

城市病诊断与城市生态系统健康评价

郁亚娟, 郭怀成*, 刘 永, 姜玉梅, 李艳秋, 黄 凯

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要:在总结国内外城市病现象和病因的基础上,提出了城市生态系统健康的五大功能,即承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力,概括为 CSAED 模型,分析了与此相对应的限制城市功能的瓶颈因子,将城市病的各项病征与城市功能相联系,并以此为基本框架,构建了城市病诊断和城市生态系统健康的评价体系。基于城市生态系统的发展目标,将梯度型隶属度函数、改进均方差法、加权欧氏距离算法等进行综合集成,建立了一套便于推广比较的城市生态系统健康评价模型算法。以北京市为案例,进行了城市病的单因子诊断和城市生态系统健康评价,计算了北京市 1999~2005 年的城市生态系统健康指数,并分析了北京市发生城市病的原因、城市病所处的阶段等。研究对于我国城市病诊断与解决,以及城市生态系统健康评价具有重要参考意义。

关键词:城市生态系统健康;城市病;加权欧式距离模型;北京市

文章编号:1000-0933(2008)04-1736-12 中图分类号:X21 文献标识码:A

Syndromic city illnesses diagnosis and urban ecosystem health assessment

YU Ya-Juan, GUO Huai-Cheng*, LIU Yong, JIANG Yu-Mei, LI Yan-Qiu, HUANG Kai

College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1736 ~ 1747.

Abstract: Based on the summary of city illnesses in both here and abroad, multi phenomena and causative factors of city illnesses are analyzed. As a matter of fact, urban ecosystem is a kind of special system which is different from general natural ecosystems. From this view, the methodology for urban ecosystem health assessment should not be directly transferred from that of the natural ecosystems. In other words, more attentions should be addressed on this specified ecosystem for its structures and functions, such as its supporting function for economical growth, and its bearing capacity for human living. Due to the discussions above, this study brings forward an integrated and multilayer system for urban ecosystem health assessment, which is called CSAED model. This system is composed of five subsystems which could represent the primary and leading functions of a general city.

An integrated system of CSAED model including five subsystems: Carrying capacity (CC), Supporting capability (SC), Attractive capability (AC), Evolutional capability (EC), along with Developing capability (DC) is brought forward. Each of the five subsystems is consisted of six to eleven indicators. Altogether there are 40 indicators. All the subsystems and the indicator groups are combined together to build up an integrated system. Through the comprehensive indicator framework, the connection between city illnesses and restrictive factors could be detected. After the relationship analysis framework, a comprehensive system for Urban Ecosystem Health Assessment (UEHA) was build, with a

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB724205)

收稿日期:2006-12-30; 修订日期:2007-11-23

作者简介:郁亚娟(1978~),女,江苏南通人,博士生,主要从事环境规划与管理研究. E-mail: pkuyuyj@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hcguo@pku.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research (973) Program Project (No. 2005CB724205)

Received date: 2006-12-30; **Accepted date:** 2007-11-23

Biography: YU Ya-Juan, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental planning and management. E-mail: pkuyuyj@126.com

propagable UEHA model. The UEHA model was an integrated model system composed of several mathematic methods, including: (1) trapezoid shapes of subject functions, (2) modified mean square method, (3) weighted Euclidean distance arithmetic method, (4) weighted consecutive addition method, and (5) weighted consecutive multiplicative method, etc. This UEHA model has some good qualities that it is capable for comparison among both temporal and spatial objectives. Furthermore, the model is easy to actualize on computer and it could treat data groups for multi-year and multi subsystems simultaneously.

Based on the above theory and model, a case study of Beijing City was utilized in this paper. Not only the single factor diagnosis was applied, but also a series of temporal index for UEHA was calculated for year 1999 — 2005 using the integrated UEHA model. Then the nosogenesis of city illnesses and disease course of Beijing City were discussed. The result shows that there are six aspects of constraint factors for Beijing's city illnesses, including: (1) atmospheric pollution; (2) water pollution and water resource shortage; (3) natural resource shortage; (4) infrastructure imperfection; (5) Economy needs more development; (6) more strategies should be addressed on industrial pollution control. The urban ecosystem health assessment for Beijing City demonstrates the whole theory and model of this study are feasible and viable. This study is referable for many other Chinese cities with illnesses like Beijing, and the whole urban ecosystem health assessment model was also propagable to other cities.

Key Words: urban ecosystem health; city illnesses; weighted Euclidean distancemodel; Beijing City

城市病是困扰世界各国的重要问题,随着社会经济的发展 and 人口的迅速增长,城市中的大气污染、垃圾污染、噪声污染、水污染与水资源短缺、能源紧张、人口膨胀、交通拥挤、住宅短缺、土地紧张等问题日渐显著^[1,2]。预计到 2025 年,我国的总体城市化率将达到 55% 左右。城市化的快速发展,使发达国家近百年中出现的城市问题在我国近 20 年内集中爆发,产生“城市病”^[3]。城市是一个自组织的系统^[4]，“城市病”是一种形象的描述,它与人们日常所说的城市问题概念相似,意即城市生态系统的结构、功能等出现了问题,城市功能无法正常实现,城市的社会经济发展产生了阻碍因素。因此,建立一套城市生态系统健康的理论和方法体系,并开发一套一体化的城市病诊断、治疗综合支持系统^[5],对我国具有典型城市病问题的城市进行案例研究,对于指导城市可持续发展具重大意义^[6]。

城市生态系统健康评价(Urban ecosystem health assessment, UEHA)的目的,不只是为了诊断城市病,还需要定义城市生态系统健康的一个期望状态,确定城市生态系统被破坏的阈限范围,并在法律、政策、道德、文化等的约束下^[7],实施有效的生态系统管理^[8]。城市生态系统健康,是保证城市的各项生态系统功能得以实现的前提,城市生态系统只有保持了结构和功能的完整性,并具有抵抗干扰和恢复能力,才能长期为人类社会提供服务^[9]。因此,本文将城市生态系统的功能归纳为承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力等五大子系统,在此基础上,进行城市病的诊断和城市生态系统健康的评价,并以北京市近年来出现的城市病问题作为案例研究。

