

城市生态安全及其动态评价方法

施晓清, 赵景柱, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心, 系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘要: 城市生态安全是人类生存和发展的一个重大课题。当前, 城市生态安全正严重威胁着城市的可持续发展。全面了解城市生态安全状况是维护城市可持续发展的基础。而城市生态安全的研究仍处于起步阶段, 在吸取现有的国内外相关研究成果的基础上, 探讨了城市生态安全的内涵和动态特征, 分析了城市生态安全问题, 对城市生态安全的评价方法进行了研究, 提出了城市生态安全状态评价的指标体系和评价模型, 趋势分析模型, 以及基于状态评价与趋势分析的城市生态安全动态评价方法。

关键词: 城市生态; 生态安全; 动态评价

文章编号: 1000-0933(2005)12-3237-07 中图分类号: X171.1 文献标识码: A

Urban eco-security and its dynamic assessment method

SHI Xiaqing, ZHAO Jingzhu, OUYANG Zhiyun (Key Lab of Systems Ecology, Research Center for Eco-environment Sciences, CAS, Beijing, 100085, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3237~3243

Abstract Eco-security is a challenging issue to human survival and development. Cities are a concentration of human activities for efficiency and interaction. Traditionally, urban development places human beings at the center and is driven by human interests, so following urbanization, natural ecosystem is facing great stress, and the carrying capacity for cities is over loaded. As a result, serious urban eco-security problems rise up. Resource shortage blocks urban further development, and ecological refugees as well as environmental health problems influence human survival. Urban eco-security is menacing urban sustainable development. There is an urgent need for appreciating urban eco-security, and urban eco-security assessment is among the most important problems. Through the assessment, decision makers can get more information of the status of urban eco-security so that they can make sound strategies to resolve the problems. People can get timely information and then take decisive actions to protect themselves. However, existing methods are too limited in their ability to meet the objective. This paper focuses on urban eco-security assessment and proposes the basic concept of urban eco-security, which is a kind of status and trend of urban development whose eco-environment conditions can meet the needs of urban development and human living sufficiently. It identifies the factors of urban eco-security including resource shortage, environment pollution and ecological disaster, analyzes the dynamic characteristics of urban eco-security, and points out that there are different eco-security level in different temporal and spatial scales. Based on the factors, characteristics of urban eco-security, and the analytic hierarchy process (AHP) model, the paper discusses the assessment principles for urban eco-security; establishes the indicator system which includes 23 indicators involving in resource and eco-environment; poses a dynamic assessment method based on status assessment and trend analysis including fuzzy synthesis status assessment model, assessment grades and trend analysis model. A case study on a city shows that the dynamic assessment gives more objective information to decision makers than traditional assessment. This research develops a vehicle to promote urban eco-security study, provides a way to establish a practical assessment method, and facilitates to achieve urban sustainability.

Key words: urban ecosystem; eco-security; dynamic assessment

基金项目: 中国科学院重点方向性研究资助项目(KZCX3-SW-424); 国家自然科学基金资助项目(70373066)

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2005-10-232

作者简介: 施晓清(1966~), 女, 上海人, 博士, 主要从事生态系统可持续管理研究。E-mail: shixq@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: Key Project of KIP, CAS(No. KZCX3-SW-424), National Natural Science Foundation of China(No. 70373066)

Received date: 2005-04-22; Accepted date: 2005-10-22

Biography: SHI Xiaqing, Ph.D., mainly engaged in ecosystem sustainable management. E-mail: shixq@mail.rcees.ac.cn

安全是生物体有序存在的基础,其最基本的涵义是指主体的一种不受威胁、没有危险的存在状态,也是人类生存的前提条件^[1]。随着社会生产力的提高和科学技术的进步,人类从适应自然的生存方式逐步转变为征服和改造自然的生存方式,在这种转变过程中人类社会创造了前所未有的巨大物质财富和舒适的生活条件。但是由于忽略了自然生态系统所提供的资源和环境容量等生态系统服务功能的有限性,忽视了人与自然的和谐发展,致使人类也不得不面临日益严重的由环境污染和生态破坏所带来的生存危机。英国《观察家报》报道指出,全球变暖曾在 3a 中造成 10 万人死亡,并可能导致大规模移民、疾病、贫穷甚至战争。正如曲格平先生所述,生态环境问题已逐渐上升到生态安全问题,成为国际社会日益关注的一个重要的热点问题^[2]。

