

文章编号: 1009-6094(2005)01-0068-04

城市生态系统承载机制定量研究*

——以长江三角洲为例

毕东苏, 李咏梅, 顾国维, 郭小品

(同济大学环境科学与工程学院污染
控制国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 城市生态系统是自然-社会-经济复合生态系统, 探讨其内部各要素的相互作用机制对于实施可持续发展战略、建设生态城市具有理论指导意义。本文尝试将自然生态系统承载力理论扩展到城市生态系统, 以分析其内部诸要素间的相互作用机制, 提出了城市生态系统承载机制的水桶模型。采用层次分析法构建了城市生态系统承载机制定量评估模型, 并以长江三角洲具有代表性的八城市为操作对象进行了研究。案例结果表明, 长三角八城市的综合承载指数排序由大到小依次为: 无锡、南京、杭州、上海、常州、宁波、苏州、扬州。

关键词: 环境生态学; 城市生态系统; 承载机制; 指标体系; 综合评价; 长江三角洲

中图分类号: X171.1 文献标识码: A

0 引言

城市生态学将城市作为一个生态系统进行研究, 是生态学的一个重要分支^[1]。特别是随着我国生态城市建设热潮的兴起, 城市生态系统已成为当前生态学研究的热点。但鉴于城市生态系统的复杂性, 许多定量研究只能从宏观层面开展。如许学强从水平指数、发展指数、协调指数定量研究了广州城市生态系统的可持续发展能力^[2]; 闵庆文借助物理学中“场”的概念, 认为生态系统存在着“生态场”, 可从生态位、生态势及协调度三个角度进行综合评价^[3]。受自然生态系统承载力理论启发, 本文探讨城市生态系统内部资源、环境对人类社会经济活动的承载约束机制, 提出城市生态系统的承载机制定量研究方法, 并以长江三角洲具有代表性的八城市(上海、南京、苏州、无锡、常州、扬州、杭州、宁波)为例进行实证研究。

长三角地区位于长江与太平洋的交汇处和我国两大经济带——沿海经济带与长江流域经济带的T型结合部, 区位优势十分明显, 被誉为“世界第六大城市群”。经济的腾飞、人口的密集, 使这一区域资源环境与社会经济间的矛盾日益突出, 已成为进一步发展的“瓶颈”之一, 因此, 以该区域为实例探讨其城市生态系统的承载机制更具实际意义。

1 城市生态系统承载机制分析

1.1 承载力理论回顾

“承载力”在自然生态系统中用以衡量特定区域、特定环境条件下可维持某一物种个体的最大数量^[4]。针对不同问题, 产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论。如针对环境

污染问题, 人们提出了环境承载力的概念与理论, 针对资源短缺问题, 提出了资源承载力的概念与理论^[5]。随着各种生态问题日益突出, 单一要素承载力的缺陷日渐明显, 于是一些学者提出了基于系统论的“生态承载力”这一概念。

1.2 城市生态系统承载机制分析

从承载力的发展可知, 承载力在自然生态系统中是客观存在的, 在城市生态系统中, 复杂的社会经济活动是系统的核心, 在系统发展过程中, 城市社会经济活动需要向城市生态环境索取必要的生存空间、载体以及物质供应。因此, 城市社会经济活动表现为主动性, 城市生态环境表现为被动性, 两者界面之间则表现为压与支撑的关系, 这种关系可称为“承载机制”。

城市生态系统承载机制的承载对象是城市社会经济活动, 承载载体是生态环境。与自然生态系统不同的是, 这里的生态环境是广义的, 按承载作用类型可分为两类: 1) 资源支持系统, 包括矿产资源、水资源、土地资源、森林资源等, 它们为维持社会经济活动的正常运转提供最直接的支撑; 2) 环境约束系统, 包括城市空气、水、生物等, 它们用于消纳社会经济活动中产生的大量废弃物, 表现为约束作用。除此之外, 还有一类“软环境”, 包括城市科技资源、基础设施、生产效率、系统开放性、物质生产的循环程度等, 它们尽管表现上更象城市社会经济活动的一部分, 但却对城市经济活动的发展分别起到支撑与约束作用。