1 城市生态系统健康评价方法

1.1 “城市病”诊断的目的

城市病是城市的社会、经济、生态环境等各个层面的发展不协调而引起的,它们之间具有相互影响和相互作用的内在联系^[10]。城市生态系统健康指标,是为了从全局分析出发,找出城市病因症结所在,以便提出实用的诊断和应对方案。具体而言,城市病诊断与城市生态系统健康评价的目的就是:(1)发现可能发生的城市生态系统退化/恶化的特征指标,并以此实现城市病早期预警的功能;(2)确定城市生态系统健康状况的时间序列变化水平(纵向)、研究某一城市与大多数城市发展水平的差异(横向),确定城市生态适宜度;(3)城市病原因诊断,确定表征城市生态系统退化/恶化、偏离健康的特征性指标,从而为解决城市病问题找到突破点。

1.2 城市病诊断与健康评价

1.2.1 评价方法概述

对城市生态系统进行健康评价,一般遵循 5 种最基本的思路:(1)基于可持续发展理论,对影响或限制城市可持续发展的因素进行分析和评价^[11];(2)根据城市复合生态系统理论,建立基于社会-经济-生态环境等 3 个子系统的评价体系^[12];(3)根据 Rapport 的活力-组织力-恢复力(VOR)理论^[13],结合城市复合生态系统的特征,从活力、组织结构、恢复力和服务功能等方面建立城市生态系统健康的评价体系^[14];(4)基于结构-功能-系统水平(S-F-SL)的评价方法^[15],主要借鉴自然生态系统的方法,对城市生态系统进行健康评价;(5)根据压力-状态-响应(PSR)^[16]及其衍生理论,如驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应(DPSEEA)理论,筛选影响城市生态系统健康的指标,并按照 PSR 及其相关子系统的逻辑划分指标,从而对城市生态系统健康的综合水平进行评价。

基于可持续发展理论和复合生态系统理论的城市生态系统健康评价,难以突出反映城市病的关键特征^[17];而 VOR 和 S-F-SL 法最初仅仅运用于对自然生态系统健康评价的研究之中,它不能揭示城市复合生态系统亚系统相互作用的特征^[18];基于 PSR 理论的城市生态系统健康评价,更倾向于关注城市人群的健康问题,对于城市系统本身的诊断探索较少^[19]。城市是一个具有复合生态系统特征的有机体,城市病就是城市的功能不能实现时所体现的问题,城市病的显著特征,就是城市功能出现了障碍。因此,对城市病进行诊断,就是找出制约城市生产和生活运转的障碍因子、制约城市发展的瓶颈因子,并对城市生态系统健康展开评价。

1.2.2 CSAED 模型

城市的功能主要体现在:城市是承载了较多的人口,在相对密集的区域,实现了土地的集约利用,促进了经济的发展等。参考自然生态系统健康评价的体系^[20],可以将城市的功能归纳为 CSAED 模型,主要包括以下 5 个子系统:(1)承载力(Carrying capacity, CC),城市的生态环境对于城市生产、生活的承载功能,城市的大气环境、水环境等介质接纳了城市生产、生活排放的废弃物,城市的景观生态具有消纳污染物的功能,城郊区的自然保护区对于城市的综合承载力也有很大贡献^[21];(2)支持力(Supporting capability, SC),城市的土地资源为人类各项社会经济活动提供了基本的场所,而且城市的河流水系、地下水等自然资源也是城市赖以发展的重要资源;(3)吸引力(Attractive capability, AC),城市的吸引力来自城市地理学^[22]的概念,城市生态系统的吸引力主要体现在城市的交通和基础设施为城市经济发展提供的功能支持;(4)延续力(Evolutional capability, EC),主要体现在城市人口、社会和经济的可持续发展,人民生活水平不断提高,城市的经济功能不断加强;(5)发展力(Developing capability, DC),通过管理政策的不断整合和技术手段的不断更新,达到城市生态系统向更高水平发展的目的^[23]。这 5 个子系统之间是相互联系的,体现了城市生态系统既具有生态系统的一般特点,又是一个具有社会经济特性的特殊生态系统,如图 1 所示。

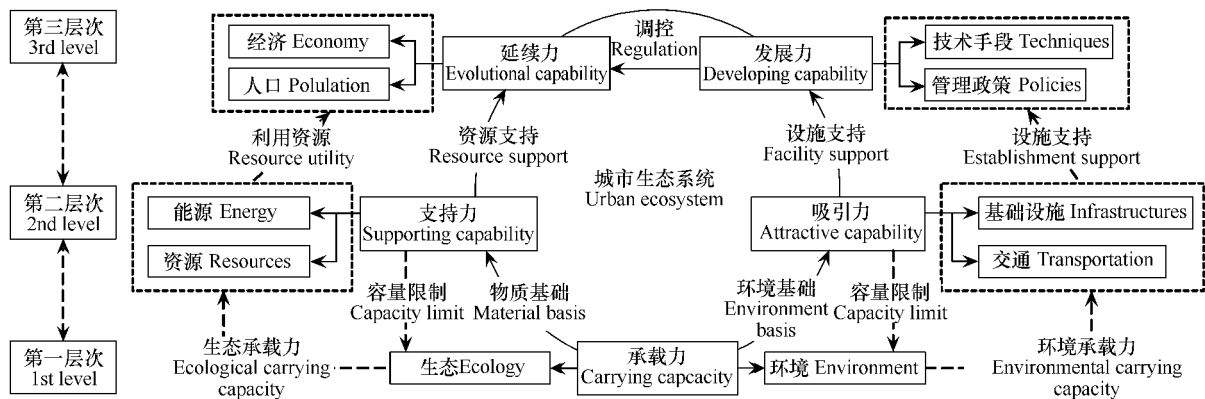


图 1 CSAED 模型 5 个子系统之间的关系

Fig. 1 Relationships among the five subsystems of CSAED model

如图 1 所示,依据 CSAED 模型,城市生态系统是由承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力等互相关联又具有各自特点的 5 个子系统组成的复合生态系统。5 个子系统在城市生态系统中,分别处在不同的层次,对城市的功能作用也互不相同,主要体现在以下 3 个层次:

