

城市生态系统承载力理论与评价方法

徐琳瑜, 杨志峰*, 李 巍

(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:城市作为一个复杂的人工生态系统,其承载力的意义与生态学中的种群承载力意义有了很大差别。定义了城市生态系统承载力,强调其对维系城市生态系统健康的能动性特征,并在比较生物免疫力与城市生态系统承载力的相似性的基础上,构建了“城市生态系统承载力免疫学模型”作为其理论模型。在理论模型基础上设计其计量模型,分为天然承载力和获得性承载力两部分。并通过承载力与压力的相对变化趋势表达城市生态系统维系其健康水平的能力。以广州市为例,计算了广州市城市生态系统承载力与压力,获得二者的动态关系。结果表明,自 1992 年以来,广州市基本上处于一种经济发展与城市生态系统支持力同步发展的良性状态,所采取的发展模式具有可持续性。

关键词:城市; 生态系统; 承载力; 广州

Theory and evaluation of urban ecosystem carrying capacity

XU Lin-Yu, YANG Zhi-Feng*, LI Wei (State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 771~777.

Abstract: The urban ecosystem is a Social-Economic-Natural Complex consisting of human beings and their surrounding. The urban population and their activities jointly form the core component of the urban system, interlinked with the urban environment. Because resources and environmental quality are crucial to the existence and development of an urban ecosystem, the development of an urban ecosystem is necessarily built on the basis of interactions among environmental carrying capacity (ECC), resource carrying capacity (RCC) and social-economic development capacity (SEDC). A single component's capacity should not be studied without considering the integrity of the whole system. In this paper, the concept of 'Compound carrying capacity' (CCC) is introduced and studied as an index of the interactions among ECC, RCC and SEDC, as a basis for meeting the challenges of urban sustainable development and eco-city building. Using this index, it is discussed in both theory fundamentals and quantitative models how these three kinds of capacity function to sustain the urban ecosystem.

Significance and functioning of the urban ecosystem carrying capacity were interpreted in view of city development perspectives and characteristics of the compound urban ecosystem. The concept of CCC is introduced to improve the comprehensive understanding of this system's structure and functions. Compared with traditional concepts, the CCC of the urban ecosystem includes the ability to develop and thus is characterized by being more dynamic. This dynamism shows in the ability of cities to respond when put under pressure. Clearly, this dynamic is not endless, both environmental, resource and social-economic development capacities have limits.

A comparative study of urban ecosystems and the human immune systems shows that both systems have similar features. Thus, the CCC model is discussed in this paper in light of the biology immunity theory. In this it is assumed that the urban ecosystem is the material input and its main function is to offer eco-services.

The extent of these services is dependent on both the natural carrying capacity and the acquired carrying capacity of the

基金项目:高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(2002);北京师范大学创新研究群体发展计划资助项目(2004)

收稿日期:2004-07-29; **修订日期:**2004-12-29

作者简介:徐琳瑜(1976~),女,辽宁抚顺人,博士,讲师,主要从事城市生态规划研究。E-mail: xly@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

Foundation item: the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE. P. R. C(No. 2002); Innovative Research Team of Beijing Normal University(No. 2004)

Received date: 2004-07-29; **Accepted date:** 2004-12-29

Biography: XU Lin-Yu, Ph. D., mainly engaged in urban eco-planning. E-mail: xly@mail.bnu.edu.cn

urban ecosystem, and human beings are the receptor of the services. This theoretic model shows the carrier, the carried target and the carrying mechanism of the urban ecosystem's CCC. The methodology for both calculation and adjustment mechanism of the CCC is outlined, with reference to the urban ecosystem health index and evaluation models of sustainable development. This quantitative model of CCC includes five parts: the natural carrying capacity, the acquired carrying capacity, the integration of both basic and acquired carrying capacity, the absolute carrying capacity and the comparative carrying capacity of the urban ecosystem.

In addition, a case study in Guangzhou city is described. Employing the CCC model, the complex carrying capacity of Guangzhou City was evaluated. This study showed that the CCC and pressure in Guangzhou were relatively balanced. The urban ecosystem was basically healthy, but in some parts, adjustments should be made in terms of economic activities and ecological restorations.