城市生态系统要想持续、稳定地发展, 必须有持续、稳定的资源支持, 还必须有足够的环境容量来消纳社会经济活动中所排放的污染物质。为形象体现城市生态系统中的承载机制, 本文提出系统承载机制的水桶模型。由于资源支持系统对城市社会经济活动有直接的支撑作用, 可将其作为水桶桶底, 而环境约束系统对城市社会经济活动具有约束作用, 将其作为桶壁, 而人类的社会经济活动则可视作桶中的水。由此可以看出, 城市生态系统的承载机制所反映的是城市社会经济与城市生态环境相互作用的界面特征, 是研究资源支持系统、环境约束系统与社会经济活动三者协调性以及城市生态环境对社会经济活动供容能力的一个判据。

2 城市生态系统承载机制定量评估模型

2.1 指标体系构建

城市生态系统影响因子极多, 对它开展承载机制定量研究首先要构建相应的指标体系。为便于选择指标, 建立指标体系层次结构模型, 共三层。第一层为总目标层, 即城市生态系统综合承载水平层; 第二层为子目标层, 有三项, 分别为压力水平层、支撑能力层及约束能力层; 第三层为属性层, 这一层设置的目的是不使重要的指标发生重复或遗漏, 并且有利于深入分析。

从上述承载机制分析可知, 压力水平层体现城市的社会经济活动, 应包括经济水平、发展速度、人口规模、生活质量、文化教育、安全保障等属性; 支撑能力层中除自然资源外, 还应包括城市科技支撑、基础设施、经济效率、系统开放性等属性; 约束能力层除环境质量、城市生态, 还应有污染防治水平、物质生产的循环程度等属性。然后, 依据科学性、代表性、可操作性、可比性等原则^[6,7], 选取评价指标, 共46项, 见表1。

* 收稿日期: 2004-05-09

作者简介: 毕东苏(1977-), 男, 博士生, 从事生态城市建设、环境污染控制研究; 顾国维(1936-), 男, 教授, 博导, 从事环境污染控制研究。

基金项目: 上海市科委项目“生态城市建设标准体系”(03DZ05056)

表1 城市生态系统承载机制研究指标体系
Table 1 Carrying relationship indicator system model of urban ecosystem

A层	B层	C层	权重	具体指标	相对于C层权重	相对于B层权重	单位
城市生态系统承载水平	经济水平	0.17	1. 人均GDP	0.38	0.064 6	元/人	
			2. 人均固定资产投资	0.3	0.051	元/人	
			3. 人均社会消费品零售总额	0.32	0.054 4	元/人	
	发展速度	0.18	4. GDP增长率	0.38	0.068 4	%	
			4. 全社会固定资产投资增长率	0.3	0.054	%	
			5. 社会消费品零售总额增长率	0.32	0.057 6	%	
	人口规模	0.17	6. 城市化水平	0.34	0.057 8	%	
			7. 人口自然增长率	0.29	0.049 3	%	
			8. 人口密度	0.37	0.062 9	万人/km ²	
	生活质量	0.16	9. 人均居住面积	0.45	0.072	m ² /人	
			10. 人均生活用电	0.55	0.088	kW h/人	
	文化教育	0.11	11. 在校生数占总人口比例	0.23	0.025 3	%	
			12. 万人专任教师数	0.22	0.024 2	人	
			13. 科教费用支出占财政支出比例	0.27	0.029 7	%	
			14. 居民教育文化娱乐消费占消费支出比例	0.28	0.030 8	%	
	安全保障	0.12	15. 万人卫生技术人员数	0.33	0.039 6	人	
			16. 社会保障覆盖率	0.29	0.034 8	%	
			17. 城镇失业率	0.38	0.045 6	%	
	科技支撑	0.17	18. 科技进步贡献率	0.50	0.085	%	
			19. 高新技术产值占工业总值比	0.50	0.085	%	
	基础设施	0.20	20. 人均道路面积	0.3	0.06	m ²	
			21. 万人公交车辆	0.2	0.04	标台	
			22. 电话普及率	0.15	0.03	%	
	自然资源	0.25	23. 人均公用绿地面积	0.35	0.07	m ²	
			24. 人均水资源	0.35	0.087 5	m ³	
			25. 人均耕地面积	0.35	0.087 5	km ² /万人	
	系统开放性	0.23	26. 人均森林资源	0.3	0.075	km ² /万人	
			27. 外贸依存度	0.5	0.115	%	
			28. 外资开放度	0.5	0.115	%	
	经济效率	0.15	29. GDP土地产出率	0.27	0.040 5	万元/km ²	
			30. 工业利润增幅	0.22	0.033	%	
			31. 工业全员劳动生产率	0.28	0.042	%	
			32. 固定资产产出率	0.23	0.034 5	元/元	
	环境质量	0.29	33. 大气综合质量	0.26	0.075 4	mg/m ³	
			34. 水环境质量指数	0.26	0.075 4	—	
			35. 噪声达标区覆盖率	0.23	0.066 7	%	
			37. 酸雨频率	0.25	0.072 5	%	
	城乡生态	0.24	38. 森林覆盖率	0.3	0.072	%	
			39. 建成区绿地覆盖率	0.4	0.096	%	
			40. 自然保护区覆盖率	0.3	0.072	%	
	污染防治	0.27	41. 环保投资指数	0.4	0.108	%	
			42. 工业废水排放达标率	0.32	0.086 4	%	
			43. 生活垃圾无害化处理率	0.28	0.075 6	%	
	循环程度	0.20	44. 单位GDP能耗	0.38	0.076	T/万元	
			45. 单位GDP水耗	0.34	0.068	T/万元	
			46. 工业固废综合利用率	0.28	0.056	%	

