

# 基于能值-生命力指数的城市生态系统健康集对分析

苏美蓉,杨志峰\*,陈 彬 (北京师范大学环境学院,水环境模拟与污染控制国家重点实验室,北京 100875)

**摘要:** 综合考虑城市生命体特征及物质能量代谢层面因素,依托城市生命力指数框架,结合能值指标,构建城市能值-生命力指数,以全面反映城市生态系统健康状况.引入集对分析这种不确定理论与方法,比较城市生态系统相对健康状况.采用基于集对分析的城市能值-生命力指数综合评价模型及信息熵权重,比较北京、上海、武汉、广州等 16 个城市的生态系统相对健康状况,结果表明,厦门、青岛、杭州、上海、北京健康水平相对较高,而乌鲁木齐、成都、哈尔滨健康水平相对较低,其他城市则为中等水平.

**关键词:** 城市生态系统健康; 能值; 生命力指数; 集对分析

中图分类号: X321,Q148

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2009)08-0892-05

**Set pair analysis for urban ecosystem health assessment based on emergy-vitality index.** SU Mei-rong, YANG Zhi-feng\*, CHEN Bin (State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *China Environmental Science*, 2009,29(7): 892~896

**Abstract:** Integrating the vitality characteristic of urban ecosystem and situation of energy and materials metabolism, the urban emergy-vitality index was constructed to comprehensively represent the urban ecosystem health status by incorporating the emergy-based indices into the framework of urban vitality index. Set pair analysis (SPA), which objectively treats and systematically measures the uncertainty level, was introduced to assess the relative health status of the urban ecosystem. Through the integrated SPA-based urban emergy-vitality assessment model and the indicator weights determined by information entropy method, the relative health status based on urban emergy-vitality index among each urban ecosystem was estimated, by choosing sixteen typical Chinese cities including Beijing, Shanghai, Wuhan, Guangzhou, etc. as study objects. The urban ecosystem health states of Xiamen, Qingdao, Hangzhou, Shanghai and Beijing were better, while those of Urumchi, Chengdu and Harbin were relatively worse.

**Key words:** urban ecosystem health; emergy; vitality index; set pair analysis

城市生态系统结构复杂、功能多样,如何全面考虑其结构与功能特征以表征城市生态系统健康状况,对城市生态系统的持续健康发展具有重要意义.从结构、功能、活动、发展演化规律等方面看,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<sup>[1]</sup>.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.从物质能量代谢角度入手分析城市生态系统的结构与功能特征,也是城市生态系统健康研究中不容忽视的一个方面.

本研究提出综合生命体理念与物质能量代谢因素的城市生态系统健康指数——城市能值-

生命力指数,以全面表征城市生态系统健康状况.同时,引入集对分析这种广泛应用于多属性评价的不确定性理论与方法<sup>[2-3]</sup>,在充分考虑城市生态系统健康不确定性与相对性的基础上,开展城市生态系统相对健康状况的评价,使各城市在相互比较中取长补短,促进城市生态系统健康水平的整体提升.

## 1 城市能值-生命力指数

笔者在前期工作<sup>[4]</sup>中,已基于城市生态系统在结构、功能、活动、发展演化等方面具有的

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871056);国家“973”项目(2005CB724204)