Key words: urban; ecosystem; carrying capacity; Guangzhou city

文章编号:1000-0933(2005)04-0771-07 中图分类号:Q148,X32 文献标识码:A

“承载力”一词最早出自生态学,指某一环境条件下,某种生物个体可存活的最大数量。随着土地退化,环境污染和人口膨胀等现象的出现,承载力逐渐被引用到城市生态学研究,其内涵也不断丰富、演化和发展,成为了一个具有广泛应用基础的、综合的概念。如在可持续发展理论、生态系统健康、生态系统服务功能及PSR(压力-状态-响应)模型等研究中,均涉及到生态系统承载力的概念。近20a来承载力的研究及其在生态学、环境科学和可持续发展研究领域的应用倍受瞩目,并已形成了一整套独特的理论体系和方法。承载力概念的发展也经历了从自然生态系统的种群承载力,引入到人类生态系统的资源承载力(土地资源承载力和水资源承载力)、环境承载力,又发展到生态系统承载力这一过程。在每一个概念的使用与发展过程中,都包含了对前一阶段含义的扩展,同时也与生态学科的发展及人类社会发展背景存在着极强的相关关系。尽管承载力概念的内涵、形式和意义都发生了深刻变化,但仍处于发展和完善之中^[1]。

在国内,最初对城市承载力的研究基本上是抛开城市生态系统整体性的单要素研究,结果导致承载力研究的片面性和忽视城市生态系统平衡。直至城市复合生态系统理论被提出后,才陆续有学者将城市生态系统承载力作为一个整体性、系统性的概念提出来,并进行了初步的探讨与应用^[2,3]。生态系统承载力的研究必须建立在包括资源、环境与人类系统在内的复杂的生态系统基础之上,而对这类复杂的系统,不确定性是其最基本的特征。要准确地描述一个复杂系统的行为特征与变化是非常困难的^[4]。正因为如此,目前对生态系统承载力这一概念虽然有人提及,却较少有深入、系统研究的报道。考虑到城市问题的多样性和复杂性,需要对城市生态系统承载力理论进行发展,并全面地研究不同发展阶段城市生态系统承载力的大小与特点及其在城市生态规划与评价中的意义。为城市生态建设的必要性、建设强度与投资力度等目前可持续发展战略的研究重点方向^[5]提供理论依据,从而使其理论与方法更具有普遍性、系统性和可操作性。城市时、空、量、构、序的耦合规律是当前国际社会和学术界关注的热点之一^[6]。针对这种需要,本文对“城市生态系统承载力”重新定义,构建了“城市生态系统承载力免疫学模型”为其理论模型,基于此设计了城市生态系统承载力评价模型,并以广州市为例开展了广州市城市生态系统承载力评价。

1 城市生态系统承载力概念框架

生态学中的“承载力”一般均指承载基体所能维系的承载对象的数量阈值。对于自然生态系统来说,承载基体对其承载对象的数量仅仅是通过食物链进行约束的关系,承载关系简单且互动性相对较差。而对于城市生态系统来说,其承载力的承载对象是具有主观能动性的人,其承载基体则是由人工建成的城市生态系统。承载对象有能力改变承载基体的结构,并以最大限度满足自己需求为目标,其行为能够与承载基体的发展变化形成互动,关系更加复杂化。因此,单纯以研究城市生态系统能够供养或维系多少人或经济活动为目的“承载力”已经失去实际意义。

城市生态系统承载力无论从概念还是内涵上与传统的承载力已经有了很大差异,其存在意义是如何能在满足人类一定生活水平和对生态环境质量的要求基础上,维持城市生态系统正常功能和健康水平^[7]。因此本文从城市生态系统的这种复杂的有机结构及其内部复杂的生物化学作用出发,将城市生态系统承载力定义为:正常情况下,城市生态系统维系其自身健康、稳定发展的潜在能力,主要表现为城市生态系统对可能影响甚至破坏其健康状态的压力产生的防御能力、在压力消失后的恢复能力及为达到某一适宜目标的发展能力*。

这里的城市生态系统健康可理解为符合一定城市发展适宜目标的城市生态系统状态,即本文研究城市生态系统承载力的实质是判断城市生态系统是否有能力达到一定目标状态,以及如何维持这个状态。城市生态系统的健康是可持续发展的必要条

* 徐琳瑜,城市生态系统复合承载力研究,北京师范大学博士学位论文,2003:45

件和重要的衡量标准。因此,了解城市生态系统的健康状况、找出其胁迫因子、提出维护与保持城市生态系统健康状态的管理措施和途径,是实现城市可持续发展必须要解决的问题,也可为城市生态规划提供规划依据。

