评价 ——以包头市为例

刘耕源, 杨志峰*, 陈 彬, 张 妍, 张力小

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要:城市生态系统健康是城市生态学近年来的研究热点和前沿。采用能值评价方法, 结合城市生态系统作为复合系统所具有的生态服务功能, 明确提出基于能值进行城市生态系统健康评价的理论框架和技术路线, 得出表征城市健康程度随时间的变化走向和比较意义。针对城市生态系统健康表征特性, 采用 4 个要素, 即活力 (V)、组织结构 (O)、恢复力 (R) 和服务功能维持 (F), 构建了评价城市生态系统健康的新的能值指标——城市健康能值指标 (EUEHI), 并将 EUEHI 应用于包头城市生态系统健康评价中, 并比较了其他 5 个城市的 EUEHI。结果显示 2000 ~ 2004 年包头健康程度总体呈现上升状态, 健康等级不断提高, 但同中国其他城市之间尚有距离, 健康程度仍处于较低水平。这说明近几年包头重视改变资源结构和利用效率, 使得城市生态系统在生态系统服务功能维持方面得到不断改善。同时, 包头作为老工业城市组织结构尚不完善, 环境负荷大, 生态系统承载力逐年降低, 因此仍需从降低环境胁迫入手, 逐步降低城市生态系统干扰, 使其恢复力得以提高, 增加系统反弹恢复的容量, 使之恢复维持结构与格局的能力, 实现城市健康和谐发展。

关键词:城市生态系统; 生态系统健康; 能值分析

文章编号: 1000-0933(2008)04-1720-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Emergy-based urban ecosystem health assessment: a case study of baotou city

LIU Geng-Yuan, YANG Zhi-Feng*, CHEN Bin, ZHANG Yan, ZHANG Li-Xiao

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1720 ~ 1728.

Abstract: Ecosystem health has been a hot topic of the urban ecology in the recent years. In combination with the ecosystem service function of the urban ecosystem, a theoretical framework and methodology of the urban ecosystem health assessment based on emergy were proposed and the characteristics and comparative implication of the temporal variation of the health level of the city were also outlined. Four factors, including vigor (V), organizational structure (O), resilience (R), and function maintenance (F), were collected to construct a novel emergy-based index on urban ecosystem health (Emergy-based Urban Ecosystem Health Index: EUEHI). Based on the EUEHI of Baotou and in comparison with the EUEHI of other five cities, Baotou city's health level continuously increased from 2000 to 2004, despite of a relatively low level on the whole due to an emphasis on the resource structure adjustment and utilization efficiency, which makes a better service function for the integrated urban ecosystem. Meanwhile, as a traditional industrial city, Baotou city was characterized by the disorganizational structure and large environment pressure, as well as low ecosystem recovery capability. Therefore, lowering gradually the environmental threat is necessary to eliminate the disturbance of the urban

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2005CB724204)

收稿日期: 2006-12-25; 修订日期: 2007-10-30

作者简介: 刘耕源(1983 ~), 男, 辽宁大连人, 博士生, 主要从事城市生态系统健康研究. E-mail: liugengyuan@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (No. 2005CB724204)

Received date: 2006-12-25; **Accepted date:** 2007-10-30

Biography: LIU Geng-Yuan, Ph. D. candidate, mainly engaged in urban ecosystem health. E-mail: liugengyuan@163.com

ecosystem, thus enlarging the urban ecosystem carrying capacity and promoting the power of urban ecosystem service function.

Key Words: urban ecosystem; ecosystem health; emergy analysis

Odum 于 20 世纪 70 年代末期引出生态系统健康这个概念,将生态系统看成一个有机体^[1]。健康概念从医药学方面延伸到生态系统研究是由于人控生态系统正面临着严重的“机能障碍”^[2]。目前,众多学者已从不同角度对生态系统健康进行了一些基础研究,其中一种是从生态系统自身的角度出发^[3~5],定义健康的系统具有恢复力,并保持内在稳定性,系统发生变化就意味着健康状态的改变;另一种则是基于生态系统为人类服务的理念^[6~8],考虑生态系统和人类的相互影响,其“健康”的标准在于为人类的生存和发展提供持续和良好的生态系统服务功能^[7]。在该意义下,生态系统健康类似于生态系统可持续。由此,生态系统健康的概念已从一个生态学范畴演变成一个整合生态-社会经济-人类健康的综合性范畴。Rapport 等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^[9]。