\* 责任作者, 教授, zfyang@bnu.edu.cn

表 1 城市能值-生命力指数评价指标体系

Table 1 Indicator framework of urban emergy-vitality index

目标层(O)	准则层(R)	要素层(F)	指标层(I)	权重		
R <sub>1</sub>	F <sub>1</sub> 经济 发展 水平	I <sub>1</sub> 人均 GDP(元)	I <sub>1</sub> 人均 GDP(元)	0.0115		
			I <sub>2</sub> GDP 增长率(%)	0.0007		
			I <sub>3</sub> 能值密度(sej/km <sup>2</sup> )	0.0655		
			I <sub>4</sub> 能值货币比(sej/\$)	0.0118		
	F <sub>2</sub> 经济 结构	I <sub>5</sub> 第三产业占 GDP 比重(%)	I <sub>5</sub> 第三产业占 GDP 比重(%)	0.0377		
			I <sub>6</sub> 第二产业增长率(%)	0.0016		
			I <sub>7</sub> 电力能值比	0.0115		
	F <sub>3</sub> 经济 竞争力	I <sub>8</sub> 外资占 GDP 比重(%)	I <sub>8</sub> 外资占 GDP 比重(%)	0.0314		
			I <sub>9</sub> 出口总额占 GDP 比重(%)	0.0469		
			I <sub>10</sub> 输出输入能值比	0.0643		
R <sub>2</sub>	F <sub>4</sub> 社会 公平	I <sub>11</sub> 城镇登记失业率(%)	I <sub>11</sub> 城镇登记失业率(%)	0.0032		
			I <sub>12</sub> 农村与城市居民人均收入差异	0.0009		
	F <sub>5</sub> 科教 水平	I <sub>13</sub> 申请专利授权率(%)	I <sub>13</sub> 申请专利授权率(%)	0.0012		
			I <sub>14</sub> 初中教育普及率(%)	0.0001		
			I <sub>15</sub> 万人拥有高等学校学生数(人)	0.0146		
			I <sub>16</sub> 万人拥有公共图书馆藏书数(册)	0.0287		
R <sub>3</sub>	F <sub>6</sub> 人群 健康	I <sub>17</sub> 人口出生率(‰)	I <sub>17</sub> 人口出生率(‰)	0.0090		
			I <sub>18</sub> 万人拥有医院床位数(张)	0.0078		
	F <sub>7</sub> 生活 质量	I <sub>19</sub> 在岗职工年平均工资(元)	I <sub>19</sub> 在岗职工年平均工资(元)	0.0038		
			I <sub>20</sub> 城镇居民人均住房面积(m <sup>2</sup> )	0.0006		
			I <sub>21</sub> 恩格尔系数	0.0002		
			I <sub>22</sub> 万人公交车辆(辆)	0.0058		
			I <sub>23</sub> 电视覆盖率(%)	0.0001		
			I <sub>24</sub> 人均能值(sej)	0.0271		
			I <sub>25</sub> 人均燃料能值(sej)	0.0507		
			F <sub>8</sub> 资源 条件与 利用	I <sub>26</sub> 人均家庭生活用水量(m <sup>3</sup> )	I <sub>26</sub> 人均家庭生活用水量(m <sup>3</sup> )	0.0100
I <sub>27</sub> 人均城市道路面积(m <sup>2</sup> )	0.0092					
I <sub>28</sub> 工业用水重复利用率(%)	0.0027					
I <sub>29</sub> 工业固废综合利用率(%)	0.0019					
I <sub>30</sub> 能值自给率	0.0211					
R <sub>3</sub>	F <sub>9</sub> 生态 环境质 量与安 全	I <sub>31</sub> 能值使用集约度	I <sub>31</sub> 能值使用集约度	0.0530		
			I <sub>32</sub> 空气质量优良率(%)	I <sub>32</sub> 空气质量优良率(%)	0.0007	
				I <sub>33</sub> 建成区绿化覆盖率(%)	I <sub>33</sub> 建成区绿化覆盖率(%)	0.0015
					I <sub>34</sub> 人均公共绿地面积(m <sup>2</sup> )	0.0042
			I <sub>35</sub> 工业废水排放达标率(%)	I <sub>35</sub> 工业废水排放达标率(%)	0.0001	
				I <sub>36</sub> 城镇生活污水集中处理率(%)	I <sub>36</sub> 城镇生活污水集中处理率(%)	0.0062
					I <sub>37</sub> 生活垃圾无害化处理率(%)	0.0042
			I <sub>38</sub> 可更新资源的人口承载密度(人/km <sup>2</sup> )	0.1412		
			I <sub>39</sub> 废弃物与可更新能值比	0.1283		
R <sub>4</sub>	F <sub>10</sub> 管理 与调控 能力	I <sub>40</sub> 环保投入占 GDP 比重(%)	I <sub>40</sub> 环保投入占 GDP 比重(%)	0.0220		
			I <sub>41</sub> 中小学环境教育普及率(%)	I <sub>41</sub> 中小学环境教育普及率(%)	0.0006	
				I <sub>42</sub> 环境负载率	0.0806	
R <sub>4</sub>	F <sub>11</sub> 系统 协调度	I <sub>43</sub> 单位 GDP 能耗(t 标煤/万元)	I <sub>43</sub> 单位 GDP 能耗(t 标煤/万元)	0.0051		
			I <sub>44</sub> 单位工业增加值能耗(t 标煤/万元)	I <sub>44</sub> 单位工业增加值能耗(t 标煤/万元)	0.0059	
				I <sub>45</sub> 三废综合利用产品产值占 GDP 比重(%)	0.0652	