2 城市生态系统承载力免疫学模型

城市生态系统如同生命体一样,有自我调节与自我恢复的能力,在内外扰动或压力不超过其最大承载能力时,当压力撤除以后系统能够从偏离平衡状态的位置重新恢复到原有的平衡态,这就是城市生态系统的恢复力(resilience)^[8]。这种恢复力发生在城市生态系统受到破坏之后,与城市生态系统抵抗力发生在不同状态、不同阶段下,但共同起着维持城市生态系统健康的作用。因此,二者对于城市生态系统都是至关重要的。而这二者与人体中免疫系统所起到的作用相似,正是因为这种恢复力与抵抗力的存在,城市生态支持系统才能够维持健康的状态,实现资源的持续供给、环境的持续纳污,即实现城市生态系统的支持能力,从而支持大规模的人类经济活动。

2.1 城市生态系统承载力与生物免疫力相似分析

城市经常存在着资源消耗、污染物排放等潜在的问题,这就好比病菌一样。在一定的范围或时间内,城市生态支持子系统的自净能力会将这些问题消灭于无形之中。当二者的速度与强度能够达到平衡时,城市生态系统便会维持正常状态,这与免疫系统所起的作用类似(表 1)。而一旦前者大于后者,则会出现环境污染、资源短缺和生态破坏等城市问题,就好比是人得了病痛。这时单靠资源的恢复和环境的自净已经无济于事,此时人类通过从外界输入资源或利用新能源,并通过生态环境建设等手段有针对性地恢复生态系统的正常功能便更为重要。而这些极具城市特征的经济能力、人力能力、技术能力和建设能力及人类的生态环境意识指导的行为能力等可统称为社会经济子系统的发展能力。综上所述,城市生态系统承载力是由生态支持子系统的支持能力及社会经济子系统的发展能力共同复合而成的。前者较为抽象,用肉眼难以识别,就如同免疫系统的作用,属于内支持力,但却是城市生态系统最主要的营养与生存的沃土。而后者则是看得见摸得着的,且受人的主观意识影响较大,就好比是药物和临床手术的作用,表现为外发展力,这也是城市生态系统中最具活力的部分,它在一定程度上影响着内支持力效果,并推动城市生态系统向前发展、不断升级。内支持力与外发展力共同完成着城市生态系统承载力所具有的功能,维系着城市生态系统的健康。

Table 1 Similarity analysis of urban ecosystem carrying capacity and human immunity			
	人体免疫能力 Human immunity	城市生态系统承载力 Urban ecosystem carrying capacity	相似点 Similarities
定义 Definition	人体对感染具有的抵抗能力,它通过识别和排除抗原性异物维持内环境稳定 ^{[9]①}	正常情况下,城市生态系统维系其自身健康、稳定发展的潜在能力,主要表现为城市生态系统对可能影响甚至破坏其健康状态的压力产生的防御能力、在压力消失后的恢复能力及为达到某一适宜目标的发展能力。 ^②	保持主体正常生存并从事正常活动 To sustain main body alive and act normally
物质基础 Material basis	人体免疫系统 Immune system of human being	城市生态库 Urban ecosystem storage	是主体的一部分,与主体相依相存,相互作用 Interacting with main body as an integral part
功能 Functions	天然免疫应答 Natural immunity response	自然生态系统的资源供给与环境自净能力 Ability of resource supply and self purification of natural ecosystem	a 系统先天具备 Congenital b 功能有局限性 Be limited c 被动性 Passive
	获得性免疫应答 Acquired immunity response	污染治理与人工生态环境建设 Pollution control and artificial eco-environment building	a 记忆性 Memory b 特异性 Exceptional function c 正常情况下有自我调节能力 Self-adjust ability in normal conditions d 是对天然免疫(自净能力)的补充 The supplement of the natural immunity response/self-cleaning e 可通过防治与治疗手段提高免疫能力 Be able to improve immunity by manual work f 人为性和主动性 Initiative

* ① Human immunity is the resistance of human body against infection. it can keep the stability of in-environment through recognizing and exclude the foreign matter such as antisubstance; ② Urban ecosystem carrying capacity is the potential capacity of an urban ecosystem to maintain its health and to develop stability. It includes the resistance of urban ecosystem against the pressure which would be harmful to its health, the resistant ability when the pressure disappears, and the development ability by which some proper target can be achieved

2.2 城市生态系统承载力生物免疫模型

(1) 物质基础 这里将能够为城市生态系统提供各种服务,并与城市生态系统健康状态密切相关的系统称为城市生态库。按照城市生态库为城市生态系统提供服务的性质,可分为 3 类:源生态库,汇生态库和渠生态库。城市生态库对城市生态系统有

孕育、促进、稳定和抑制等作用。在城市生态系统发展初期,生态库对城市生态系统的形成及发展起着孕育和滋养作用;在城市发展鼎盛时期(最具活力阶段),生态库对城市生态系统的行为起着促进和支持作用;而在城市发展顶级阶段(相当于生态演替顶级期),生态库起着限制城市生态系统过度膨胀的稳定作用。因此,与人体免疫系统相似,可将执行城市生态系统承载功能的各种城市生态库统称为“城市生态承载系统”。