城市化是人类社会经济和文化发展的产物,是社会发展的趋势和文明的标志。有资料表明,2000 年发达国家的城市化率达到 75%,明显高于发展中国家的 30% 以下。中国近几年随着经济的发展,城市化发展迅速,2003 年城市化水平已达到 40.53%。预计 2025 年世界城市化率将达到 62.5%,中国将达到 60% 左右^[3]。城市化进程使人类逐步从自然生态系统分离出来形成以人为中心的城市生态系统。城市生态系统的形成使人类从适应自然规律的生存理念转向改造自然的生存理念。由于自然生态系统的强大的生态服务功能的支持,在相当长的时期里,人类城市化进程为人类提供了丰富的物质和舒适便利的生活条件^[4,5]。但是,城市化进程对自然生态系统的胁迫随着粗放型经济的发展而日趋严重。森林毁坏,耕地占用,环境污染等使自然生态系统遭到了严重的破坏,逐渐弱化了生态系统的服务功能,人类生存受到严重的威胁。城市化加剧了人类活动对生态环境的胁迫而导致严重的人类生存危机,促使人们开始关注城市生态安全问题。

1 城市生态安全的内涵

1.1 城市生态安全的定义

城市生态安全是生态安全的一个重要方面。生态安全是国家安全的一种,传统国家安全的概念一般认为是一系列的条件,这些条件是用来保证国家有能力去保护其版图范围内的公民社团以及国家利益免遭任何破坏和威胁,而传统上的威胁主要来自于战争,因此预防战争是传统国家安全的主要内容^[6,7]。而当今在威胁国家安全的因素中生态环境问题是一个突出的方面,环境污染,生态难民,资源战争,环境健康等问题严重威胁着国家的利益,各国在外交、政府政策和经济发展中也越来越重视生态环境问题。因此,生态安全已成为国家安全中的一个重要的内容。

1989 年国际应用系统分析研究所提出了广义和狭义两种生态安全的概念,广义的概念:生态安全是指在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会次序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,包括自然生态安全,经济生态安全和社会生态安全,组成一个复合人工生态安全系统。狭义的生态安全是指自然和半自然生态系统的安全,即生态系统完整性和健康的整体水平的反映^[8]。

我国《生态环境保护纲要》中指出国家生态安全是指国家经济和社会发展,以及人民生活所需的生态环境少遭或免遭破坏和威胁的状态。曲格平先生从两个方面解释生态安全:一是防止生态环境的退化对经济基础构成威胁,主要指环境质量状况和自然资源的减少、退化,削弱了经济可持续发展的支撑能力;二是防止环境问题引发公众的不满,特别是导致环境难民的大量产生,影响社会稳定。学者郭中伟从生态系统的角度定义生态安全,认为生态安全是指一个生态系统的结构是否受到破坏,其生态功能是否受到损害^[9,10]。

借鉴国内外研究者对生态安全的定义,本文认为生态安全主要包括两层含义,一是指自然生态系统的自身的结构和功能处于正常的状态,二是指自然生态系统的服务功能对人类活动的满意支持程度。它包括了环境安全,生物安全和生态系统安全。由此,给出如下定义:生态安全是指支持人类社会和经济发展,以及人类生活的自然生态环境条件处于人类期望值之内的一种生态系统状况。城市生态安全是指维护城市发展所需的生态环境能满足城市当前和未来发展需要的一种城市发展状况。