城市生态系统健康评价的研究关键在于选择适宜的评价指标和标准。Rapport 等提出以“生态系统危险症状(EDS)”作为生态系统非健康状态的指标^[10]。Costanza 从系统可持续性能力的角度,提出了描述系统状态的 3 个指标:活力、组织结构和恢复力,并进行综合评价^[11]。Jørgensen 等提出使用烟(Exergy)、结构烟(Structural exergy)和生态缓冲容量(Ecological buffer capacity)来评价生态系统健康^[12]。Jerry 等采用驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应模型对哈瓦那城市生态系统健康评价指标体系和评价方法进行了探索^[13]。Vassallo 等运用热力学和神经网络的方法对沿海区域生态系统健康进行评价,并选择了环境质量预警物质^[14]。马世骏、王如松等在复合生态系统理论观的指导下,对城市生态系统健康评价做了多方面研究^[15]。李日邦等从环境和健康角度选取 42 个指标建立指标体系,分析了中国城市环境-健康状况^[16]。王如松等针对北京提出生态城市建设生态控制论原理,并提出了包括测度城市物质能量流畅程度的生态滞竭系数、测度城市合理组织程度的生态协调系数和测度城市自我调节能力的生态成熟度等评价指标^[17]。郭秀锐等采用模糊数学方法构建了城市生态系统的健康评价模型,并对广州、北京、上海 3 个城市的总体健康状况进行了分析^[18];胡廷兰等整合距离指数和协调指数,对宁波的亚系统相对健康水平进行识别,并辨析了城市复合生态系统健康的空间差异性^[19]。此外曾勇^[20]、周文华^[21]等人也都从不同角度进行城市健康评价指标的遴选和梳理。

由于城市生态系统包括复杂的能流、物流、人口流和货币流代谢,为了综合考虑系统内部各种生态流的运行趋势及其交互作用,城市生态系统健康评价需寻求新的思路和方法,从系统生态学角度出发,进行综合的定量分析,量化城市生态系统健康状况。Odum 等人于 20 世纪 80 年代创立能值研究方法^[22],以地球系统最基础的驱动源——太阳能为共同的基础参照标准,量化自然生态系统和社会经济系统中的各种能流、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,并运用能路语言符号表征生态系统中各种能物流路径、转化和过程,对于能量等级结构和生态经济界面的统一评价方面具有明显的优越性,广泛应用于生态系统价值分析和评估、生态环境管理方案的可行性分析和预测、国家和地区可持续发展政策响应等方面^[23~30]。

本文采用能值分析方法构建了生态系统健康评价指标,将其应用于包头市的案例研究中,尝试用能值分析方法来统一度量能流、物流、人口流以及货币流关系,揭示城市生态系统健康发展情况,并与北京、广州、香港、宁波、澳门共 5 个典型城市生态系统健康程度进行比较,探讨包头城市生态系统健康发展的相对等级。

1 基于能值的城市生态系统健康

评价一个城市的健康程度,关键在于构建相应的指标体系和适宜的模型,用以监测生态系统健康的外在征兆和暗示有恶化危险的预警表象。传统指标体系评价方法是选取能够反映系统特点的表征指标,利用所选

取的指标运用层次分析等方法构造一个统一的框架,通过要素层权重的分配得到目标层综合的结果,最终由该结果判定系统健康的程度(图 1a)。而能值分析则是一个全新的研究角度,它基于系统生态学和能量学,从系统分析的角度出发,主要考虑系统的动力驱动机制,反映能流、物流投入产出的持续性,系统效率以及环境负荷等。能值健康指标实质上是系统自身实际能值流动量与环境能值之间相互关系的体现(图 1b)。能值健康分析方法迥异于诸如层次分析法、模糊评价法等外在预警式评价方法,其从系统内在物质循环与能量流动的角度阐述了城市生态系统健康理论。从能值分析角度剖析城市生态系统健康,其热力学基础在于系统内部物质能量的流转方式、速度和强度,制约和决定着系统组织结构的配置、运行的效率、经济发展的速度、环境负载的程度以及资源耗竭的速率等。因此,把握了进出系统的能量密度和能量流路径便可明晰系统健康的内在演化态势,这就是采用能值方法进行城市生态系统健康分析的根本原因。