注: 1) 由于我国跨地区统计资料的不健全性, 故无法选取一些能更好反应属性层的指标。2) 指标的数据分别来自上海、南京、苏州、无锡、常州、扬州、杭州、宁波的2003年城市统计年鉴、2002年环境质量公报以及其他城市政府部门的公布数据, 限于篇幅, 不再将其列出。在采集过程中会遇到2个问题: 对于某些不易确定的指标, 采用隶属度评价方法进行量化, 如水环境质量指数, 将水环境分为5个等级, 等级间相差0.2单位, 然后根据环保部门监测资料确定其等级, 如I与II类之间为0.8, 劣于V类为0; 对于个别数据缺失的指标, 取2001年数据, 根据其大致发展速度估计其当年数据。3) 大气综合质量, 由于长三角地区大气主要污染物为可吸入固体颗粒, 因此这里用可吸入固体颗粒年均值代表大气综合质量; 外贸依存度是对外贸易总额与国内生产总值(GDP)的比值, 用于衡量地区经济对国际市场的依赖程度; 外资开放度是指实际利用外资与GDP的比值, 用于衡量对外部投资的开放程度。

2.2 权重确定

不同指标对评价目的有不同贡献,因此必须赋以指标权重,采用层次分析法。具体步骤为:先建立判别矩阵,然后进行层次排序,通过一致性检验后,得出各指标相对于各层的权重,见表1。

2.3 数据标准化

由于具体指标各具内涵,取值范围也各不相同,要将它们纳入统一的计算体系,首先应将其标准化。从各指标的特性看,可分为2类:正向指标,这类指标越高,分目标层的水平就越高;反向指标,这类指标越高,分目标层的水平就越低。对于2类不同性质的指标,分别采用不同的隶属函数将其标准化。

$$\text{正向指标: } X_i = \begin{cases} 1 & x_i = a_i \\ (x_i - b_i)/(a_i - b_i) & b_i < x_i < a_i \\ 0 & x_i = b_i \end{cases}$$

$$\text{反向指标: } X_i = \begin{cases} 1 & x_i = a_i \\ (x_i - b_i)/(a_i - b_i) & b_i < x_i < a_i \\ 0 & x_i = b_i \end{cases}$$

式中 X_i 为指标 x_i 的标准值; a_i, b_i 分别为各指标的最大与最小值。

2.4 定量评估模型

分别以压力指数PI 支撑指数SI 约束指数LI表示城市生态系统的支撑水平、压力水平和约束水平, W_i 为相应指标的权重,则有

$$PI = \sum YW_i \quad SI = \sum XW_i \quad LI = \sum ZW_i$$

以系统承载指数SCI 系统约束指数SLI表示城市生态

系统的承载与约束水平,则 $SCI = PI/SI, SLI = PI/LI$,以综合承载指数CCI来表征城市生态系统的综合承载水平,则有 $CCI = (RSI + ELI)/2$ 。由此可比较各城市生态系统的承载状况:RSI越大,表明城市生态系统中资源承受压力越大,发展空间越小,若 $SCI > 1$,表明该城市的社会经济活动过于剧烈,超出了资源的供给能力,处于资源利用不可持续状态, $SCI < 1$ 时则相反。SLI越大,表明城市生态系统中,环境对社会经济发展的约束越大,环境问题就越紧迫,若 $SLI > 1$,表明该城市的社会经济活动中产生的废物过多,超出了环境的容纳能力,处于环境纳污不可持续状态, $SLI < 1$ 时则相反。而CCI是两者的综合反映,若 $CCI > 1$,表明城市生态系统整体不协调,处于整体不可持续状态。