(1)首先,承载力是基础,它处在城市生态系统的第一层次。它包括生态和环境两个方面,它不但为城市生态系统提供物质基础和环境基础,也是城市生态系统存在的基本介质,为城市提供还原功能。

(2)城市生态系统的第二层次是支持力和吸引力。前者表示城市对自然资源和矿产能源等天然物资的需求,以及人们对这些资源能源的利用,从而对城市发展产生支持力;后者代表人类对城市进行开发和建设以后,使得城市产生了更多有利于人们生产生活的功能,如交通设施、给排水设施等。支持力和吸引力体现了人们利用资源和建设城市的能力,也是城市生态系统区别于自然生态系统或农业生态系统的本质区别之一。

(3)第三层次代表了人类在城市中的主导地位。首先,城市密集的人口、高度发展的经济,都是城市功能和活力的体现,这是支持城市延续发展的基础,所以称为延续力。而人们在对城市进行管理时所采用的技术手段和管理政策,则是城市生态系统与一般自然生态系统具有最显著差别的一个子系统。这里体现了人们对城市生态系统的各个方面,尤其是人口社会及经济的调控作用,这是城市可持续发展的根本,所以称之为发展力。

综上所述,CSAED 体现了城市生态系统从①生态环境基质→②物资开发利用→③社会经济调控的 3 个层次的系统特征,它与 VOR、S-F-SL、PSR 等方法的本质区别就在于以下两个方面:(1)CSAED 模型是针对城市这一特殊生态系统的健康评价的;(2)CSAED 模型最注重的不是生态系统的性质,而是要表征生态系统的功能。因此,本文提出的基于 CSAED 模型的 UEHA,将城市这一特殊生态系统的功能健康与否作为评价的关键,并分析城市功能发生问题时的情况,即所谓的城市病,对于解决我国快速城市化过程中出现的城市病问题具有重要意义。

1.2.3 城市病症状诊断

对城市病的诊断,就是基于 CSAED 模型,通过一系列的模型算法,检查以上各个方面对应的具体问题,找出城市病的病征对应的“瓶颈因子”。对城市病进行综合诊断,针对以上 CSAED 模型,可以将城市病的诸多症状总结为与此相对应的能源、资源、环境、生态、交通、土地、人口等 10 个方面(表 1),从而展开诊断分析。

表 1 城市病症状的诊断分析

Table 1 Diagnosis and analysis of modern city illnesses

对象 Object	城市病症状 City illness symptoms	策略 Strategies
生态 Ecology	城市生态恶化,绿化面积少 Ecology degrades, and green space is sparse	CC 承载力 Carrying capacity
环境 Environment	水质恶化,大气污染,垃圾肆虐,人居环境恶化 Water and atmospheric pollution, trash pollution and community is not qualified for human living	CC
资源 Resources	人地矛盾突出,住宅拥挤,资源短缺 Human-land confliction, limited dwelling, resource shortage	SC 支持力 Supporting capability
能源 Energy	能源匮乏,能源消耗弹性系数高 Energy shortage, high elastic consumption coefficient	SC
交通 Transportation	交通拥堵,交通尾气污染,噪声扰民,交通事故 Traffic congestion, tail gas pollution, noise, traffic accident	AC 吸引力 Attractive capability
基础设施 Infrastructures	城市防灾体系不健全,给排水设施落后 The imperfect of hazard prevention system, and civil engineering	AC
人口 Population	人口密度过高,居民健康水平下降 High population density and decreased life quality	EC 延续力 Evolutional capability
经济 Economy	经济粗放型增长,工业污染重,第三产业发展落后 Extensive economic growth, heavy industrial pollution, lagged development of the 3rd industry	EC
管理政策 Policy	投入资金不足,治理力度不够 Shortage of funds and insufficiency of treatment	DC 发展力 Developing capability
技术手段 Techniques	高科技含量低,三废综合处理率低 Low percentage of high tech production, low rate of pollution treatment and recycling	DC

1.3 城市生态系统健康评价指标体系

城市健康指标的选择与标准值的确定必须既全面又简明,而目前学术界还没有统一的城市生态系统健康标准^[24]。按照上述对城市病综合诊断的 5C 框架,对照城市各项功能和能力建设,根据以下原则确定城市生态系统健康评价的单项指标及指标体系:①指标体系要体现城市生态系统的动态性,便于进行时间序列分析、历史特征回顾和发展水平预测;②指标体系具有通用性和可移植性,便于多个城市之间的比较研究;③指标体系应该可以全面反映案例城市的各个子系统的特征^[25];④选择可以量化的指标;⑤指标具有前瞻性,既要体现我国作为发展中国家的城市特色,也要为城市的进一步发展留下余地^[26];⑥对那些目前统计数据不完整,但对于城市病诊断又十分重要的指标,可以用类似指标代替。

根据以下原则确定指标的目标值:①尽量采用已有国际/国内标准的指标目标值;②参考国内外文献,确定目标值;③对有退化趋势的指标,可以采用历史上较好年份的数据作为目标值;④对于有上升趋势的指标,可由我国城市现状值作趋势外推来确定目标值。在此基础上,最终确定了城市生态系统健康评价的指标体系以及目标值(表 2)。