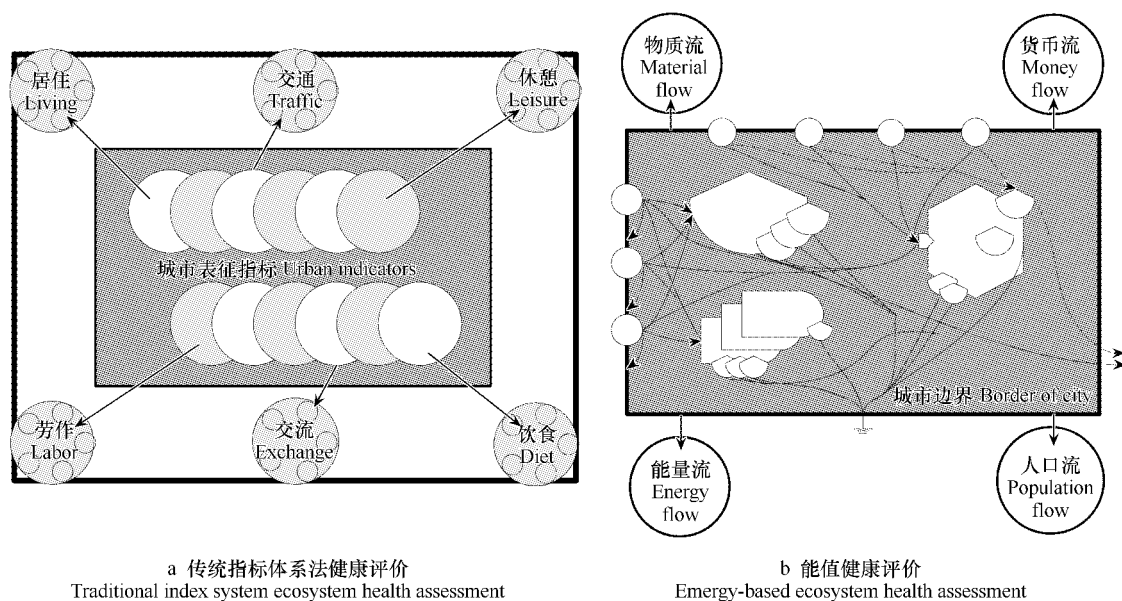


图 1 两种生态系统健康评价方法比较示意图

Fig. 1 Two methods of ecosystem health assessment

同时,能值流动的格局可以反映城市生态系统中多样化的资源、相互作用过程以及生态服务功能,从而为城市生态系统的健康评价提供了条件。本研究中城市生态系统的健康状态应该是一个复合系统尺度上的功能概念,包括如下内涵:系统活力强,能量品质及利用效率高;组织结构稳定;环境负荷小,恢复能力强;驱动机制合理,为人类提供福祉能力强等。

2 方法论

2.1 单要素能值评价

本研究选择活力(V)、组织结构(O)、恢复力(R)、服务功能维持(F)作为城市生态系统健康评价的 4 个要素(分别属于生物物理范畴、社会经济范畴以及一定的时间、空间范畴),每个要素都用相应的能值指标对城市生态系统现状进行描述。

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、电力能值比及净能值产出率。能值投资率为来自经济活动的反馈能与本区域能值输入的比值。电力的使用可以反映该区的开发程度,并可进一步衡量该系统的效率性、竞争力以及存活力^[31]。净能值产出率为经济过程产生的能值量与来自经济过程的反馈输入能值的比值,指数表征了经济过程是否满足向经济活动提供基础能源。在组织结构方面需考察生态系统结构及组成的多样性,其包括不可更新资源能值比和能值交换律两个指标,分别反应反映资源利用结构、系统与外界能值使用的交互情形。恢复力关注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、人口承载力以及废弃物产生率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。服务功能维持是城市生态系统对人类福祉提供能力的判定,包括指标有能值自给率、能值货币比率和能值密度。

2.2 城市生态系统健康能值指数(Emergy-based urban ecosystem health index, EUEHI)

在系统可持续发展能力的综合指标研究中,Brown 等提出了基于能值可持续指数(Emergy-based sustainability index, ESI),即 $ESI = NEYR/ELR$ ^[32]。针对 ESI 难以反映系统能值产出收益的缺陷,陆宏芳等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 $EISD = NEYR \times EER/ELR$,从而初步实现了能值效益与经济效益分析的整合^[33]。之后又从资源消耗与废弃物排放两方面度量区域发展的环境影响,进一步修正了 EISD 指数,即 $EISD = NEYR \times EER/(ELR + EWI)$ ^[34]。

城市生态系统健康和可持续发展的关系很近,他们的共同点均反应了生态系统为人类提供支持服务功能^[35]。目前对这两个概念的划分比较模糊,其中一种观点认为生态系统健康是可持续发展的先决条件^[36]。本文认为城市生态系统健康是基于活力、组织结构、恢复力、服务功能维持这 4 方面的协调发展,即城市的健康指数可定为这 4 个方面的综合。以净能值产出率(NEYR)、环境负荷率(ELR)、能值交换率(EER)分别代表活力、组织结构和恢复力 3 个方面,以能值密度(ED)与能值货币比(EMR)的比值来评定城市的服务功能维持。综合以上指标构建城市健康能值指数(Emergy-based Urban Ecosystem Health Index, EUEHI),以综合反映城市生态系统的健康水平。其数学表达式为:

$$EUEHI = \frac{NEYR \times EER \times ED}{ELR \times EMR} \quad (1)$$

城市生态系统健康能值指数可用于同一城市不同时期的纵向研究,以及不同城市之间的横向比较研究。EUEHI 越高的系统,其相对健康程度越高;通过对当前区域健康状况的评估,可针对系统内部活力、组织结构、恢复力、服务功能维持等方面进行整体调控,增加可更新资源利用能力,提高单位环境压力所换取的社会经济效益,实现城市系统发展模式的优化。