1.2 城市生态安全的动态特性

城市生态系统是一个不断发展的复合系统。城市的规模随时间的推移呈不断扩大的趋势。城市的结构从低层次到高层次发展^[11]。城市发展的驱动力是社会经济的发展,社会经济的发展对自然资源以及对生态容量的过度占用,是城市生态安全问题产生的根源。不同的发展阶段具有不同的社会经济发展水平,也会导致不同程度的自然生态系统的胁迫。随着时间的推移,人类社会的发展从粗放型经济发展到集约型经济,再到循环生态型经济。粗放型的社会经济发展模式其城市的生态安全性较低,而循环经济的发展模式给城市带来较高的生态安全性。另外,从空间尺度上分析,不同的空间尺度有不同的自然条件,不同的自然条件又决定着不同的城市生态安全水平。因此,从时空尺度上分析,城市生态安全具有动态特征。

2 城市生态安全问题

城市生态系统的发展需要自然生态系统的强大的服务功能的支持。然而城市化进程对生态环境造成了严重的胁迫,使自然生态系统遭到前所未有的破坏,导致了城市生态安全问题的产生。支持城市发展的生态环境条件主要包括资源和环境两个方面。因此,城市生态安全问题主要表现为环境污染、资源供给短缺、自然灾害等带来的不安全性^[12,13]。

城市的发展无论是工农业,还是城市建筑和交通的建设等都需要利用各种自然资源。资源是城市发展的物质基础^[14,15]。人

类在利用资源的过程中也造成了对资源供应的压力。一方面由于利用使不可更新资源的储量减少,或是利用过度破坏了可更新资源的更新能力而造成了可更新资源的短缺。另一方面,由于环境污染造成对资源的破坏。我国能源年消费量已从 1996 年的 13.9 亿 t 标准煤上升到 2002 年的 14.8 亿 t 标准煤,平均每年递增约 0.13 亿 t 标准煤。铁矿石资源的保有储量已从 1995 年的 478.94 亿 t 下降到 213.6 亿 t,平均每年递减约 33.2 亿 t。资源短缺威胁着城市的进一步发展。

目前,水污染、大气污染、土壤污染等环境污染阻碍了城市的持续发展^[16,17]。一方面人类的健康受到严重威胁,如大气中的污染物:二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等在浓度达到一定的量时都会对人体健康造成危害。当人体吸入高浓度二氧化硫时,可引起急性支气管炎、肺水肿,其症状为咳嗽、胸闷、胸痛、呼吸困难,极高浓度时可因水肿引起窒息死亡。另一方面,由于污染导致自然生态系统的服务功能丧失,使人类失去生存发展的基础。如,水体污染使人类失去清洁水源而无法生存。水环境污染导致的健康问题也是非常严重的。1950 年发生在日本水俣湾的汞中毒事件就是一个突出的例子。据联合国环境规划署统计,目前世界仍有大量的人口由于得不到安全饮用水而染上各种传染性疾病,仅痢疾每年造成 100~200 万人死亡;发展中国家大约 10% 的人口受到肠道蠕虫的感染等。环境污染严重威胁着人类的健康。土壤污染,将使人类失去健康的食物来源而面临生存危机。因此,环境污染是一个重要的城市生态安全问题。此外,人类活动也诱发了许多的生态灾难,水土流失及沙尘暴等也威胁着人类的生存。

3 城市生态安全评价的原则

了解城市生态安全的状况对维护城市的持续发展十分必要,它是正确决策的基础,而客观的评价需要科学的评价原则作为指导。城市生态安全评价需要遵循以下原则^[18]:

(1) 科学性原则

在评价时,指标体系一定要建立在科学的基础上,能客观和真实地反映系统发展的状态,各个子系统和指标间的相互联系,并能较好地度量研究目标的实现程度。

(2) 整体性原则

由于系统是一个有机的整体,评价指标应是能真实反映系统的综合体。在选择评价指标的时候,必须使评价目标和评价指标有机地联系起来,组成一个层次分明的整体。这样才能保证评价结果的真实可靠。

(3) 层次性原则

城市生态安全是受多因素影响的复杂系统。为了完整地描述系统的整体,需要将系统分解成相互关联的几个层次,指标通常也根据这个层次结构而设定,层次越高指标越综合,层次越低指标越具体。