表 2 城市生态健康评价指标体系

Table 2 Indicator framework for urban ecosystem health assessment

子系统 a	No.	指标 Indicator	目标值 Target	出处 Source	子系统 a	No.	指标 Indicator	目标值 Target	出处 Source
CC	1	城区绿化覆盖率(%)	>60	[27]	EC	22	城区人口密度($10^4/\text{km}^2$)	3500	[30]
	2	单位耕地化肥施用量(t/hm^2)	<0.471	b		23	城市化率(%)	85	[32]
	3	城区 PM_{10} 平均浓度(g/m^3)	<0.100	c		24	人口自然增长率(%)	0.80	[30]
	4	城区道路噪声(dB)	<50	c		25	城市家庭恩格尔系数(%)	35	[29]
	5	建成区区域噪声(dB)	<50	c		26	学龄儿童入学率(%)	100	d
	6	河段水质达标率(%)	100	d		27	城市人均支配收入(yuan)	15000	d
SC	7	年降水量(mm)	>585	f	DC	28	农民人均纯收入(yuan)	8000	[27]
	8	人均耕地面积	1.62	[28]		29	GDP 增长率(%)	>10	d
	9	地均 GDP 产值(10^4 元/ km^2)	10400	[29]		30	第三产业占 GDP 比重(%)	45	[33]
	10	城镇人均住宅使用面积(m^2)	>20	[30]		31	人均 GDP(yuan)	80000	[27]
	11	城区人均道路面积(m^2)	>8	[31]		32	第三产业从业人员比率(%)	45	[34]
	12	单位 GDP 能耗($\text{tSce}/10^4$ yuan)	<0.5	[31]		33	利用外资占 GDP 比重(%)	5	d
AC	13	公路网密度(km/km^2)	1	d	DC	34	环境保护投资占 GDP(%)	>5	[27]
	14	千人私人汽车拥有量	120	e		35	固定资产投资占 GDP(%)	>40	[31]
	15	万人拥有公交车辆	100	[27]		36	工业固废综合利用率(%)	80	g
	16	每千 km^2 公安消防车辆数	25	d		37	工业增长率(%)	10	d
	17	房地产投资占 GDP 比重(%)	20	[27]		38	工业废水达标排放率(%)	100	d
	18	人均邮电业务量(yuan)	2500	g		39	工业废水排放量($\text{t}/10^4$ yuan)	8.6	[28]
	19	小学专任教师负担学生数	10	h		40	工业固废产生量($\text{t}/10^4$ yuan)	0.5	[28]
	20	每千人拥有执业医师数	5	[31]					
	21	每千人拥有医院床位数	8	[31]					

1. green space rate in the city zone; 2. fertilization quantity of unit farmland; 3. the PM_{10} concentration in the city zone; 4. road noise in the city zone; 5. regional noise in the built area; 6. percentage of river water quality that reaches the national standard; 7. annual precipitation quantity; 8. farmland per capita (mu); 9. GDP for unit land area; 10. dwelling area per capita in city zone; 11. road area per capita in city zone; 12. energy consumption every unit GDP; 13. road net density; 14. private car possessions for every 10^3 people; 15. bus amount of every 10^4 people; 16. fire-crash trucks of each 10^3 km^2 area; 17. percentage of real estate investment in GDP; 18. posts and telecommunications cost per capita; 19. the number of primary school students that each teachers in charge of; 20. certified medical personnel for every 10^3 habitants; 21. sickbeds for every 10^3 habitants; 22. population density in city zone; 23. urbanization rate; 24. population increase rate; 25. Engle's coefficient for urban families; 26. school entrance rate of right age children; 27. governable income per capita in city zone; 28. pure income of rural habitants per capita; 29. growth rate of GDP; 30. the rate of the 3rd industry in total GDP; 31. GDP per capita; 32. percentage of the 3rd industry employees; 33. percentage of foreign investment in total GDP; 34. percentage of environmental protection in GDP; 35. percentage of fixed assets investment in GDP; 36. comprehensive recycling percentage of industrial solid wastes; 37. industry growth rate; 38. eligible release rate of industrial wastewater; 39. release quantity of industrial wastewater; 40. industrial solid waste quantity; a. subsystem; b. 以 1995 年为基准值 take 1995 as benchmark; c. 国标 national standard; d. 理想目标 ideal target value; e. 世界平均值 global average value; f. 多年平均降水量 multi-year average amount of precipitation; g. 趋势外推 conjectured from development trend; h. 以 2005 年为基准值 take 2005 as benchmark

1.4 城市生态系统健康评价模型

一个城市生态系统健康评价模型如果要便于推广,那么需要满足 2 个基本条件:(i)模型运行得到的城市生态系统健康评价结果,应该适于纵向研究,即可以反映离散时间序列的动态特征^[35];(ii)适于不同城市生态系统健康的横向比较,方便不同城市案例之间的比较^[36]。目前常见的评价方法,主要可以归纳为 2 种:(1)首先划分“病态-不健康-亚健康-健康-很健康”的 5 级指标值^[37],再用模糊数学、人工神经网络等方法计算各指标的属性值;(2)用主成分分析等方法,直接对指标矩阵产生内生权重,得到相对健康指数^[38]。基于 5 级指标的城市生态系统健康评价模型,能够很好地对比城市之间的健康水平差异,但是对 5 个级别的确定却带有一定的人为因素;而基于主成分分析的评价方法,虽然可以避免对指标进行分级导致的人为任意性,但是,这种内生权重的计算方法,也直接导致了评价体系的移植性较差,不适于多个城市之间的横向比较。

为了克服上述不足,本文基于复合生态系统理论,从城市的 CSAED 模型出发构建城市生态系统健康评价模型,以通用的指标目标值为标准,首先用规范化方法计算各个单因子与目标值之间的距离,这样可以对城市生态系统进行单因子诊断;然后,用改进均方差法得到权重,避免了人为确定权重的主观性,再通过加权欧氏距离法并结合加权求和法、加权连乘法,从而计算城市生态系统健康综合指数。该模型可以清晰地辨识城市生态系统的单个瓶颈因子,也可以分析城市的总体发展状况和各子系统的相对健康水平,同时还能够展开时间序列分析,还能进行多个城市间的横向比较,为城市病的诊断医治、城市管理决策提供科学依据。

1.4.1 原始数据集

根据表 2 的指标体系,确定 $f=1,2,\dots,k$ 个子系统的数据矩阵,其中,第 f 个子系统的原始数据矩阵 X 和目标值矩阵 X_h 分别是:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X_h = [x_{h1} \quad x_{h2} \quad \cdots \quad x_{hn}] \quad (2)$$

式中, x_{ij} 代表第 i 年的第 j 个指标;健康态 x_{hj} 代表第 j 个指标的目标值 ($i=1,\dots,m; j=1,\dots,n$)。