3 研究案例

包头市位于地处内蒙古中部中纬度地带(东经 $109^{\circ}15' \sim 111^{\circ}26'$, 北纬 $40^{\circ}15' \sim 42^{\circ}44'$),属于半干旱、中温带大陆性气候。地形呈中间高,南北低。黄河自城市南缘流经包头,是包头市目前及未来主要的供水水源。矿产资源种类繁多,蕴藏丰富。改革开放以后,包头经济和社会各项事业有了较快发展。包头市作为我国中西部地区以冶金、稀土、机械为主的综合性工业城市以及内蒙古自治区的经济中心,在内蒙古自治区的社会经济发展中具有重要的战略地位,它的健康发展对整个自治区及周边地区都具有重要意义。

以统计年鉴和政府各部门统计资料为基础,结合当地调查,获取包头 2000~2004 年 5 年期间环保、工业、农业、进出口等物质、能量、货币流动数据,分类归并以后得到包头市生态经济系统能值流简表(表 1)。将能值流数据代入上述能值评价指标的计算公式,即可得到能值投资率、电力能值比、净能值产出率等一系列评价包头市生态系统健康的 12 个动态能值指标(表 2)。

4 结果分析

4.1 健康评估单要素分析

4.1.1 城市生态系统活力

包头经济的快速发展很大程度上依赖于进口资源,由于投入的有偿性,系统的竞争能力较弱,环境负载能力大。从活力指标进行分析,在 2000~2004 年的 5a 之中,包头能值投资率不断降低,说明系统开发程度在波动中降低,但竞争力不断加强。这 5 年中包头电力能值比逐年上升,说明包头地区工业化水准逐渐上升,活力增强。净能值产出率指标呈波动上升趋势,表征城市社会经济子系统的循环反馈过程能够逐步满足经济活动所需的基础能源资源。指标的变化趋势说明包头经济效率在逐年升高,系统活力总体保持上升态势。

表 1 包头市生态系统能值流简表(2000~2004 年)

Table 1 Energy flow table of urban ecosystem in Baotou (2000–2004)

指标名称 Index	表达式 Expression	单位 Unit	2000	2001	2002	2003	2004
可更新资源能值	R	sej/a	2.10×10^{21}	2.10×10^{21}	2.10×10^{21}	2.10×10^{21}	2.10×10^{21}
不可更新资源能值	N	sej/a	5.10×10^{22}	5.41×10^{22}	6.95×10^{22}	6.99×10^{22}	8.42×10^{22}
进口能值	IMP	sej/a	2.21×10^{23}	2.44×10^{23}	2.50×10^{23}	2.70×10^{23}	2.81×10^{23}
出口能值	EXP	sej/a	2.06×10^{21}	2.41×10^{21}	2.84×10^{21}	3.60×10^{21}	4.66×10^{21}
总能值用量	$U = N + R + IMP - EXP$	sej/a	2.70×10^{23}	2.96×10^{23}	3.17×10^{23}	3.37×10^{23}	3.61×10^{23}
人口		人 Person	2.04×10^6	2.06×10^6	2.08×10^6	2.09×10^6	2.10×10^6
GDP		\$	2.85×10^9	3.11×10^9	4.16×10^9	5.63×10^9	7.60×10^9

可更新资源能值 Renewable energy flow; 不可更新资源能值 Nonrenewable energy flow; 进口能值 Input energy; 出口能值 Output energy; 总能值用量 Total energy; 人口 Population

表 2 包头市生态系统健康能值评估指标汇总表(2000~2004 年)

Table 2 Energy evaluation table for the urban ecosystem health in Baotou (2000–2004)

指标名称 Index	表达式 Expression	单位 Unit	2000	2001	2002	2003	2004
活力 Vigor							
能值投资率	$IMP/(R+N)$		4.16	4.34	3.49	3.75	3.26
电力能值比	elc/U		1.09×10^{-2}	1.08×10^{-2}	1.12×10^{-2}	1.11×10^{-2}	4.85×10^{-2}
净能值产出率	$(R+N+IMP)/IMP$		1.24	1.23	1.29	1.27	1.31
组织结构 Organizational structure							
不可更新资源能值比	N/U		0.19	0.18	0.22	0.21	0.23
能值交换律	IMP/EXP		107.28	101.24	88.03	75.00	60.30
恢复力 Resilience							
环境负荷率	$(U-R)/R$		521.12	570.83	611.31	649.23	696.02
人口承载力	$8 \times (R/U) \times pop$	人 Person	31305	28842	27178	25755	24130
废弃物产生率	W/U		4.07×10^{-2}	3.95×10^{-2}	4.10×10^{-2}	4.16×10^{-2}	6.84×10^{-2}
服务功能维持 Function maintenance							
能值自给率	$(N+R-EXP)/U$	%	18.29	17.63	21.18	19.84	22.17
能值货币比率	U/GDP	sej/\$	9.49×10^{13}	9.52×10^{13}	7.62×10^{13}	5.98×10^{13}	4.75×10^{13}
能值密度	$U/area$	sej/m ²	9.74×10^{12}	1.07×10^{13}	1.14×10^{13}	1.21×10^{13}	1.30×10^{13}
综合指标 Three indices							
基于能值可持续指数 (ESI)	$NEYR/ELR$		9.65×10^{-3}	8.74×10^{-3}	8.53×10^{-3}	7.91×10^{-3}	7.61×10^{-3}
可持续发展能力							
能值指标 (EISD)	$NEYR \times EER/ELR$		1.04	0.88	0.75	0.59	0.46
城市生态系统健康							
能值指标 (EUEHI)	$(NEYR \times EER \times ED)/(ELR \times EMR)$		0.106	0.099	0.113	0.120	0.126