(2) 功能 城市生态库的服务功能是城市生态系统承载力功能相应于城市生态系统(主要是人)的需求的最终表现形式(end use)。由于城市生态库服务功能弹性与城市生态系统需求变化相比相对较小,且需求变化信息的传递与服务供给信息的反馈之间有一定的时间滞后性,这便造成了在一定时期内城市生态库的服务不能满足城市生态系统的需求状况,从而产生了阶段性城市生态系统压力。当这种压力的信息激活其生态系统承载力时,承载系统迅速做出反应,发挥其防御与恢复潜力。但由于系统健康状况的间接影响及复合承载系统应答时间限制,往往会在某一阶段发生压力大于生态系统承载力状况,即达到生态系统承载力阈值。

(3) 组成 城市生态系统承载力根据系统结构与功能特征可分为天然承载力和获得性承载力两部分。

3 城市生态系统承载力的理论阈值

一般在使用承载力概念时往往更关注其阈值性而忽略它是一种能力或一种潜力的事实。这也是为了在使用上方便和表达上的直观而形成的一种观念。本文所研究的城市生态系统承载力更多的描述其功能性,因此相对比较抽象,较难理解。在对城市生态系统承载力的物质基础及其功能分析结果的基础上,需要对其理论阈值进行探讨,这也是城市生态系统承载力的主要特点之一。

由于城市生态系统承载力既包含了资源与环境的支持力部分,还包含了社会经济的发展力部分。从前者角度讲,城市生态系统承载力存在着阈值上限,即资源最大供给能力和环境最大纳污能力;从后者角度讲,城市生态系统承载力又存在着阈值下限,即城市最小社会经济发展水平或最低人口规模(这在一定程度上由不同国家对城市划分标准决定的)。因此,本文所研究的城市生态系统承载力存在着上下两个阈值限值,即在一个范围内能够正常发挥其功能。此外,城市生态系统承载力并不是一个绝对的、固定的值,而是与城市动态发展变化息息相关。它往往是由人类对生活质量的要求、对各种服务的需求及城市发展目标、以及城市生态系统不同健康等级状态所决定的,即在不同健康状态范围内呈现相对应的阶段性动态特征。这种动态特征将根据人类对城市生态库服务功能的需求分层次来表现。城市生态系统承载力的大小由城市生态系统结构的复杂性、服务功能的大小及城市状态(正常或异常)等因素决定。在一定的城市发展目标,某一时期内的城市生态系统承载力相对于压力变化弹性可表现为 3 种状态,即其变化夹角大于零、等于零和小于零(图 1)。

相应地从城市生态系统发展角度可描述为,当其夹角大于零时,利导因子逐步占据有利生态位,系统趋向快速发展;当其夹角等于零时,利导因子与限制因子作用平衡,系统稳定发展;当其夹角小于零时,限制因子逐渐占据有利生态位,系统发展停滞。需要注意的是,图 1 中的城市生态系统发展曲线表现的是生态系统承载力与压力变化弹性的比较,而不是其绝对量的比较。在实际应用中,人们更关注适度水平,并将此作为实际的城市建设目标,因此,本文在研究城市生态系统承载力时将以保持在适度范围为主要研究目的。

4 城市生态系统承载力计量模型

根据对城市生态系统承载力的定义及其内涵与特征的分析结果,认为城市生态系统承载力是一种维系城市生态系统健康稳定发展的能力,也是一种潜力。对承载力与其相对压力的计算结果的比较可判断城市生态系统是否保持稳定或向健康方向发展,即判断城市生态系统是否可持续发展。因此,对可持续发展的判断亦是表达承载力内在功能的最适宜的指标。可持续发展度^[10]是一种综合的判定可持续发展的指标,其计量模型的结构原理可用于本文作为主要参考。

4.1 城市生态系统承载力计量模型

城市生态系统承载力理论模型是参考生物免疫学理论进行构建的,认为根据系统结构与功能特征可分为天然承载力和获得性承载力两部分,相应地,其计量模型分为天然承载力模型和获得性承载力模型两部分,并以某种关系耦合在一起。

(1)城市生态系统天然承载力计量模型:

$$N = R \cdot \alpha_s^2 \cdot e^{\beta_s}$$

其中
$$\left\{ \begin{aligned} R &= k_1 \left(\sum_{i=1}^n S_i \cdot \log_2 S_i \right) \cdot \sum_{i=1}^n S_i \cdot P_i \\ \alpha_s &= k_2 \sum_{i=1}^m r_i / G \\ \beta_s &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \lambda_j K_j \end{aligned} \right.$$