1.4.2 原始数据规范化和单因子诊断

根据城市生态系统健康的发展特点,本文采取阶梯形隶属度函数,对原始数据进行规范化,采用的阶梯形状如图 2 所示。

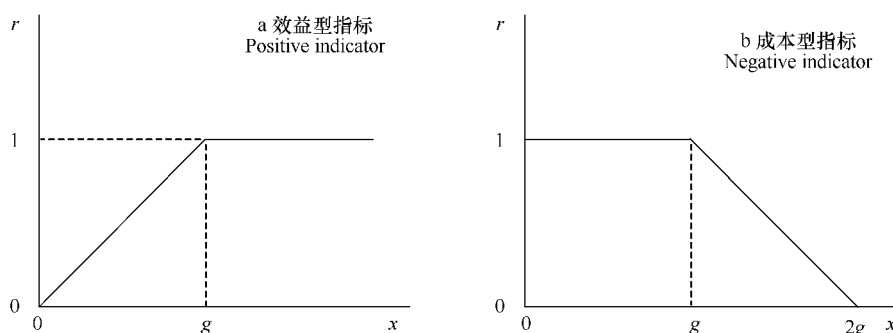


图 2 阶梯形隶属度指标

Fig. 2 trapezoid shapes of subject degree functions

然后用隶属度法则计算出规范化矩阵,如公式(3)和(4)所示,从而将矩阵 X 转换为指标隶属度矩阵 $R = (r_{ij})^{m \times n}$,健康目标值矩阵 X_h 转化为: $R_h [1, 1, \dots, 1]^{1 \times n}$ 。

效益型指标:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq x_{hj} \\ \frac{x_{ij}}{x_{hj}} & x_{ij} < x_{hj} \\ 0 & x_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

成本型指标:

$$R_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq 2x_{hj} \\ 1 - \frac{x_{ij} - x_{hj}}{x_{hj}} & 2x_{ij} > x_{ij} > x_{hj} \\ 1 & x_{ij} \leq x_{hj} \end{cases} \quad (4)$$

1.4.3 确定综合评价权重

各子系统的单项指标权重采用改进的均方差法确定^[31]。均方差法不仅能反映指标间的相对重要性,还能初步反映指标间的协调程度。评价指标权重的确定步骤如下:

1) 对原始矩阵 X 进行无量纲化处理

$$y_{ij} = x_{ij} / \max(x_i) \quad (5)$$

2) 计算评价指标的均值

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (6)$$

3) 计算评价指标的方差平方

$$s_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_{ij} - \bar{y}_i]^2 \quad (7)$$

4) 确定权重

$$w_j = s_j / \sum_{j=1}^m s_j \quad (8)$$

其中, w_j 满足

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (9)$$

1.4.4 计算加权欧氏距离

用加权欧式距离法^[39,40]计算各子系统每一年份到健康态的距离:

$$d_{ih,f} = \sqrt{\sum_{j=1}^n [w_j \times (r_{ij} - r_{ih})^2]} \quad (10)$$

各子系统的健康指数用下式计算:

$$h_{ih,f} = 1 - d_{ih,f} \quad (11)$$

重复 k 次上述第 1~3 步骤,分别计算得到各个子系统对应的 $d_{ih,f}$ 和 $h_{ih,f}$ 。 $d_{ih,f}$ 代表第 f 个子系统与健康态的距离, $h_{ih,f}$ 代表第 f 个子系统的健康指数 ($f=1, 2, \dots, k; k=5$)。 $d_{ih,f}$ 越大说明距离健康态越远,而 $h_{ih,f}$ 越大则子系统 f 的健康指数越高。

1.4.5 计算综合健康指数

首先用改进的均方差法计算各子系统的权重 w_f ,计算方法与指标权重计算方法类似,然后,分别用“加权求和法”^[31]和“加权连乘法”^[18]计算城市生态系统的综合健康指数:

1) 加权求和法:

$$HA_i = \sum_{f=1}^k w_f \times (h_{ih,f}) \quad (12)$$

2) 加权连乘法:

$$HB_i = \prod_{f=1}^k h_{w_f}^{w_f} \quad (13)$$

式中, HA_i 和 HB_i 分别代表两种算法的第 i 年的复合健康指数, 其余变量含义同上。

2 案例研究

2.1 研究区概况

北京是我国首都, 全市土地面积 16410.54 km², 2005 年地区生产总值为 6886.3 亿元, 年末常住人口 1538.0 万人, 其中城镇人口 1286.1 万人, 农村人口 251.9 万人, 北京的城市化率在国内处于较高水平, 因此我国城市化进程中所呈现的“城市病”问题在北京市得到了较为集中的体现。由于北京市建成区面积大、人口众多、经济活动剧烈, 因此城市生态系统的复杂程度很高, 具有多种病症相互交织的特点, 例如基础设施发展不平衡导致交通阻塞, 而交通拥堵又导致街道空气质量恶化、道路噪声嘈杂, 大气和声环境恶化又引起居民生活质量的下降, 同时由于人口密集、工业发达, 因此对于水、土地等各种自然资源的需求也产生较大缺口。总之, 北京是我国城市化进程中产生城市病问题的典型城市, 对北京的城市病进行诊断, 并研究北京的城市生态系统健康问题, 对于我国诸多城市都具有重要的参考意义。

2.2 指标权重计算

根据上述建立的城市生态系统健康评价的模型方法, 以北京市为案例进行城市病诊断和城市生态系统健康评价研究。首先根据式(5)~(9)计算各二级指标的权重, 以及各子系统的权重(表3)。

表3 各子系统和二级指标的权重
Table 3 Weights of sub-systems and all indicators

f	w_{f1}	w_{f2}	w_{f3}	w_{f4}	w_{f5}	w_{f6}	w_{f7}	w_{f8}	w_{f9}	w_{f10}	w_{f11}	W_f
CC	0.1668	0.1649	0.1658	0.1661	0.1654	0.1711	—	—	—	—	—	0.2018
SC	0.1532	0.1663	0.2013	0.1408	0.1681	0.1703	—	—	—	—	—	0.1979
AC	0.1081	0.1177	0.1089	0.1137	0.1170	0.1149	0.1053	0.1065	0.1079	—	—	0.2034
EC	0.0918	0.0927	0.1102	0.0874	0.0977	0.0832	0.0848	0.0842	0.0952	0.0845	0.0882	0.2051
DC	0.1787	0.1212	0.0806	0.0836	0.1251	0.0948	0.1860	0.1300	—	—	—	0.1918