能值投资率 Energy investment ratio; 电力能值比 Electric to total energy use; 净能值产出率 Net energy yield ratio; 不可更新资源能值比 Nonrenewable energy ratio; 能值交换律 Energy exchange ratio; 环境负荷率 Environmental loading ratio; 人口承载力 Population carrying capacity; 废弃物产生率 Waste producing rate; 能值自给率 Energy self-sufficiency; 能值货币比率 Energy money ratio; 能值密度 Energy density; 基于能值可持续指数 Energy sustainability index; 可持续发展能力的能值指标 Energy index of sustainable development; 城市生态系统健康能值指标 Energy-based urban ecosystem health index

4.1.2 城市生态系统组织结构

从不可更新资源能值比的变化可以看出,5a 中包头市不可更新资源能值比不断上升,表明包头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。能值交换律不断下降,显示包头作为一个矿产出口城市财富贮存日减,由于能值交换结构不合理导致本地能值的流失。组织结构要素指标的变化趋势表明包头

市生态系统结构仍未明显改善。

4.1.3 城市生态系统恢复力

包头市本身环境负荷就很大,从能值分析角度来看,近 5a 间,虽能值投资率有所下降,但环境负荷逐年加大,环境压力日趋严峻。外界大量的能值输入以及过度开发本地不可更新资源是引起环境系统恶化的主要原因。同样人口承载力逐年减小,但人口总数却逐年增大,2004 年包头可更新与进口总能值所承载人口仅占包头现有人口的 11.5%。废弃物产生率指标也逐年增大,生态胁迫不断加大,由 2000 年的 4.07% 上升到 2004 年的 6.84%,原因在于当年废气的排放量大幅度上升。

4.1.4 城市生态系统服务功能维持

包头能值自给率波动变化总体呈上升态势,但该指标均小于 1,表明包头市的发展依赖于外部的投入,经济的发展建立在摄取利用其他地区和国家财富的基础上,通过利用其他地区原始资源和产品,以达本地区经济的高速发展。能值货币比由 2000 年的 9.49×10^{13} sej/\$ 下降至 2004 年的 4.75×10^{13} sej/\$,可见包头经济活动所需资源大多来从自然环境资源中获取,但随着城市规模扩张和工业化程度的增强,促进了自然环境资源对经济增长的贡献,但仍有限。能值使用密度指标增加幅度很大,可知该地区能值使用的集约情形属于高度开发的地区,经济活动频繁。可见包头居民生活福祉在快速经济增长下已日渐升高,但主要来自商品而非自然环境的贡献。

4.2 三类能值指标的比较

由三类能值指标的不同走势(图 2)可见,ESI 和 EISD 呈减函数趋势,究其原因在于:①系统经济净能值产出率逐年下降,随着经济的发展,维持城市运作所投入的能值增长幅度要高于三次产业产出能值;且不可更新石化燃料、原材料的大量投入以及废弃物的大量排放,大大加重了城市环境压力,导致环境压力巨增,可持续发展能力不断降低。②包头市对外贸易中以输出能值为主,系统本身经济能值产出外流,虽然能值输出比起伏不大,但始终小于 1,造成包头可持续程度的下降。

目前,包头经济水平提高,居民生活福祉增加,城市生态系统服务功能维持方面有明显好转,活力指标中生态系统的初级生产力和物质循环率也在不断提升,但系统竞争力较弱,组织结构尚无明显改进,生态系统承载能力在下降。由图 3 所示,包头城市生态系统健康指数在不断变化中,其中 2001 年为一个拐点。包头市正处于健康临界状态向健康上升状态过渡的过程,总体趋势是稳中有升,健康程度在不断改善,指数变化情况与包头市的实际发展状况相吻合。

