

文章编号:1004-8227(2005)04-0465-05

城市生态系统承载理论探索与实证 ——以长江三角洲为例

毕东苏, 郑广宏, 顾国维, 郭小品

(同济大学环境科学与工程学院国家污染控制重点实验室, 上海 200092)

摘 要:为深入地探讨城市生态系统内部各要素的相互作用关系,将自然生态系统承载力理论扩展到城市生态系统,提出城市生态系统的承载机制概念。分别从微观作用与宏观表现两个角度提出承载机制模型,即承载递阶模型与水桶模型,初步构建了承载理论框架。在承载理论指导下,采用层次结构模型建立了承载机制评价指标体系,提出承载机制定量评估模型,由此可计算出城市生态系统承载指数,该指数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重要判据。最后对长三角具有代表性的 8 个城市进行了实证研究。结果表明:长三角 8 个城市的综合承载指数排序依次为:上海、南京、无锡、宁波、杭州、苏州、常州、扬州。

关键词:城市生态系统; 承载机制; 承载递阶模型; 水桶模型; 长江三角洲

文献标识码:A

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。在不同的发展阶段,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,人们提出了资源承载力的概念与理论^[1]。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”的概念。Millington 等采用多目标决策分析法,从各种资源对人口的限值出发研究了澳大利亚土地资源对人口的承载量;Slessor 提出了资源承载力的 ECCO (Enhancement of Carrying Capacity Options) 模型^[2];童玉芬等运用系统动力学在中国西北地区进行了土地承载力研究与城市人口承载量研究^[3];惠泱河建立了水资源承载力分析的指标体系与计算模型,并以典型缺水的关中地区为例进行了研究,得到了关中地区水资源可持续利用的满意方案^[4];余丹林等运用状态空间法研究了环渤海地区的区域承载力^[5]。

受资源承载力、环境承载力理论启发,笔者探讨了城市生态系统内部资源、环境对人类社会经济活

动的承载机制,并以长三角具有代表性的 8 个城市为例进行实证研究。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,致使这一区域资源环境与社会经济之间的矛盾日益突出,已成为进一步发展“瓶颈”之一,对这一区域开展承载机制研究更具代表意义。

1 城市生态系统的承载理论

1.1 承载机制概念

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,但对于城市这样独特的人工化生态系统是如何的呢?在城市生态系统中,城市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,这种关系可称之为“承载机制”。

收稿日期:2004-07-28;修回日期:2005-03-22

基金项目:上海市科委项目《生态城市标准体系研究》(03DZ05056),苏州市政府《苏州生态城市建设规划研究》项目(0400-2380030)

作者简介:毕东苏(1977~),男,江苏省丰县人,博士研究生,主要研究方向为城市生态与环境。

1.2 承载机制微观作用模型——承载递阶模型

城市生态系统具有四大基本功能,即物质循环、能量流动、信息传递与价值转换,它们是逐层分级进行的:系统原始物质资料(包括外部输入)首先进入工厂加工,转化为产品,这些产品价值经过人们利用后流入到人类社会活动中。同时,此过程的各个环节要不断地产生废弃物质,它们要经过废物处理设施后,最终排入系统环境。按照城市生态系统各要素执行这些功能的先后顺序,我们可绘出城市生态系统承载机制的微观作用模型——承载递阶模型,如图 1 所示。从中可以看出,城市生态系统承载机制最基本的承载媒体是由水、气、土地等组成的非生物环境,人类及其各种社会经济活动是最终的承载对象,两者之间并非直接相互发生作用的,要经过一些中间环节,这些中间环节即是承载媒体,同时又是承载对象。

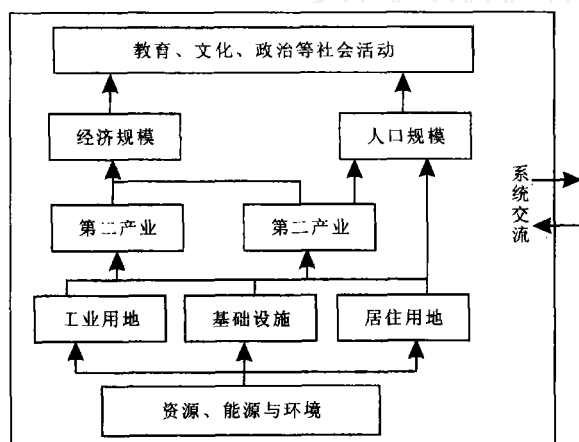


图 1 城市生态系统承载递阶模型

Fig.1 Carrying Hierarchy Model of Urban Eco-system

1.3 承载机制宏观表现模型——水桶模型

由承载递阶模型可知,社会经济活动是承载对象,生态环境是最基本承载载体,这里的生态环境是广义的,按承载作用类型可分为如下两类:其一为资源支持系统,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;其二为环境约束系统,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,但却对城市社会经济活动的发展分别起到支撑与约束作用。