(1)

式中, N 为城市生态系统天然承载力指数; R 为生态系统恢复指数(resilience); α_s 为资源供给指数; β_s 为环境容量指数; r_i

为第 i 种资源的供给量; G 为国内生产总值(为方便计算,均取 1990 年不变价); S_i 为地物 i 的覆盖面积占全市总面积的百分比; P_i 为地物 i 的弹性分值; λ_k 为污染物权重; K_j 为污染物 j 的排放标准; k 为污染物种类; k_1, k_2 为常数(用来消去量纲:为便于比较,实际应用中使用的相对承载力,因此这里的常数在计算中无数值意义)。

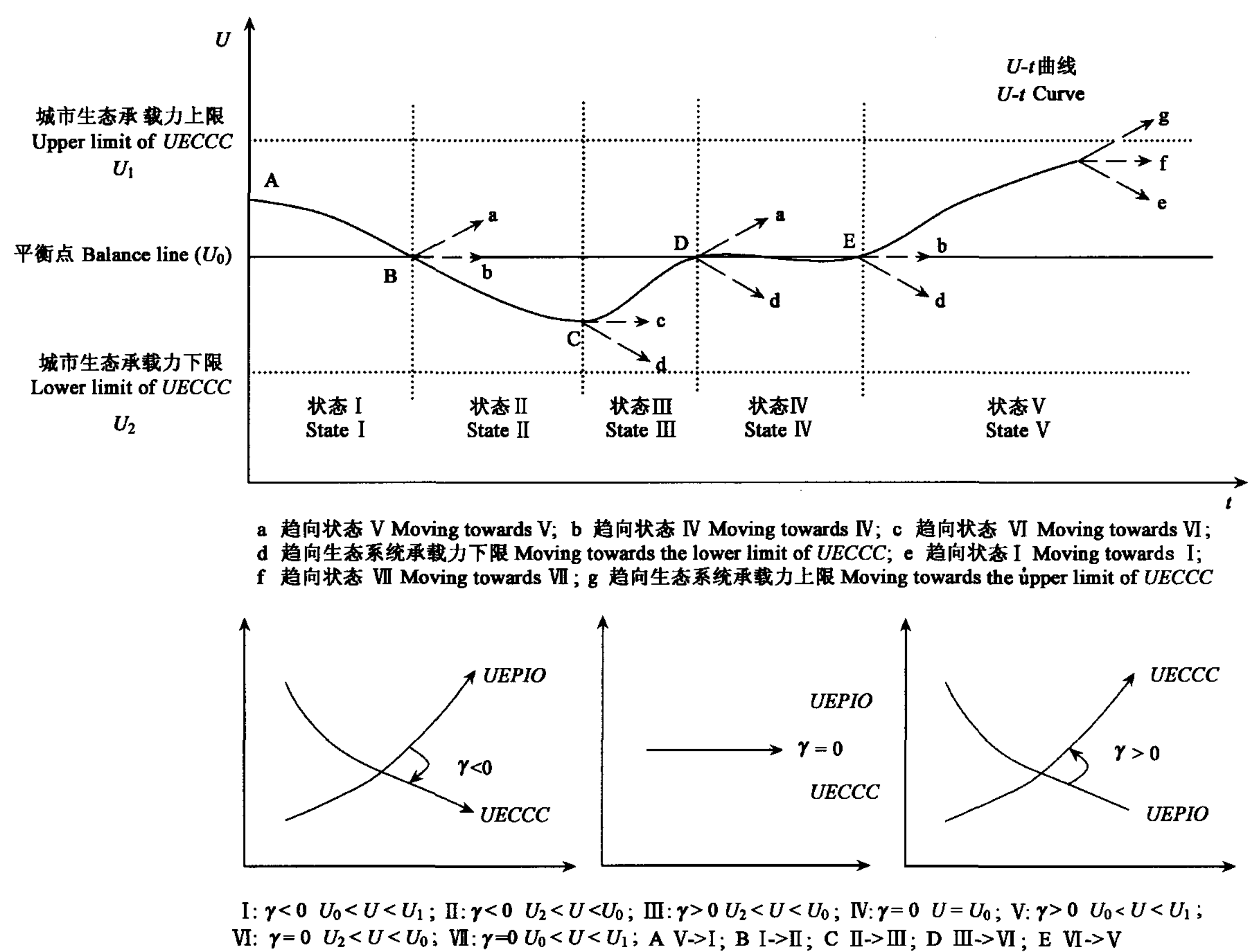


图 1 城市发展某一阶段动态稳定状态示意

Fig. 1 Illustration of the dynamic equilibrium status of urban development of a certain stage