4.3 包头与其他城市健康程度比较

通过能值分析构建的城市生态系统健康能值指标,将城市生态经济系统的各种生态流统一为能值尺度,一方面,可以定量分析城市生态经济系统的健康程度,为正确处理人类社会经济活动与自然环境关系,为城市健康发展提供科学依据;另一方面,通过与其他城市或地

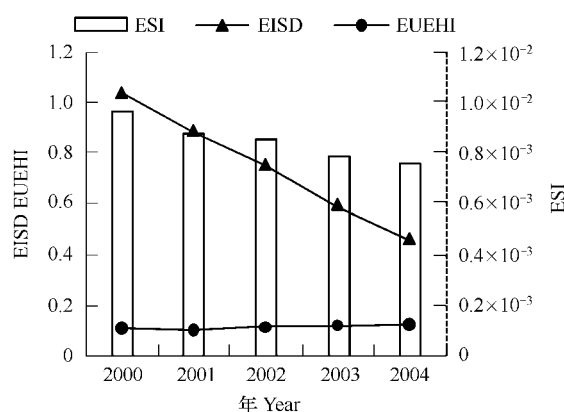


图 2 3 种指数综合比较评价图

Fig. 2 Comparison of assessments based on three different indices 基于能值可持续指数(ESI) Energy sustainability index;可持续发展能力能值指标(EISD) Energy index of sustainable development;城市生态系统健康能值指标(EUEHI) Energy-based urban ecosystem health index

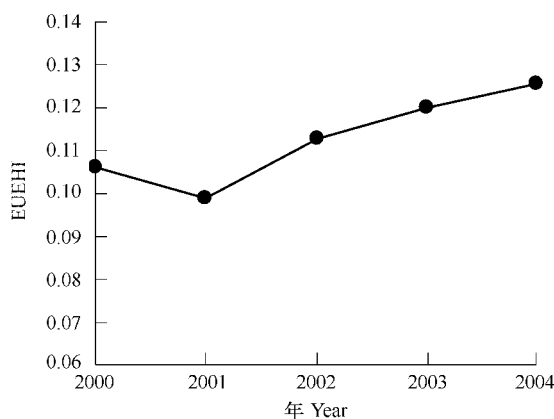


图 3 城市健康能值指标评价图

Fig. 3 Energy-based urban ecosystem health index

区比较研究,可以了解一个城市的相对健康程度,评估其在各城市中所处的位置,为城市健康发展提供一把标尺。

包头市与其他城市健康程度比较见表3和图4。由于数据来源于不同的研究成果,所以无法对同期城市健康程度进行统一比较,比较结果可以看出,1988年香港健康程度最低,EUEHI为0.101;2001年北京、1995年广州和2003年澳门健康程度高且比较接近,2003年澳门为6个城市健康程度最高者,EUEHI为0.174。虽然包头2004年健康程度相对前几年已经逐渐好转,但同中国其他发达城市之间尚有距离,健康程度仍处于较低水平。

表3 包头市与其他城市健康程度比较表①

Table 3 Relative healthy levels of six cities

城市 City	NEYR	ELR	EER	ED	EMR	NEYR × EER/ELR	EUEHI	来源 Sources
包头(2004) Baotou(2004)	1.31	696.02	60.3	1.30×10^{13}	4.75×10^{13}		0.126	本研究 This study
北京(2001) Beijing(2001)	7.69	161.11	1.65	1.12×10^{13}	5.22×10^{12}		0.169	[37]
广州(1995) Guangzhou(1995)	3.51	30.02	0.62	1.16×10^{13}	5.83×10^{12}		0.144	隋春花,1999* Sui, 1999
香港(1988) Hongkong(1988)	1.8	2587.6	1.28	1.15×10^{14}	1.02×10^{12}		0.101	[26]
宁波(2000) Ningbo(2000)	3.13	28.6	0.96	3.14×10^{12}	2.07×10^{12}		0.159	[39]
澳门(2003) Macao(2003)				4.05×10^{14}	2.78×10^{12}	0.0012	0.174	[30]