为形象体现城市生态系统中资源支持与系统约束的承载机制,我们试图提出了系统承载机制

宏观表现模型——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,我们可将其看作为水桶的桶底,而环境约束系统对城市社会经济活动具有约束作用,我们将其看作为桶壁,而城市的社会经济活动则视为桶中的水。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。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评价模型

2.1 指标体系构建

城市生态系统承载机制涉及因子极多,对它开展生态学评价首要工作就是指标体系构建。为方便指标选择,我们建立了层次结构模型,共分为 3 层:第一层为总目标层,即城市生态系统综合承载水平层;第二层为分目标层,有 3 项,分别为压力水平层、支撑能力层及约束能力层;第三层为要素层,这一层设置的目的是不使重要的指标发生重复或遗漏,并且有利于深入地分析。从上述承载机制水桶模型分析可知:压力水平层里应有经济水平、发展速度、人口规模、生活质量、文化教育、安全体系等要素;支撑能力层里应有自然资源、科技资源、基础设施、经济效率、系统对外依存程度等要素;约束能力层里应有环境质量、城乡生态、污染防治、经济循环程度等要素。然后,依据科学性、代表性、可操作性、可比性等原则^[6,7],选取了评价指标,共 35 项,具体如表 1 所示。

2.2 评价模型

2.2.1 数据标准化 由于具体指标各具内涵,取值范围也各不相同,要想将它们纳入统一的评价体系,首先应将其标准化。从各指标的特性看,可将指标分为两类:正向指标,这类指标越高,分目标层的水平就越高;另一类反向指标,这类指标越高,分目标层的水平就越低。对于两类不同性质的指标,我们分别采用不同的隶属函数将其标准化。

正向指标:

$$X_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq a_i \\ (x_i - b_i) / (a_i - b_i) & b_i > x_i > a_i \\ 0 & x_i \leq b_i \end{cases}$$

表 1 城市生态系统承载机制指标体系

Tab.1 Index System for Carrying Relationship of Urban Eco-system

A 层	B 层	C 层	D 层(具体指标)	单位
城市生态系统承载水平	压力水平	经济水平	1. 人均 GDP	元/ 人
			2. 人均社会消费品零售总额	元/ 人
		发展速度	3. GDP 增长率	%
			4. 社会消费品零售总额增长率	%
		人口规模	5. 城市化水平	%
			6. 人口密度	人/ km ²
		生活质量	7. 人均居住面积	m ² / 人
			8. 人均生活用电	度/ 人
			9. 人均生活用水	L/ 天
		文化教育	10. 科教费用支出占财政支出比例	%
			11. 居民教育文化娱乐消费占消费支出比例	%
		安全保障	12. 万人卫生技术人员数	人
			13. 社会保障覆盖率	%
			14. 城镇失业率	%
	支撑能力	科技支撑	15. 科技进步贡献率	%
			16. 高新技术产值占工业总值比	%
		基础设施	17. 人均道路面积	m ²
			18. 人均公用绿地面积	m ²
			19. 电话普及率	%
		自然资源	20. 人均水资源	m ³
			21. 人均耕地面积	hm ² / 人
		开放程度	22. 外贸依存度	%
			23. 外资开放度	%
		经济效率	24. GDP 土地产出率	元/ km ²
			25. 固定资产产出率	元/ 元
	约束能力	环境质量	26. 大气综合质量	mg/ m ³
			27. 水环境质量指数	%
			28. 噪声达标区盖率	%
		城乡生态	29. 建成区绿地覆盖率	%
			30. 自然保护区覆盖率	%
		污染防治	31. 环保投资指数	%
			32. 工业废水排放达标率	%
		循环程度	33. 单位 GDP 能耗	t/ 万元
			34. 单位 GDP 水耗	t/ 万元
			35. 工业固废综合利用率	%

部分指标解释:社会保障覆盖率指参加医疗、养老、失业保险总人数占 3 倍总人口的百分比;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。

反向指标:

$$X_i = \begin{cases} 1 & x_i \leq a_i \\ (x_i - b_i) / (a_i - b_i) & b_i < x_i < a_i \\ 0 & x_i \geq b_i \end{cases}$$