注:农村与城市居民人均收入差异以城市居民人均可支配收入与农民人均纯收入的比值来表示

命体特征,提出了城市生命力指数框架及相应的指标体系。城市生命力指数是一个包含生产力、生活态、生态势、生机度 4 个维度,分别从经济子系统、社会子系统、自然子系统及生态调控子系统 4 个层面来综合表征城市生态系统发展状态的指数。从相对宏观的层面入手,从各个子系统状态出发构建指标体系,提取城市生态系统的直观外在特征。

另一方面,能量是连接城市生态与经济系统的媒介,城市生态系统的结构与功能可以通过能量贯穿其中来统一描述<sup>[5]</sup>。美国系统生态学家 Odum 与 Lan 等<sup>[6-7]</sup>在综合系统生态、能量生态和生态经济原理的基础上,于 20 世纪 80 年代后期提出能值理论,基于“一流动或储存的能量所包含的另一种类别能量的数量”之能量换算思想,以太阳能值为标准来统一衡量不同类别不同品质能量的真实价值和数量关系,使得综合分析生态系统的各种生态流成为可能。将城市生态系统整合为一个能值系统,就可以通过能值分析统一核算和模拟城市代谢过程中的物质、能量、资金等各种生态流,探讨城市生态系统在能量等级、环境容纳能力、生态经济效率等方面的特征,反映城市生态系统健康状况。在相对微观层面,从物质能量代谢入手描述生态系统,关注生态系统的隐含内在驱动机制。

整合城市生命体理念及能值分析方法,依托城市生命力指数框架<sup>[4]</sup>,纳入能值密度、能值货币比、电力能值比、输出输入能值比,人均能值、人均燃料能值,能值自给率、能值使用集约度、可更新资源的人口承载密度、废弃物与可更新能值比,环境负载率等能值指标<sup>[8-12]</sup>,与常见城市生态系统评价指标<sup>[13-17]</sup>一起,共同构建城市能值-生命力指数(表 1),综合反映城市生态系统健康状况。

## 2 城市能值-生命力指数的集对分析

### 2.1 集对分析方法

集对分析是将具有某种联系的 2 个集合看成一个集对,在某一具体问题背景下,按照集对的某一特性展开分析,建立这 2 个集合的同一、差异、对立的联系度表达式[式(1)],并据此展开分析<sup>[12]</sup>。

$$\mu = a + bi + cj \quad (1)$$

式中: $\mu$  为集对的联系度; $i$  为差异度系数,取值于 $[-1,1]$ ; $j$  为对立度系数,取恒值为 $-1$ ; $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 2 个集合的同一度、差异度及对立度,其中  $a$ 、 $c$  是相对确定的,而  $b$  是相对不确定的<sup>[2]</sup>。

集对分析体现了确定与不确定的对立统一关系,有较深刻的方法论意义,已在多学科得到应用,尤其在多属性评价中得到广泛应用<sup>[18-21]</sup>。

## 2.2 城市能值-生命力指数的集对分析

通过集对分析方法,可以针对城市能值-生命力指数这一具体问题,把多个集合(不同城市)组合到一起,按照城市生态系统相对健康状况这一特性展开具体分析,明确集合(城市)之间的联系(相对状况).利用集对分析方法开展基于城市能值-生命力指数的城市生态系统相对健康状况评价的步骤包括:(1)确定被评价行政区域(城市)集  $S=\{s_k\}(k=1,2,\dots,p)$ , $s_k$  为第  $k$  个城市,明确由城市能值-生命力指数组成的指标集  $M=\{m_r\}(r=1,2,\dots,n)$ , $m_r$  为第  $r$  个指标;(2)构造最优评价集  $U=\{u_1,u_2,\dots,u_n\}$ , $u_r$  为指标  $m_r$  的最优值;(3)针对每一个被评价城市  $s_k$ ,计算指标  $m_r$  与  $u_r$  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  $c_k$ ;(4)根据  $a_k$  和  $c_k$ ,计算  $s_k$  与  $U$  的相对贴近度  $r_k$ . $r_k$  值越大,表示基于城市能值-生命力指数的城市生态系统健康状况越好.具体的计算过程参见文献<sup>[22]</sup>。