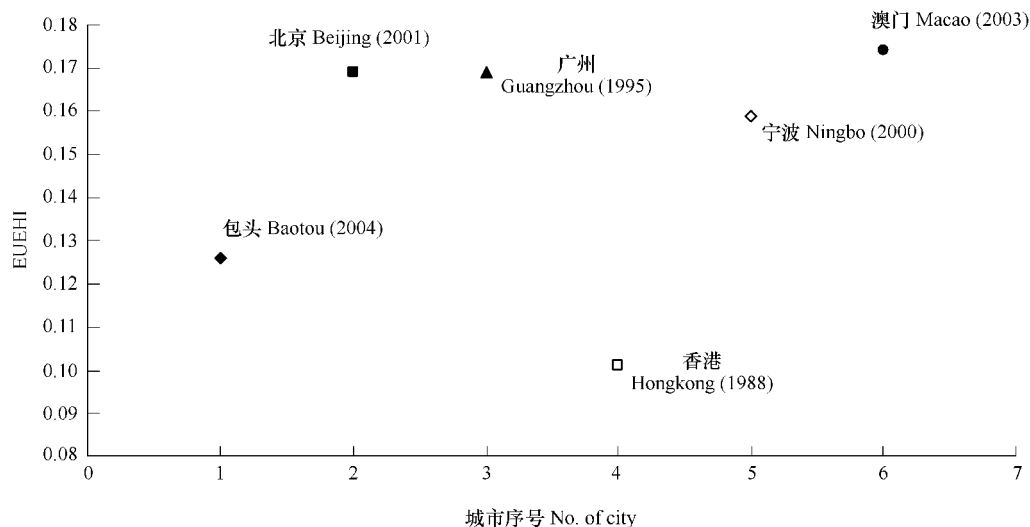


图4 包头市与其他城市健康程度比较图

Fig. 4 Relative healthy levels of six cities

6 结论

(1) 本文整合和提炼能值分析方法,从系统活力、组织结构、恢复力、服务功能维持等4个关键要素出发进行城市生态系统健康评价,构建反映综合健康状况的健康能值指数,能够用于同一城市不同时期的纵向研

① 隋春花. 广州城市生态系统能值分析研究. 华南农业大学硕士论文. S181. 1999

究,以及不同城市之间的横向比较。通过建立城市生态系统健康能值表征体系,将为城市生态系统健康发展的多情景预测分析和多要素调控夯实基础,进一步实现城市生态系统整体调控,最终促进城市生态系统健康和谐发展

(2)对包头城市生态系统的案例研究显示 5a 来包头整体健康程度总体呈现上升状态,健康等级不断提高,这说明近几年包头重视改变资源结构和利用效率,使得城市生态系统的组织结构和生态系统服务功能维持方面不断改善,社会、经济、自然结构趋向合理,居民生活福祉增加,健康程度提高。另一方面,包头作为老工业城市环境负荷大,生态系统恢复力本身较低,而且还在逐年降低,仍需要从降低环境胁迫入手,逐步降低城市生态系统干扰,使其恢复力得以提高,增加系统克服压力及反弹恢复的容量,使之恢复维持结构与格局的能力。

(3)通过包头与北京等 6 城市能值健康指数的比较,并结合其他两类反映城市不同层面发展状况的能值指标(ESI 和 EISD)分析得出,虽然包头 2004 年健康程度相对前几年已经逐渐好转,但同中国其他发达城市之间尚有距离,健康程度仍处于较低水平,所以还需进一步调整能源结构,改进城市活力、组织结构、恢复力与服务功能,提高自身的健康水平。

References:

- [1] Odum E P. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient. *BioScience*, 1979, 29(6): 349—352.
- [2] Rapport D J. Ecosystem health: Exploring the territory. *Ecosystem Health*, 1995, 1(1), 5—13.
- [3] Schaeffer D J, Henricks E E, Kerster H W, *et al.* Ecosystem health I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, 12(2): 445—455.
- [4] Rapport D J. *Ecosystem health*. Oxford: Blackwell Science, 1998, 1—35.
- [5] Costanza R, Norton B G, Hashell B D, *et al.* *Ecosystem health: New goals for environmental management*. Washington D C: Island Press, 1992, (3): 23—41.
- [6] Mageau M T, Costanza R, Ulanowicz R E. The development and initial testing of a quantitative assessment of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, 1(4): 201—213.
- [7] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J, *et al.* Assessing ecosystem health. *Trend in Ecology & Evolution*, 1998, 13: 397—402.
- [8] Borrazzo J, Walling R, Falk H. Overview of international environmental health. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2003, 206(4-5): 257—262.
- [9] Rapport D J, Bohm G, Buckingham D, *et al.* Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82—90.
- [10] Rapport D T, Regier P R, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress. *American Naturalist*, 1985, 125: 617—640.
- [11] Costanza R. Toward an operational definition of health. *Ecosystem Health*, 1992, 6(5): 239—256.
- [12] Jørgensen S E. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, 1(3): 150—160.
- [13] 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.
- [14] Vassallo P, Fabiano M, Vezzulli L, *et al.* Assessing the health of coastal marine ecosystems: A holistic approach based on sediment micro and meio-benthic measures. *Ecological Indicators*, 2006, 6(3): 525—542.
- [15] Ma S J, Wang R S. The social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(2): 27—33.
- [16] Li R B, Tan J A, Wang W Y, *et al.* The regional comprehensive environment-health assessment of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 12(20): 157—163.
- [17] Wang R S, Zhou Q X, Hu R, *et al.* Urban ecology control method. Beijing: Meteorological Press, 2000. 31—40.
- [18] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Ecological analysis on urban sustainability-Guangzhou as a case city. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2002, 22(6): 525—529.
- [19] Hu T L, Yang Z F, He M C, *et al.* An urban ecosystem health assessment method and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 25(2): 269—274.
- [20] Zeng Y, Shen G X, Huang S F, *et al.* Assessment of urban ecosystem health in Shanghai. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 208—212.