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

2.2.2 主成份分析^[8] 若标准化后的数据矩阵 X^* 的相关矩阵为 R ,其特征值为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \dots > \lambda_m > 0$ ($m < p$),其对应的正交单位化特征向量为 e_1 ,

$e_2, e_3, \dots, e_p$ 。可按 $d_i = \lambda_i / \sum \lambda_i$ 确定因子贡献率(即权重)。若累积到 λ_k 时累积贡献超过 85% ($k < m$),前 k 个特征向量组成的矩阵为 $M = (e_1, e_2, e_3 \dots)$,则有: $N = [e_1 * (\lambda_1)^{1/2}, e_2 * (\lambda_2)^{1/2}, e_3 * (\lambda_3)^{1/2} \dots]$ 为主成分的因子负荷阵; $Y^* = M X^*$, Y_i^* 便为第 i 个主成分,其权重对应于 d_i ;至此,我们便可计算各分目标层的水平得分 $H = d Y^*$,式中 H 为 n 维行向量, d 为 k 维列向量, Y 为 $k \times n$ 维矩阵。这样可求得压力水平指数、支撑能力指数与约束能力指数,分

别以 PI、SI、LI 表示。

2.2.3 承载指数计算 以资源承载指数 RCI、环境约束指数 ELI 表示城市生态系统的承载与约束水平,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:

$$RSI = PI / SI$$
$$ELI = PI / LI$$
$$CCI = (RSI + ELI) / 2$$

由此我们便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。ELI 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。而 CCI 是两者的综合反映,CCI 越大,表明城市生态系统整体越不协调。

3 长三角八城市承载机制评价

3.1 资源承载指数

收集长三角 8 个城市的表 1 中各指标的数据,运用上述评价模型,计算出承载机制各指数如表 2。

表 2 长三角 8 个城市生态系统承载机制评价各指数得分
Tab.2 Carrying Relationship Assessment Indicator Score on the Eight Cities in Changjiang Delta

	上海	南京	苏州	无锡	常州	扬州	杭州	宁波
压力水平指数 PI	2.421 6	1.710 6	1.531 7	1.654 0	0.990 9	0.433 0	1.484 7	1.201 1
支撑能力指数 SI	1.203 1	1.039 8	1.829 7	0.970 7	1.178 6	0.993 8	1.200 0	1.013 5
约束能力指数 LI	2.165 8	1.543 0	1.431 9	1.670 0	1.115 8	1.538 2	1.942 2	1.417 3
资源承载指数 RCI	2.012 8	1.645 1	0.837 1	1.703 9	0.840 7	0.435 7	1.237 3	1.185 1
环境约束指数 ELI	1.118 1	1.108 6	1.069 7	0.990 4	0.888 1	0.281 5	0.764 4	0.847 5
综合承载指数 CCI	1.565 5	1.376 9	0.953 4	1.347 2	0.864 4	0.358 6	1.000 8	1.016 3

从表 2 可以看出,在压力水平指数中,上海得分最高,达 2.421 6,其后依次为南京、无锡、苏州、杭州、宁波、常州、扬州。苏州城市生态系统所受压力处于中等水平,得分为 1.531 7。就支撑能力看,苏州支撑能力最强,得分达 1.829 7,上海第二,得分为 1.203 1,其后依次为杭州、常州、南京、宁波、扬州、杭州、无锡。苏州的支撑能力主要得益于其系统的外向性高,其外贸依存度,外资开放度这两项指标是其它城市所无法比得上的。就资源承载指数而言,上海系统承载指数最高,达 2.012 8,其后依次为无锡、南京、杭州、宁波、常州、苏州、扬州。由于苏州支撑能力很强,尽管压力水平较高,但其系统承载指数不高,为 0.831 7,仅高于扬州(0.435 7)。承载机制反映的城市生态系统内子系统间的界面特征,如将承载指数得分为 1 为分界线,上海、无锡、南京、杭州、宁波五城市系统承载指数均高于 1,属第一层次,社会经济系统对城市支持系统的压力较大,发展也相对不协调。而常州、苏州、扬州承载指数得分均小于 1,属第二层次,社会经济系统对城市支持系统的压力较小,社会经济系统的发展空间相对较大,发展也相对较为协调。