利用集对分析方法,可以将评价城市生态系统健康状况的多个能值-生命力指数指标系统合成一个与最优评价集的相对贴近度,以反映城市生态系统健康状况.这个最优评价集产生于城市生态系统本身,并随着时间推移不断更新,减小了人为确定评价标准时的主观性和静态性。

## 3 案例研究

### 3.1 评价对象

综合考虑地理位置、经济发展水平、资源特点、功能定位等因素以及数据的可获取性,选择哈尔滨、乌鲁木齐、银川、抚顺、北京、青岛、西安、上海、武汉、杭州、重庆、厦门、成都、

昆明、广州、南宁共 16 个城市作为被评价对象。

### 3.2 评价指标权重

通过文献查阅、资料统计、部门调研等方式收集城市能值-生命力指数各指标值.那些反映城市生态系统宏观外在特征的指标值较易获得.而对于那些从生物物理层面反映城市生态系统内在驱动机制的能值指标,则需要按照能值分析的程序,在收集基础数据的基础上,绘制能流系统图并编制能值分析表(限于篇幅,此处从略),进一步构建能值系统综合图并计算出各指标值.最后,根据收集到的各个城市数据,利用信息熵模型<sup>[23]</sup>计算得到各指标的信息熵权重(表 1)。

### 3.3 评价结果

**3.3.1 城市能值-生命力指数** 根据各指标数据及信息熵权重,利用集对分析方法,计算出各个被评价城市能值-生命力指数与最优城市评价集的相对贴近度  $r_k$  值,从而得出基于城市能值-生命力指数的各个城市生态系统相对健康状况.图 1 直观地反映了各个城市生态系统健康的相对状况,其中对  $r_k$  区间 $[0,1]$ 进行均分.结果显示,厦门、青岛、杭州、上海、北京处于被评价城市中较高水平,而乌鲁木齐、成都、哈尔滨处于被评价城市中较低水平,其他城市处于中等水平。

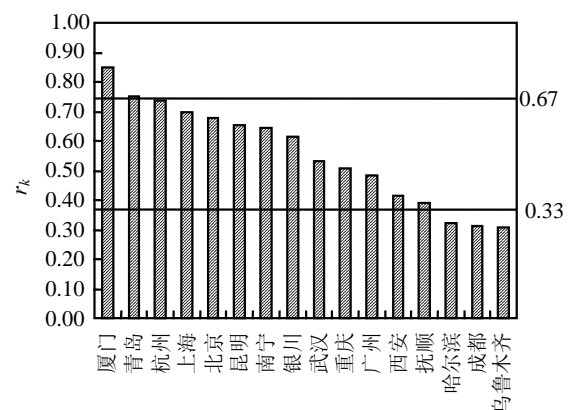


图 1 各城市能值-生命力指数相对情况

Fig.1 Relative states of urban energy-vitality index among different cities

**3.3.2 城市能值-生命力分指数** 为更好地分析各准则层因子对城市能值-生命力指数的影响,针对生产力、生活态、生态势、生机度 4 个准则

层分指数也开展集对分析.其计算原理及步骤与城市能值-生命力指数一样,只是每个分指数下的指标集与总指数的指标集不同而已.基于各个城市生命力分指数与最优评价集的相对贴近度  $r_k$  值,图 2 描述了各个城市针对各分指数的相对健康状况.

由图 2 可见,在生产力维度,厦门、上海处于被评价城市中较高等级,而哈尔滨、乌鲁木齐、抚顺等城市处于较低等级,这是由各城市在经济发展水平、经济结构、经济竞争力方面的差异造成的,尤其受权重较大指标的影响较大.例如,厦门在第三产业比重、出口总额占 GDP 比重等权重较大的指标上,相对等级较高;上海在能值密度这个权重较大的指标上,相对等级较高,导致两者生产力的综合评价结果较优.生活态维度,北京、杭州、银川等城市相对较优,而成都相对较劣,这

缘于各城市在社会公平、科教水平、人群健康、生活质量上的差异.例如,成都尽管在多数指标上处于中等水平,但在生活质量方面权重较大的人均能值、人均燃料能值等指标上相对较差,导致生活态总体水平较低.生态势维度,厦门、青岛、杭州等城市处于较高水平,而乌鲁木齐处于较低水平,这是由各城市在资源条件及生态环境质量方面的相对状况造成的.例如,乌鲁木齐因为在废弃物与可更新能值比等权重较大指标上的相对水平较低,导致生态势相对水平较低.生机度维度,昆明、厦门、青岛等城市属于相对较优状态,而银川、西安、广州等属于较劣状态,这缘于各城市在管理与调控能力、系统协调度方面的差异.例如,青岛在环境保护投入、环境负载率等指标上的相对状况较优,导致最终在生机度方面的评价结果较优.