2.3 单因子诊断与分析

根据城市生态系统健康评价的规范化方法和单因子评价模型, 运行程序得到健康状态的单因子分析结果(图3和表4)。图3表示40个指标的属性值按年度累计, 隶属度低的指标在图中显示出缺口的形状, 由此可以得到较为直观的指标因子判断。表4则列出了属性值 < 0.5 的10个指标, 据此可以对城市病的限制因子展开分析。

从图3和表4可以看出, 第3、6、8、9、12、15、22、31、39、40指标明显偏低, 根据“水桶效应”理论, 这些指标是阻碍和制约城市发展的瓶颈因子, 对于城市生态系统健康的整体水平具有瓶颈作用, 会抑制城市的总体发展^[41]。就单因子诊断而言, 约有 1/4 的指标隶属度 < 0.5, 因此对这些指标需要引起足够的重视, 从这些指标也可以找出限制城市生态系统发展的瓶颈因素:

(a) 大气污染不可忽视 从第3指标城区 PM₁₀ 平均浓度的单因子评价可以看出, 北京市大气中的可吸入颗粒物浓度水平较高, 这影响了整个城市生态系统的健康水平。但是从 1999~2005 年的趋势也可以看出, 北京的大气环境虽然起点较差, 但是有逐渐改善的趋势。

(b) 水资源短缺和水质性缺水并重 从第6指标河段水质达标率的单因子评价可以看出, 北京市河流水质落后于城市生态系统健康的总体发展水平。由于资料关系, 本研究以河流水质指标和年降水量指标代表水资源特征, 事实上, 前者体现了水质达标率较低的问题, 后者的隶属度大于 0.5 因此没有列在表4中。但实际上, 年降水量指标的隶属度也不高, 仅略大于 0.5。这些情况说明, 北京市的水资源短缺和水质性缺水并重。

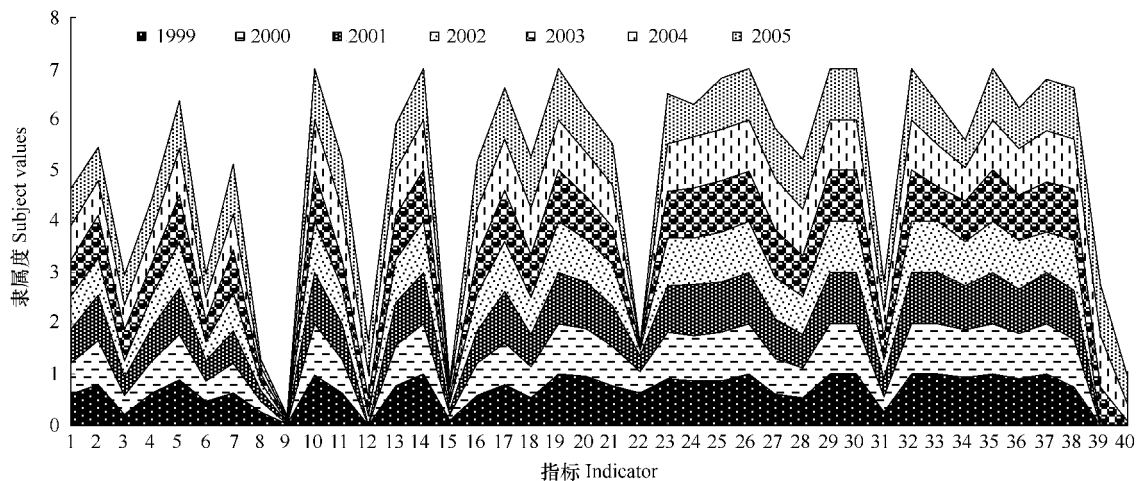


图3 北京城市生态系统健康的单因子评价

Fig. 3 Single indicator assessment of urban ecosystem health for Beijing City

表4 属性值小于0.5的指标单因子诊断

Table 4 Single indicator diagnosis with the characteristic value less than 0.5

编号 No.	年份 Year							平均值 Average
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
3	0.2000	0.3800	0.3500	0.3400	0.5900	0.5100	0.5800	0.4214
6	0.4584	0.4160	0.3980	0.3640	0.4220	0.4520	0.4530	0.4233
8	0.2469	0.2222	0.2037	0.1605	0.1667	0.1481	0.1420	0.1843
9	0.0153	0.0181	0.0212	0.0248	0.0287	0.0355	0.0403	0.0263
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.1800	0.3600	0.5000	0.6000	0.2343
15	0.0995	0.1041	0.1113	0.1235	0.1329	0.1454	0.1355	0.1217
22	0.6258	0.4226	0.2992	0.1365	0.0694	0.0307	0.0097	0.2277
31	0.2675	0.3015	0.3375	0.3855	0.4361	0.5137	0.5681	0.4014
39	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7560	1.0000	1.0000	0.3937
40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0620	0.3240	0.5600	0.1351

(c)资源短缺 从指标8人均耕地面积和指标22城区人口密度,指标12单位GDP能耗的隶属度可以看出,北京的人均耕地较低,而且呈下降趋势,说明北京的粮食等需要依赖外区域的输入。城区人口密度过高,导致城市的土地资源紧张,引起房价上涨、就业竞争激烈等更深层次的问题。而单位GDP能耗的隶属度也较低,说明北京市的能源消耗仍然有可改进的空间,这也是城市生态系统健康发展的内在需求。

(d)公共交通等基础设施发展不足 指标15每万人拥有公交车辆的隶属度平均值仅0.1217,说明北京的公共交通服务距离国际先进水平仍有较大差距,尤其是在北京市人口密度较大的情况下,发展公共交通服务,是减少交通拥堵的重要措施。

(e)经济发展仍有巨大潜力 指标9地均GDP产值和指标31人均GDP的隶属度均较低,尤其是前者,隶属度都小于0.1。说明北京市的土地产值仍有巨大潜力可以发掘,迫切需要发展占地面积少、经济效率高、先进技术含量高的经济增长点。

(f)在减少工业污染方面,仍然有巨大潜力 从指标39工业废水排放量的近年变化趋势可以看出,北京市在工业减污方面取得了巨大的进步,隶属度从0增长到1,发生了质的变化。而指标40:工业固废产生量的隶属度虽然也有好转的趋势,但变化的趋势没有前者明显,到2005年刚超过0.5,说明工业固废减排和资源循环利用方面,仍有较大的挖掘空间。