(2)城市生态系统获得性承载力计量模型:

$$F = \mu \cdot \delta \cdot Eco$$

其中 $Eco = \frac{\Delta G/G}{\Delta POP/POP}$

(2)

式中, F 为城市生态系统获得性承载力指数; μ 为技术指数(可用高新技术产业产值占工业总产值表达); δ 为人力资源指数(可用劳动力占总人口比重表达); Eco 为经济能力指数; $\Delta G/G$ 为国内生产总值增长率; $\Delta POP/POP$ 为人口规模变化率。

(3)城市生态系统承载力耦合模型:

$$UECCC = f(N, F) = r \cdot N \cdot e^F$$

其中, $\gamma = a \sum_{j=1}^I \left(\cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{M_j/POP}{M_{j0}/POP'} \right) + b$

(3)

式中, $UECCC$ 为城市生态系统承载力; r 为特征因子(自然资源型或科学技术型,对于非资源型城市该值取 1); M_j 为第 j 种不可再生资源的当年开采量(资源型城市); M_{j0} 为第 j 种不可再生资源当年的消耗量; a, b 为常数,且 $a+b=1$ 。

4.2 城市生态系统压力计量模型

城市生态系统承载力总是相对于城市生态系统压力存在的,这种压力产生的根源是城市人口的急剧膨胀和经济活动的不断加强。考虑到社会经济子系统的“驱动力-压力”复合组分对城市生态系统承载力贡献的复杂性,这里将对城市生态系统压力分为内压力和外压力(间接压力)。前者指社会经济子系统对生态支持系统产生的压力,主要表现为资源消耗和环境污染;后者指城市复合生态系统产生的压力,主要表现为人口规模、经济活动强度和生活质量的要求。这里构建城市生态系统压力指数(UEPIO)来表征这种压力状况,并探求其增长趋势与城市生态系统承载力(UECCC)的关系(在二维坐标系中,并取二者夹角为 γ),以判断城市能否持续发展。当城市生态系统维持一定健康状态,人们生活水平达到一定标准时,①夹角 $\gamma > 0^\circ$ 时,城市生

态系统承载力增长率大于压力增长率,城市可持续发展,城市生态子系统向健康方向发展;②当 $\gamma=0^\circ$ 时,城市生态系统稳定,人口规模与经济活动强度适度;③当 $\gamma<0^\circ$ 时,城市生态系统承载力增长率小于压力增长率,当这种模式持续时间过长,压力最终远远超过承载力时,系统将崩溃。计量模型如下:

$$UEPIO = \alpha_u^2 \cdot e^{\beta_n}$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_u = k_3 \sum_{i=1}^m (POP \cdot s_i + G \cdot \omega_i) / G \\ \beta_u = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \lambda_j (POP \cdot w_j + G \cdot \phi_j) \end{cases}$$

(4)

α 为资源消耗指数; β 为环境污染指数,这里用主要污染物的等标污染负荷比表达; POP 为人口规模; s_i 为第 i 种资源的人均使用量; G 为国内生产总值(为方便计算,均取 1990 年不变价); ω_i 为万元 GDP 资源消耗量; λ_k 为污染物权重; w_j 为污染物 j 的人均排放量; ϕ_j 为万元 GDP 污染物排放量; k_3 为常数; k 为污染物种类。

5 案例研究

以广州市城市生态系统承载力评价为例。考虑到联合国环境与发展会议于 1992 年召开,且同年邓小平南巡,对广州市环境保护工作及经济迅猛发展有极大影响。因此 1992 是广州市城市发展阶段的一个重要转折点。采集从 1992 年到 2000 年的基础数据,根据城市生态系统承载力和压力计算模型,分步进行计算,并以 1992 为基准年计算各年复合承载力与压力相对变化趋势夹角。

- (1)城市生态系统承载力计算 收集数据代入式 3 并进行归一化,可得到广州市城市生态系统承载力变化趋势,如图 2。
- (2)城市生态系统压力计算 收集数据代入式 4 进行计算并进行归一化,可得到城市生态系统压力变化趋势,如图 2。
- (3)相对承载力-压力响应关系 以 $\Delta UECCC_{Ri}$ 和 $\Delta UEPIO_{Ri}$ 分别表示承载力与压力的年际变化率,则当 $\Delta UECCC_{Ri} > \Delta UEPIO_{Ri}$ 时, $\gamma > 0^\circ$; 当 $\Delta UECCC_{Ri} = \Delta UEPIO_{Ri}$ 时, $\gamma = 0^\circ$; 当 $\Delta UECCC_{Ri} < \Delta UEPIO_{Ri}$ 时, 则 $\gamma < 0^\circ$ 。计算结果如表 2 所示。