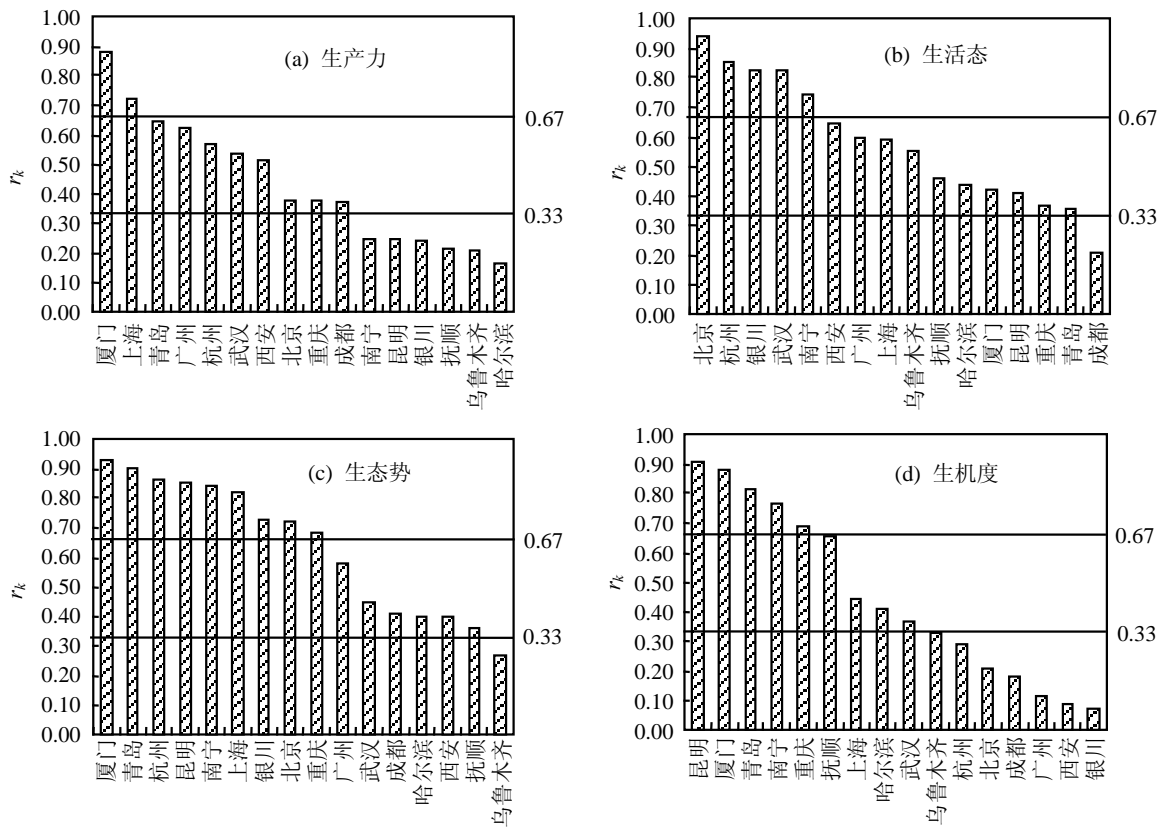


图 2 各城市能值-生命力分指数相对情况

Fig.2 Relative states of each indicator in the criteria layers of urban energy-vitality index among different cities

根据总指数及分指数相对情况,各城市可制定相应措施来提高生态系统健康水平.以厦门市为例,其 4 个分指数中,生产力、生态势、生机度

均相对较好,而生活态较弱.因此,尽管厦门城市能值-生命力指数的总体情况在所有被评价城市中最佳,但为了持续推进其城市生态系统健康发

展,仍应注意首先通过提高科教水平、增强社会公平等措施提升城市生活态。

从各城市能值-生命力指数及分指数的相对情况可以看出,各分指数情况综合决定了总指数情况。例如,厦门、青岛、杭州至少有 2 个分指数较优的城市,其总指数相对也较优;而像哈尔滨、乌鲁木齐等至少有 2 个分指数处于中下游水平的城市,总指数相对也处于较低等级。