3 结果分析

3.1 系统承载指数分析

从表2可以看出,长三角八城市中,系统承载指数从大到小依次为:无锡、杭州、南京、上海、扬州、宁波、常州、苏州。无锡的城市生态系统承载指数最高,为1.616,说明城市生态系统中资源承受的社会经济活动压力最大。这是因为2002年无锡在经济水平、增长速度、生活质量及文化教育等系统属性上均居八城市前列,导致其压力水平指数较大,为0.5037,仅次于上海(0.5431),但其自然资源、科技支撑及城市基础设施等属性较差,使其城市生态系统的支撑能力较弱,指数值仅为0.3284,在八城市中倒数第三。而作为长三角发展龙头,上海的城市生态系统压力水平在八城市中最高,指数值为0.5037,但由于其经济效率高,城市开放性强,以及城市基础设施完

表2 长三角八城市承载机制评估各层得分

Table 2 Carrying relationship evaluation score of every layer

	上海	南京	苏州	无锡	常州	扬州	杭州	宁波
经济水平	1	0.457	0.659 9	0.700 4	0.304 3	0	0.525 8	0.500 2
压 发展速度	0.078 2	0.508 3	1	0.656 2	0.479 4	0.184 6	0.585 2	0.511 9
力 人口规模	0.63	0.537	0.359 1	0.456 8	0.509 8	0.379 5	0.446 6	0.336 4
水 生活质量	0.582	0.557 3	0.381	0.772 2	0.285 2	0.106	0.257	0.419 9
平 文化教育	0.352 5	0.791	0.241	0.530 1	0.305 1	0.340 3	0.435 1	0.428
安全保障	1	0.463	0.341 4	0.283 2	0.174 3	0.162 9	0.598 9	0.196 4
支 自然资源	0.059 7	0.178 9	0.635 2	0.295	0.488 5	0.329 3	0.491	0.223 2
撑 基础设施	0.636 3	0.654 6	0.627 4	0.271 8	0.376 6	0.098 6	0.473	0.880 7
能 科技资源	0.784 3	0.581 3	0.832 6	0.282 9	0.411	0.238 6	0.003 3	0.230 5
力 系统开放性	0.510 1	0.350 3	1	0.286 9	0.183 9	0.025	0.157 3	0.313 8
经济效率	0.684 1	0.472 8	0.516 1	0.574 6	0.467 1	0.239 3	0.382 8	0.451 3
约 城乡生态	0.3	0.547 3	0.343 1	0.235 5	0.191 5	0.263 9	0.719 7	0.446 8
束 环境质量	0.974	0.279 9	0.450 6	0.491 6	0.406 3	0.683 9	0.567	0.529 8
能 污染防治	0.84	0.457 8	0.766 7	0.622	0.505 3	0.665 6	0.579 5	0.404 6
力 循环程度	0.760 3	0.396 5	0.494 3	0.821 2	0.459 8	0.506 5	0.875 9	0.666 5
压力水平指数PI	0.543 1	0.492 2	0.481 7	0.530 7	0.324 8	0.171 7	0.431 5	0.372 2
各 支撑能力指数SI	0.495 5	0.426 0	0.733 2	0.328 4	0.379 7	0.184 3	0.311 5	0.411 0
指 约束能力指数LI	0.733 3	0.415 4	0.518 9	0.531 2	0.392 2	0.542 7	0.668 7	0.503 4
数 系统承载指数RSI	1.096 0	1.155 3	0.656 9	1.616 0	0.855 4	0.931 6	1.385 2	0.905 5
值 系统约束指数ELI	0.740 6	1.184 8	0.928 3	0.999 0	0.828 1	0.316 3	0.645 2	0.739 3
综合承载指数CCI	0.918 3	1.170 1	0.792 6	1.307 5	0.841 7	0.624 0	1.015 2	0.822 4

善等原因,其城市生态系统支撑能力强(指数值为0.4955),因此整个系统的承载指数(1.0960)低于无锡。苏州,尽管其压力水平较高(指数值为0.4817),但其承载指数为0.6569,在八城市中最低,这主要得益于其经济科技含量较高、系统外向性强、基础设施较好等原因,表明就目前的支撑水平,苏州的社会经济发展空间相对较大。八城市中,无锡、上海、南京三城市的系统承载指数均大于1,表明它们的城市社会经济活动已超出资源的供给能力,处于资源利用不可持续状态。