- [21] Zhou W H, Wang R S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 12(25): 3244—3251.
- [22] Odum H T, Diamond C, Brown M T. *Emergy Analysis and Public Policy in Texas*, Policy Research Project Report. *Ecology and Economy*, 1987, 12(5): 54—65.
- [23] Brown M T, Odum H T. Emergy synthesis perspectives, sustainable development and public policy options for Papua New Guinea. In: *A Research Report to the Cousteau Society*. Gainesville, FL: Center for wetlands, University of Florida, 1992, 5(2): 111—124.
- [24] Huang S L, Odum H T, Ecology and economy: emery synthesis and public policy in Taiwan, *Journal of Environmental Management*, 1991, 32: 313—333.
- [25] Huang S L. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management*, 1998, 52: 39—51.
- [26] Lan S F, Odum H T. Emergy evaluation of the environment and economy of Hong Kong. *Environmental Science*, 1994, 6(4): 432—439.
- [27] Odum H T, Brown M T, Whitfield D F, *et al.* Zonal organization of cities and environment: A study of energy systems basis for urban society, Cross comparison of Chinese and American societies. *The American Journal of Science*, 1995, 11(8): 242—256.
- [28] Yan M C, Odum H T. A study on emery evaluation and sustainable development of Tibet eco-economic system. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(2): 116—125.
- [29] Li H T, Liao Y C, Yan M C, *et al.* Emergy evaluation and assessment of sustainability on the eco-economic system of Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 765—772.
- [30] Lei K P, Chen F P, Wang Z S. The emery synthesis and sustainability analysis of city's environment and economy. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 2(2): 439—448.
- [31] Huang S L. *Emergy basis for urban ecological economic system*. Taipei, China: Chans Bookstore, 2004. 147—151.
- [32] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and rations to evaluate sustain ability: Monitoring Economies and Technology Toward Environmentally Sound Innovation. *Ecological Engineering*, 1997, 9: 51—69.
- [33] Lu H F, Lan S F, Li L, *et al.* Studies on emery indices for evaluating system sustainable development property. *China Environmental Science*, 2002, 22(4): 380—384.
- [34] Lu H F, Ye Z, Zhao X F, *et al.* A new emery index for urban sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1363—1368.
- [35] De Leo G, Levin S, The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation Ecology*, 1997, 1(1): 163—171.
- [36] Gallopini G C. The potential of agroecosystem health as a guiding concept for agriculture research. *Ecosystem. Health*, 1995, 1: 129—141.
- [37] Li Z L, Chen F X, Li Z J. Emergy analysis of urban ecosystem in Beijing. *Urban Problems*, 2005, 6: 25—29.
- [38] Li J L and Zhang R S. Energy analysis for evaluating sustainability of Ningbo ecology-economic system. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, 3(2): 73—76.

参考文献:

- [15] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984 4(2): 27~33.
- [16] 李日邦, 谭见安, 王五一, 等. 中国环境-健康区域综合评价. *环境科学学报*, 2000. 20(增刊): 157~163.
- [17] 王如松, 周启星, 胡聃, 等. 城市生态学调控方法. 北京: 气象出版社, 2000. 31~40.
- [18] 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.
- [19] 胡廷兰, 杨志峰, 何孟常, 等. 一种城市生态系统健康评价方法及其应用. *环境科学学报*, 2006, 25(2): 269~274.
- [20] 曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 等. 上海城市生态系统健康评价. *长江流域资源与环境*, 2005. 14(2): 208~212.
- [21] 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. *生态学报*, 2005. 12(25): 3244~3251.
- [22] 严茂超, Odum H T. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究. *自然资源学报*, 1998, 13(2): 116~125.
- [23] 李海涛, 廖迎春, 严茂超, 等. 新疆生态经济系统的能值分析及其可持续性评估. *地理学报*, 2003, 58(5): 765~772.
- [24] 李金平, 陈飞鹏, 王志石. 城市环境经济能值综合和可持续性分析. *生态学报*, 2006, 2(2): 439~448.
- [25] 黄书礼. 都市生态经济与能量. 中国台北: 詹氏书局, 2004. 147~151.
- [26] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李雷, 等. 评价系统可持续发展能力的能值指标. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 380~384.
- [27] 陆宏芳, 叶正, 赵新锋, 等. 城市可持续发展能力的能值评价新指标. *生态学报*, 2003, 23(7): 1363~1368.
- [28] 李占玲, 陈飞星, 李占杰. 北京市城市生态系统能值分析. *城市问题*, 2005, 6: 25~29.
- [29] 李加林, 张忍顺. 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*, 2003, 3(2): 73~76.