## 4 结论

**4.1** 鉴于城市之生命体特征及物质能量代谢因素对城市生态系统健康的重要性,提出城市能值-生命力指数,全面反映城市生态系统健康状况。同时,基于城市生态系统健康的不确定性,引入集对分析方法,从不同城市的相对比较情况来描述基于城市能值-生命力指数的城市生态系统健康状况,以减小人为确定健康标准时的主观性及静态性,并促进各个城市在相对比较中有针对性地提高城市健康水平。

**4.2** 利用集对分析模型,结合信息熵权重,开展了北京、上海、广州、武汉等 16 个城市的案例研究,通过计算各个城市能值-生命力(分)指数与最优评价集的相对贴适度,评价各城市生态系统相对健康状况。结果表明,基于城市能值-生命力指数的城市生态系统健康状况,厦门、青岛、杭州、上海、北京处于相对较高水平,而乌鲁木齐、成都、哈尔滨处于相对较低水平。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵克勤,宣爱理.集对论——一种新的不确定理论方法与应用 [J]. 系统工程, 1996,14(1):18-23,72.
- [3] Jiang Y L, Xu C F, Yao Y, et al. Systems information of set pair analysis and its applications [C]//The Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai. 2004:1717-1722.
- [4] 苏美蓉,杨志峰,陈彬,等.城市生态系统现状评价的生命力指数方法初探 [J]. 生态学报, 2008,28(10):5141-5148.
- [5] 黄书礼.都市生态经济与能量 [M]. 台北:詹氏书局, 2004.
- [6] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley and Sons,

- 1996.
- [7] Lan S F, Qing P, Lu H F. The emergy analysis of ecological economy system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [8] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: emergy synthesis versus material flow analysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006,48:166-196.
- [9] Lei K P, Wang Z S. Emergy synthesis and simulation for Macao [J]. Energy, 2008,33:613-625.
- [10] 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 [J]. 生态学报, 2003,23(7):1363-1368.
- [11] 张晟途,钦佩,万树文.从能值效益角度研究互花米草生态工程资源配置 [J]. 生态学报, 2000,20(6):1045-1049.
- [12] 董孝斌,高旺盛,严茂超.黄土高原典型流域农业生态系统生产力的能值分析——以安塞县纸坊沟流域为例 [J]. 地理学报, 2004,59(2):223-229.
- [13] 彭建,王仰麟,景娟,等.城市景观功能的区域协调规划——以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2005,25(7):1714-1719.
- [14] 宋治清,王仰麟.城市景观及其格局的生态效应研究进展 [J]. 地理科学进展, 2004,23(2):97-106.
- [15] 张小飞,王仰麟,李正国,等.区域尺度生态功能网络构建——以中国台湾岛为例 [J]. 地理科学进展, 2007,26(3):18-28.
- [16] 吴琼,王如松,李宏卿,等.生态城市指标体系与评价方法 [J]. 生态学报, 2005,25(8):2090-2095.
- [17] 王如松.生态健康的科学内涵和系统调理方法 [J]. 科技导报, 2005,23(3):4-7.
- [18] 王栋,朱元珩,赵克勤.基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型的应用研究 [J]. 水文, 2004,24(3):9-13,41.
- [19] Jiang Y L, Zhuang Y T, Li Z X, et al. Application of set pair analysis in urban planning project comprehensive evaluation [C]//The Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou. 2005:2267-2271.
- [20] 周敬宣,李湘梅,陈雷,等.基于集对分析的城市生态足迹预测——以武汉市为例 [J]. 资源科学, 2007,29(3):111-116.
- [21] 贺瑞敏,张建云,王国庆,等.基于集对分析的广义水环境承载力评价 [J]. 水科学进展, 2007,18(5):730-735.
- [22] Su M R, Yang Z F, Chen B. Set pair analysis for urban ecosystem health assessment [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009,14(4):1773-1780.
- [23] Yelshin A. On the possibility of using information entropy as a quantitative description of porous media structural characteristics [J]. Journal of Membrane Science, 1996,117: 279-289.

**作者简介:** 苏美蓉(1982-),女,湖北荆门人,北京师范大学环境学院博士研究生,主要从事城市生态规划与管理方面的研究.发表论文 10 余篇.