2.4 城市生态系统健康评价

单因子诊断是为了寻找引起城市病的关键因子,但实际上,任何城市问题都不是独立的,各病症之间具有相互作用^[42]。因此,有必要对城市生态系统的总体状况作更进一步的分析。根据城市生态系统健康综合评价模型,分别用公式(12)和(13)计算得到北京城市生态系统健康指数(表5)。由表5可知,从1999~2005年,北京市CSAED的5个子系统大部分都呈上升趋势,其中,承载力从0.8115上升到0.8470,支持力从0.7108上升到0.7636,吸引力从0.8701上升到0.9010,延续力从0.9082稍微下降到0.8954,发展力从0.7990上升到0.9121。CSAED中,资源和能源支持力(SC)相对较低,说明北京市本身的人均资源和能源相对欠缺,在一定程度上需要外区域的输入作为补充,今后北京市CSAED模型的5项功能如果要协调并进,最迫切的就是要加强支持力建设。

根据城市病发展的四阶段论^[43],城市化率在10%~30%之间是城市病的隐性阶段,城市化率在30%~50%是城市病的显性阶段,城市化率在50%~70%是城市病的发作阶段,城市化率达到70%以上,则进入城市病的康复阶段。北京市1999~2005年的城市化率为77.29%~83.62%,按照四阶段论,北京市的城市病在这7年间是处于发作阶段后期并走向康复阶段的时期。根据本研究的计算,加权求和法(HA)和加权连乘法(HB)计算得到的北京市城市生态系统健康指数差别不大,其中HA居于0.8209~0.8639之间,HB居于0.8181~0.8621之间,城市总体健康水平较高,而且近年来基本呈现缓慢上升的趋势,这个结果与城市病的四阶段论是相符合的。但是,城市病的康复不是随着城市化进程而自动消失的,而是需要进行一系列的调控措施^[3],尤其注重对瓶颈因子的调控。

表5 北京市城市生态系统健康评价

Table 5 Temporal series analysis of urban ecosystem health assessment for Beijing City

年 Year	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
CC	0.8115	0.8290	0.8280	0.8203	0.8530	0.8445	0.8470
SC	0.7108	0.7079	0.7096	0.7270	0.7389	0.7536	0.7636
AC	0.8701	0.8790	0.8824	0.8889	0.8920	0.9011	0.9010
EC	0.9082	0.9061	0.9061	0.9000	0.8999	0.9011	0.8954
DC	0.7990	0.8007	0.8001	0.7986	0.8634	0.8999	0.9121
HA ¹	0.8209	0.8256	0.8263	0.8280	0.8450	0.8603	0.8639
HB ²	0.8181	0.8226	0.8233	0.8255	0.8479	0.8583	0.8621

1. 加权求和法得到的综合健康指数 comprehensive urban ecosystem indices through weighted consecutive addition method; 2. 加权连乘法得到的综合健康指数 comprehensive urban ecosystem indices through weighted consecutive multiplication method

3 结论

本文基于城市生态系统的承载力、支持力、吸引力、延续力和发展力的分析,建立了城市生态系统健康评价的指标体系,参考国内外先进城市发展的目标,给出了城市生态系统健康的目标值体系。为了使得城市生态系统健康评价的模型方法具有横向和纵向的可比性、可移植性,建立了一套集成阶梯形隶属度函数、改进的均方差法、加权欧氏距离法、加权求和法、加权连乘法的城市生态系统健康综合评价模型。该模型不但可以对城市病进行单因子诊断,而且可以对城市生态系统的CSAED能力给出评价,并且能计算综合健康水平。本文对北京市进行了案例研究,依据诊断的内容,对城市生态系统健康展开评价,分析城市病的起因,以此作为城市管理的决策支持,最终实现城市的健康发展。

References:

- [1] Duan X M. Urban dimensions and urban illnesses: retrospect on city developing directions. China Population, Resources and Environment, 2001, 11(4): 133—135.
- [2] Hezri A A, Dovers S R. Sustainability indicators, policy and governance: Issues for ecological economics. Ecological Economics, 2006, 60(1): 86—99.