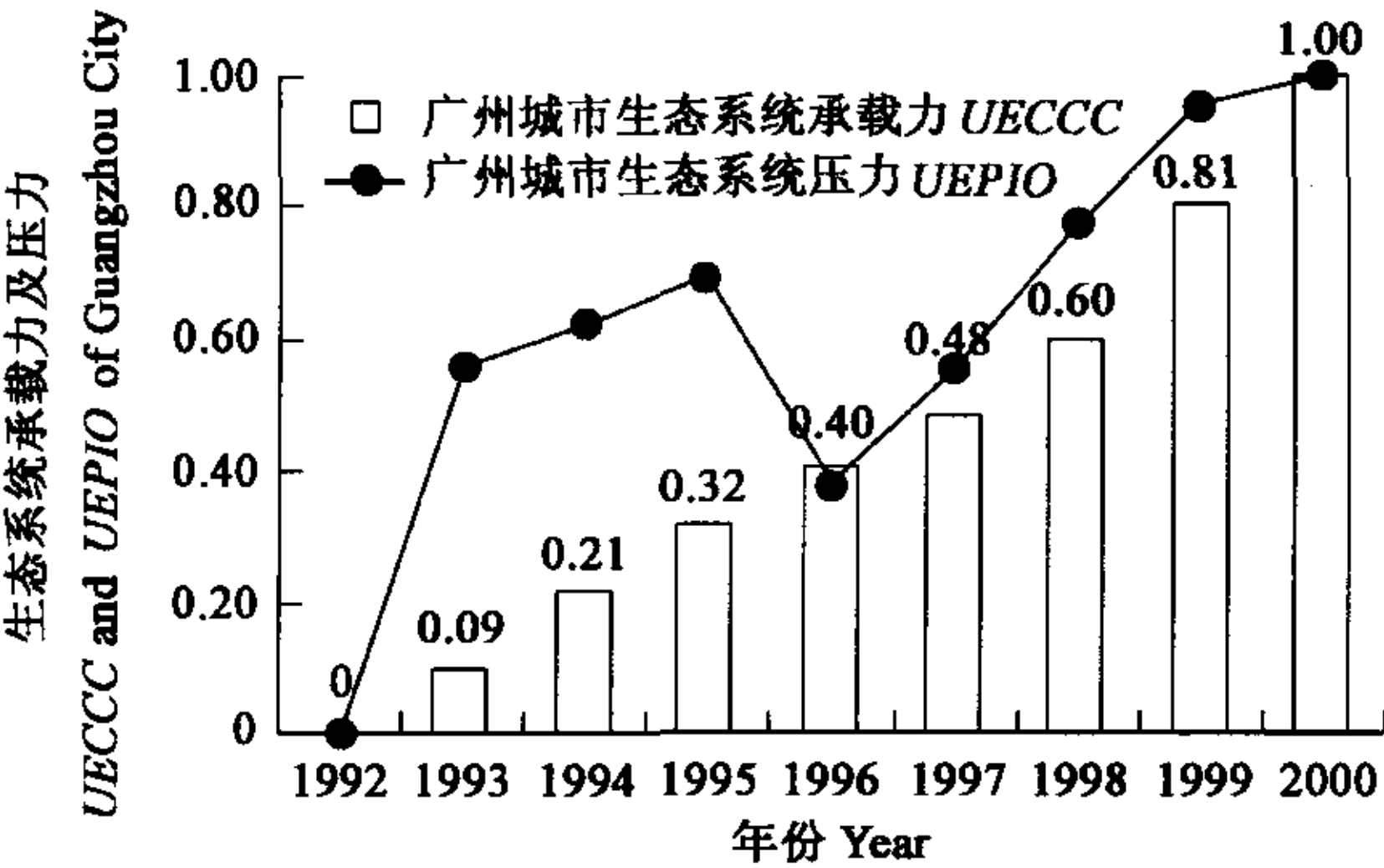


图 2 广州市城市生态系统承载力(UECCC)及压力(UEPIO)变化趋势
Fig. 2 Variation of UECCC & UEPIO of Guangzhou city