3.2 环境约束指数分析

在约束能力中,上海最强,得分高达 2.1658,这

是因为影响约束能力的三属性中,无论是城乡生态、污染防治水平,还是物质循环程度,上海均居长三角前列。杭州第二,得分为 1.942 2,其后依次为无锡、扬州、南京、苏州、宁波、常州。苏州约束能力一般,主要因为其除系统污染防治能力尚可外,其余两属性均不理想。就环境约束指数而言,上海指数最高,得分达 1.118 1,南京第二,得分为 1.108 6,其后依次为苏州、无锡、常州、宁波、杭州、扬州。但总体看来,四城市的受约指数相差不大,均略高于 1。如将受约指数得分为 1 为分界线,上海、南京、苏州、无锡四城市系统承载指数均高于 1,属第一层次,社会经济系统对城市约束系统的压力较大,发展相对不协调。而常州、宁波、杭州、扬州承载指数得分均小于 1,属第二层次,社会经济系统对城市约束系统的压力较小,社会经济系统的发展空间相对较大,发展也相对较为协调。

3.3 综合承载指数

将承载指数与受约指数综合,得出长三角 8 个城市生态系统的综合承载指数,如表中所示。从中可以看出,上海承载约束指数最高,达 1.565 4,其后依次为南京、无锡、宁波、杭州、苏州、常州、扬州。扬州得分最少,仅为 0.358 6。基于长三角地区属于我国经济最发达地区,这一地区人们的社会经济活动

普遍较全国为强,所以将承载约束指数分级如下,高于1.5为高承压,低于0.5为一般承压,两者之间为较高承压。那么,在8个城市内部,上海属高承压地区,社会经济活动受到支持、约束系统的胁迫作用最为明显。南京、无锡、宁波、杭州、苏州、常州等城市属较高承压区。扬州属一般承压地区,支持、约束系统对人们社会经济活动的胁迫作用相对不明显。

4 结语

在已进入到工业化、城市化发展的中、高级阶段之际,长江三角洲地区已经成为中国生态环境问题最突出地区,这将严重影响其工业化、城市化进程。而且,随着工业化进一步发展,经济、社会、环境之间的矛盾将更加尖锐。将承载力理论引入城市生态系统,对其内部相互作用机制有一客观、正确的认识,以便于探索一条经济-社会-环境协调发展的可持续之路,这对于政府决策、引导城市发展方向具有重要意义,对于我国其它欠发达地区的发展也有较强的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001. 17~10.
- [2] 郭秀锐,毛显强. 中国土地承载力计算方法研究评述[J]. 地球科学进展,2000,15(6):705~711.
- [3] 童玉芬. 人口变动对干旱区生态环境影响的定量评估模型的应用——以新疆塔里木河流域为例[J]. 中国人口·资源与环境,2003,13(5):59~65.
- [4] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,21(1):30~34.
- [5] 余丹林,毛汉英,高群. 状态空间法衡量区域承载状况初探——以环渤海地区为例[J]. 地理研究,2003,22(2):201~210.
- [6] 杨芸,祝龙彪. 城市生态支持系统的指标体系设计及实例分析[J]. 上海环境科学,2001,20(5):237~240.
- [7] 张坤民,温宗国. 城市生态可持续发展指标的进展[J]. 城市环境与城市生态,2001,14(6):1~4.
- [8] 李宏文. 城市生态化水平的评价方法探讨[J]. 生态学杂志,2003,22(1):66~68.

THE CARRYING THEORY OF URBAN ECO-SYSTEM WITH A CASE STUDY IN CHANGJIANG DELTA

BI Dong-su, ZHENG Guang-hong, GU Guo-wei, GUO Xiao-pin

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Urban ecosystem is an economic-social-environmental comprehensive system. It is important to discuss the inner interaction within the system to perform sustainable development strategy. In this paper, the theory of carrying capacity is reviewed and extended to the urban ecosystem. From the view of carrying capacity, we advanced the concept of carrying relationship: sociometric activity is the driving factor, while ecological environment is passive; the interface relationship between them is the pressure and carrying relationship which is named as carrying relationship of urban ecosystem. Then two concept models which are the carrying hierarchy and watering bucket model are used to describe the carrying relationship of urban ecosystem. An evaluation model, involving 35 indicators, is set up and a series of indexes, such as resource carrying index (RCI), environment limited index (ELI) and comprehensive carrying index (CCI) is introduced to describe the carrying relationship of urban ecosystem. At last, an evaluation on the eight representative cities in Changjiang delta is carried out from the view of carrying relationship, and the result indicated that the sequence of the comprehensive carrying index (CCI) from the high to low is Shanghai, Nanjing, Wuxi, Ningbo, Hangzhou, Suzhou, Changzhou, Yangzhou.

Key words: urban ecosystem; carrying relationship; carry hierarchy model; watering bucket model; Changjiang delta