- [3] Liu H L. Environmental friendly society needs to solve “urban illnesses”. *Green Leaf*, 2005, 11: 12—13.
- [4] Kay J J, Boyle, Regier H A, Boyle M, *et al.* An Ecosystem Approach for Sustainability: Addressing the Challenge of Complexity. *Futures*, 1999, 31(7): 721—742.
- [5] Wang R S. The frontiers of urban ecological research in industrial transformation. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 830—840.
- [6] Huang G H, Chen B, Qin X S. Study of diagnosing, preventing and controlling illnesses of modern cities. *Journal of Xiamen University of Technology*, 2006, 14(3): 1—10.
- [7] Ronald F, William T. Urban problems and community development. *The Social Science Journal*, 2000, 37(2): 317—320.
- [8] Ma K M, Kong H M, Guan W B, *et al.* Ecosystem health assessment: methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2106—2116.
- [9] Zeng X T, Ding C R, Zheng X J. Ecosystem health valuation and the existing problems. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 287—289.
- [10] Hu C L, Xiao L. A quantitative analysis on region economy development disease of Shantou City. *Tropical Geography*, 2003, 23(2): 144—148.
- [11] Yu Y J, Guo H C, Liu Y, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of ecological demonstration area. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(4): 303—308.
- [12] Huang K, *et al.* Study and implementation on the grey comprehensive evaluation support system of ecocity. *Journal of Southeast University*, 2002, 18(4): 356—360.
- [13] Rapport D J, Costanza R, *et al.* Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397—402.
- [14] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, 22(6): 525—529.
- [15] Xu F L, Tao S, *et al.* Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, 35(13): 3157—3167.
- [16] Jerry M S, *et al.* Developing ecosystem health indicators in Centro Habana: a community-based approach. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 15—26.
- [17] Grove J M, *et al.* A social ecology approach and application of urban ecosystem and landscape analyses: a case study of Baltimore, Maryland. *Urban Ecosystems*, 1997, 1(4): 259—275.
- [18] Hu T L, Yang Z F, He M C, *et al.* An urban ecosystem health assessment method and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 269—274.
- [19] Rapport D J. The health of ecology and the ecology of health. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2002, 8(1): 205—213.
- [20] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, *et al.* Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486—490.
- [21] Aguilar B J. Applications of Ecosystem Health for the Sustainability of Managed Systems in Costa Rica. *Ecosystem Health*, 1999, 5(1): 36—48.
- [22] Zhou Y X. *Urban Geography*. Beijing: Commercial Press, 1995, 274—275.
- [23] Lyons J R. Urban ecosystem management: bringing science and policy together. *Urban Ecosystems*, 1997, 1(1): 77—83.
- [24] Guan D J, Su W C. Study on evaluation method for urban ecosystem health and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10): 1716—1722.
- [25] Chakrabarty B K. Urban Management: Concepts, Principles, Techniques and Education. *Cities*, 2001, 18(5): 331—345.
- [26] Oswal P Patwardhan, *et al.* Assessing ecosystem health indicators in Pune City, India. in Martin J. Bunch, *et al.* eds., *Proceedings of the Third International Conference on Environment and Health*, Chennai, India, 2003: 315—321.
- [27] Xie H L, Liu L M. Study on the Sustainable Development of the Living Environment in Haidian District in Beijing. *Planners*, 2004, 20(3): 73—75.
- [28] Yu D L, Mao H Y, Gao Q. Study on regional carrying capacity: theory, method and example. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 201—210.
- [29] Li C Y. Discussions on the city modernization indicators. *City modernization indicator framework research*. Beijing: Red Flag Press, 2001. 12—13.
- [30] Xie H L, Li B. A study on indices system and assessment criterion of ecological security for city. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2004, 40(5): 705—710.
- [31] Sang Y H, Chen X G, Wu R H. Comprehensive assessment of urban ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1280—1285.
- [32] Chen Y G, Luo J. Derivation of relations between urbanization level and velocity from logistic growth model. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1063—1072.
- [33] Yang Z F. *Urban Ecological Sustainable Development Planning*. Beijing: Science Press, 2004. 23—24.
- [34] Huang S C. Modernization indicator system of Wuhan City. *City modernization indicator framework research*. Beijing: Red Flag Press, 2001. 110—111.
- [35] Grimm N B, *et al.* Integrated approaches to long-term studies of urban ecological system. *BioScience*, 2000, 50(7): 571—584.

- [36] Fu B J, Liu S L, Ma Keming. The contents and methods of integrated ecosystem assessment (IEA). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885—1892.
- [37] Liu M H, Dong G H. Ecosystem health assessment and driving force analysis in Qinghuangdao area based on RS & GIS. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 930—938.
- [38] Gao J X, Duan F Z, Xiang B. The application of principal component analysis to agricultural soil contamination assessment. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 836—842.
- [39] Dong X, Wei Z J. A clustering method of Euclid Distance with weight. *Journal of Information Engineering University*, 2005, 6(1): 23—25.
- [40] Deng H P, Yeh C H, Willis R J. Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(10): 963—973.
- [41] Hu T L, He M C, Yang Z F. An analytical method on limiting factors of urban ecological supporting system and its application to Guangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1493—1499.
- [42] Önal S, *et al.* The urban problems of Gazimagusa (Famagusta) and proposals for the future. *Cities*, 1999, 16(5): 333—351.
- [43] Zhou J L. Definition, discipline and prevention of Chinese city illness. *China Urban Economy*, 2004, 2: 30—33.

参考文献:

- [1] 段小梅. 城市规模与“城市病”——对我国城市发展方针的反思. *中国人口·资源与环境*, 2001, 11(4): 133~135.
- [3] 刘鸿亮. 环境友好型社会先要解决“城市病”. *绿叶*, 2005, 11: 12~13.
- [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] 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. *厦门理工学院学报*, 2006, 14(3): 1~10.
- [8] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, 21(12): 2106~2116.
- [9] 曾晓舵, 丁常荣, 郑习健. 生态系统健康评价及其问题. *生态环境*, 2004, 13(2): 287~289.
- [10] 胡春雷, 肖玲. 汕头市经济发展病的定量分析与诊治. *热带地理*, 2003, 23(2): 144~148.
- [14] 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.
- [18] 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*, 2005, 25(2): 269~274.
- [20] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 486~490.
- [22] 周一星. *城市地理学*. 北京: 商务印书馆, 1995. 274~275.
- [24] 官冬杰, 苏维词. 2006. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究. *环境科学学报*, 26(10): 1716~1722.
- [27] 谢花林, 刘黎明. 北京海淀区人居环境可持续发展研究. *规划师*, 2004, 20(3): 73~75.
- [28] 余丹林, 毛汉英, 高群. 状态空间衡量区域承载状况初探. *地理研究*, 2003, 22(2): 201~210.
- [29] 李成阳. 关于城市现代化指标体系的几点问题. *城市现代化指标体系探讨*. 北京: 红旗出版社, 2001. 12~13.
- [30] 谢花林, 李波. 城市生态安全评价指标体系与评价方法研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(5): 705~710.
- [31] 桑燕鸿, 陈新庚, 吴仁海, 等. 城市生态系统健康综合评价. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1280~1285.
- [32] 陈彦光, 罗静. 城市化水平与城市化速度的关系探讨. *地理研究*, 2006, 25(6): 1063~1072.
- [33] 杨志峰. *城市生态可持续发展规划*. 北京: 科学出版社, 2004. 23~24.
- [34] 黄首春. 武汉市现代化指标体系研究. *城市现代化指标体系探讨*. 北京: 红旗出版社, 2001. 110~111.
- [36] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885~1892.
- [37] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价. *地理研究*, 2006, 25(5): 930~938.
- [38] 高吉喜, 段飞舟, 香宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用. *地理研究*, 2006, 25(5): 836~842.
- [39] 董旭, 魏振军. 一种加权欧氏距离聚类方法. *信息工程大学学报*, 2005, 6(1): 23~25.
- [41] 胡廷兰, 何孟常, 杨志峰. 城市生态支持系统瓶颈分析方法及应用研究. *生态学报*, 2004, 24(7): 1493~1499.
- [43] 周家来. “城市病”的界定、规律与防治. *中国城市经济*, 2004, 2: 30~33.