表 2 广州市城市生态系统相对承载力与压力计算结果

Table 2 Results of relative UECCC & UEPIO of Guangzhou

	$\Delta UECCC_{Ri}$	$\Delta UEPIO_{Ri}$	γ
1992	—	—	—
1993	0.09	0.56	—
1994	0.12	0.06	+
1995	0.11	0.08	+
1996	0.08	-0.32	+
1997	0.08	0.17	—
1998	0.12	0.23	—
1999	0.21	0.17	+
2000	0.19	0.04	+

— 表示 $\gamma < 0^\circ$; + 表示 $\gamma > 0^\circ$ When $\gamma < 0^\circ$, “—” is applied; when $\gamma > 0^\circ$, “+” is applied

(4)结果分析 根据以上计算结果可知,自 1992 年以来,广州市城市生态系统承载力处于平稳上升趋势,而其城市生态系统压力则有一定波动,主要表现在 1994 年和 2000 年有突然上升趋势。分析其原因,除数据获取上从 1994 年底(1995 年初)开始工业总产值统计标准变化外,还因为 1992 年联合国环发大会提出可持续发展概念,经过一段时期发布与实施,在九五计划初期产生明显效果,使广州市经济能力有了跨越式提高。九五期间广州市基本上处于一种经济发展与城市生态系统支持力同步发展的良性状态,所采取的发展模式具有可持续性。城市发展过程中的阶段性跳跃主要是在保持城市生态系统支持能力前提下,通过经济发展快速拉动的。2000 年广州市城市生态系统处于健康的临界状态^[11],而根据本文的计算结果其承载力与压力的变化趋势夹角自 1992 年以来便一直处于正负相间状态,从而维系着广州市城市生态系统沿 S 型发展,这也与本文对广州市城市发展阶段的判断基本一致。

6 结论

城市生态系统承载力概念及其免疫学理论的提出具有下述实际意义:(1)能够将单要素的承载力进行综合,全面、系统地描述城市生态系统对人类活动的支撑作用;(2)对城市生态系统承载力的计算、评估是确定城市规模、生产结构及制定城市规划的重要依据;(3)可为生态与环境建设强度及投资方向提供生态学依据;(4)其基本理论和定量方法研究是城市生态学科的一项重要理论探索,可应用于城市生态学各研究领域。

References:

- [1] Carey D I. Development based on carrying capacity. *Global Environmental Change*, 1993, **3**(2):140~148.
- [2] Wang J J, Yao X H, Li J R, *et al.* Assessment for Ecological Carrying Capacity of Heihe River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2000, **13**(2):44~48.
- [3] Gao J X. *Exploring Sustainable Development: Theory, method and applying of Ecosystem Carrying Capacity*. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing House, 2001. 17.
- [4] Costanza R and Cornwell L. The 4P approach to dealing with scientific uncertainty. *Environment*, 1992, **34**: 12~20.
- [5] Wang R S. The frontiers of urban ecological research in industrial transformation. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 830~840.
- [6] Niu W Y, Liu Y, Li X X, *et al.* *Report of Sustainable Development Strategy of China in 2003*. Beijing: Science Publishing House, 2003.
- [7] Xu L Y, Yang Z F, Li W. Review on Urban Ecosystem Carrying Capacity. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, **16**(6): 60~62.
- [8] Rapport D J, *et al.* *Ecosystem health. Library of congress cataloging-in-publication data*. Inc. USA: Blackwell science, 1998. 18~33.
- [9] Wei W, Zhang G H. Artificial Immune System and Its Applications in the Control System. *Control Theory and Applications*, 2002, **19**(2): 157~160, 166.
- [10] Feng Y G, Wang H D. The quantitative study on the sustainable development of regional population resources environment economy system. *China Environmental Science*, 1997, **17**(5):402~405.
- [11] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, **22**(6): 525~529.

参考文献:

- [2] 王家骥,姚小红,李京荣,等. 黑河流域生态系统承载力估测. 环境科学研究,2000,**13**(2):44~48.
- [3] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态系统承载力理论、方法与应用. 北京:中国环境科学出版社,2001. 17.
- [5] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. 生态学报,2000,**20**(5):830~840.
- [6] 牛文元,刘毅,李喜先,等. 2003 中国可持续发展战略报告. 北京:科学出版社,2003.
- [7] 徐琳瑜,杨志峰,李巍. 城市生态系统承载力研究进展,城市环境与城市生态,2003,**16**(6):60~62.
- [9] 韦巍,张国宏. 人工免疫系统及其在控制系统中的应用. 控制理论与应用,2002,**19**(2):157~160,166.
- [10] 冯玉广,王华东. 区域人口-资源-环境-经济系统可持续发展定量研究. 中国环境科学,1997, **17**(5):402~405.
- [11] 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.