3.2 系统约束指数分析

从表2可以看出,长三角八城市的系统约束指数从大至小依次为:南京、无锡、苏州、常州、宁波、上海、杭州、扬州。南京城市生态系统的压力指数为0.4932,较高,在八城市中排在第三,但其约束能力却很低(指数值为0.4154),仅高于扬州,最终导致其系统约束指数最高(为1.1848)。因此,南京的环境约束系统已处于超负荷状态,这主要是南京的污染防治水平较低,经济循环程度不高造成的。因此对于南京,加大污染治理力度、发展循环经济最为迫切。近年来,上海加大污染治理力度,增强了城市污染治理水平,城市环境质量有了明显改善,约束能力得到增强,故其系统约束指数并不高,仅为0.7406。八城市中,只有南京的系统约束指数大于1,表明其城市生态系统处于环境纳污不可持续状态。

4 结 语

本文尝试将“承载机制”引入城市生态系统,以此来分析其内部的相互作用机制,并构建相应指标体系进行定量研究,以期对其城市生态系统内部相互作用机制有一客观、正确的认识,这对探索自然-经济-社会协调发展的可持续之路,对于政府决策、引导城市发展方向具有积极意义,但是否科学合理,尚待实践检验。

References(参考文献):

- [1] Yan Shuiyu (闫水玉). Analyses and exploration to contents, definition and methods of urban ecology study [J]. *Ecologic Science* (生态科学), 2001, 20(2): 96~105
- [2] Xu Xueqiang (许学强) and Zhang Junjun (张俊军). Comprehensive evaluation of Guangzhou urban sustainable development [J]. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, 56(1): 54~63
- [3] Min Qingwen (闵庆文). *The Study on Region Development Ecology-Take Wulian County of Shandong Province as Example* (区域发展生态学研究——以山东省五莲县为例) [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 1999. 35~47
- [4] Zhu Yizhong (朱一中), Xia Jun (夏军) and Tan Ge (谈戈). A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity [J]. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2002, 21(2): 180~188
- [5] Cheng Guodong (程国栋). Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in northwest of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2002, 24(4): 7~10
- [6] Yang Yun (杨芸) and Zhu Longbiao (祝龙彪). Design and case analysis on index system of urban ecological supporting system [J]. *Shanghai Environmental Sciences* (上海环境科学), 2001, 20(5): 237~240

- [7] Zhang Kunmin (张坤民) and Wen Zongguo (温宗国). Progress on indicators of urban ecologically sustainable development [J]. *Urban Environment and Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2001, 14(6): 1~4

Quantitative study on loading relationship of urban eco-system: take Changjiang Delta as example

BI Dong-su, LI Yongmei, GU Guo-wei, GUO Xiao-pin

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract This paper aims to review and extend the theory of the loading capacity for the urban ecosystem. Based on the reviewing of the loading capacity of the urban areas, the authors advanced a concept of the loading relationship. Sociometric activity is the driving factor while ecological environment is passive; the interface relationship between them is the press and the loading relationship, which is known as the loading relationship of urban ecosystem. Urban ecosystem is by nature an economic-social-environmental complex system. It is of an urgent need to study the internal interaction among all the interactive factors to build a nice eco-city and prepare a sustainable development strategy. Next, the paper has made a systematic discussion of the watering bucket concept model to describe the carrying relationship of urban eco-system: the resource sustaining system and the environmental limit system, which is regarded as the bottom and the wall of the bucket respectively. On the basis of the evaluation model suggested by the authors, 46 indicators have been set up to describe the relationship of urban system with the analytic hierarchy process (AHP) and a series of index, such as the system loading index (SCI), system limited index (SLI) and comprehensive loading index (CCI). According to the model, when the SCI is bigger than 1, it means that the resource consumption of the urban ecosystem would be unsustainable. But, when the SLI is smaller than 1, it would mean that the waste-loading ecosystem would be sustainable. And finally, eight representative cities of the Yangtze River delta were taken as a sample for study, with a quantitative evaluation done. The results indicate that: the system loading index (SCI) of Wuxi, Hangzhou, Nanjing and Shanghai is all bigger than 1; the system limited index (SLI) of Nanjing is bigger than 1 and the sequential order from the high to low can be shown as follows: Wuxi, Nanjing, Hangzhou, Shanghai, Changzhou, Ningbo, Suzhou, Yangzhou.

Key words environmental ecology; urban ecosystem; carrying relationship; indicator system; comprehensive evaluation; Changjiang Delta

CLC number: X171.1 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2005)01-0068-04