(4) 可操作性原则

评价指标的选取要考虑所选指标的可度量性,可比性,易得性和常用性等。这样所选的指标才是有效的。才能得出真实客观的评价结果。评价方法也要易于使用,更好地为决策服务。

(5) 动态性原则

由于系统是时间和空间的函数,在选择评价方法时既要考虑到系统的发展状态又要考虑系统发展的趋势,评价结果不仅能较好描述、刻画与度量系统的发展状态,而且也能反映出不同发展阶段的特点,灵活地反映系统的变化。

4 城市生态安全评价的指标体系

城市生态系统有三大功能,生产功能,生活和消费功能及还原功能。这些功能的正常运行需要以一定的自然生态环境条件为保障。如果失去这些条件城市的发展就失去了基础,导致城市生态安全危机的发生。支持城市发展的自然条件主要包括资源和生态环境。自然资源为生产和生活提供了物质保障,生态环境为生产、生活和还原提供了空间适宜条件。资源安全主要包括水安全、土地资源安全和生产资料安全。生态环境安全主要包括自然生态环境和人工环境。运用层次分析方法,得到下列城市生态安全指标体系:

(1) 目标层

以城市生态安全综合指标作为总目标层,综合表征城市生态安全的总态势。

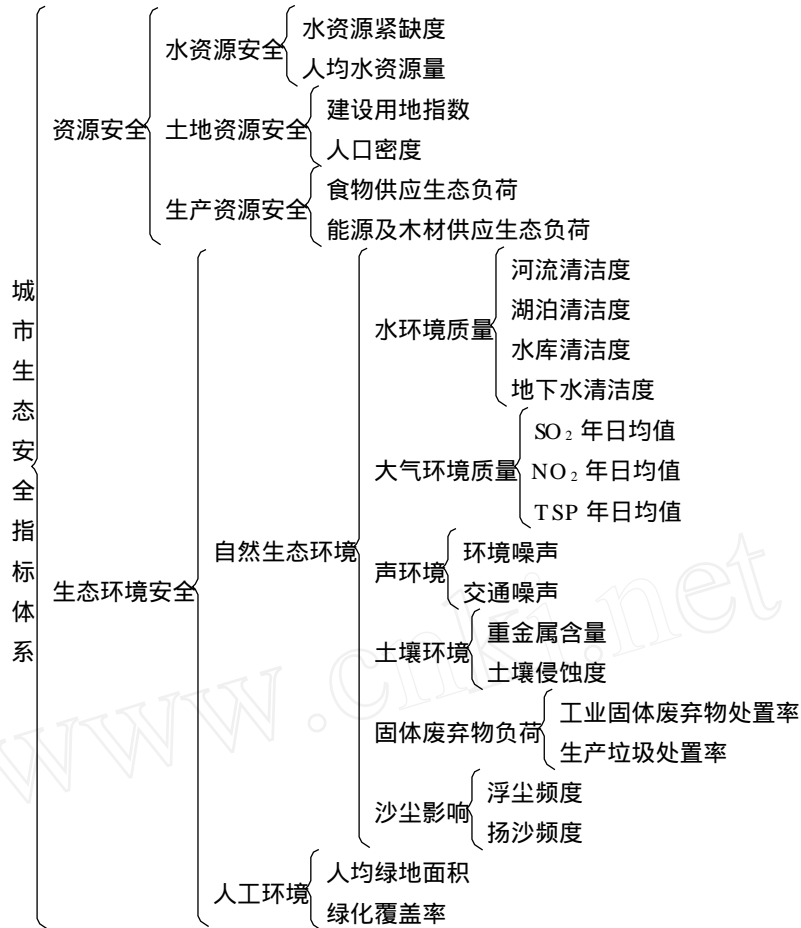
(2) 准则层

以制约和影响城市生态安全的主要因素组成,分为准则层 1 和准则层 2,准则层 1 包含资源安全和生态环境安全,准则层 2 是准则层 1 的因素说明,包含资源安全中的水资源安全、土地资源安全、生产资源安全,生态环境安全中的自然生态环境和人工环境。

(3) 指标层

指标层是指标体系中最基本的层面,由可以直接度量的指标构成,根据准则层中因素的特征和含义来确定。

城市生态安全指标体系的层次结构如下:



5 城市生态安全评价方法

5.1 状态评价模型

由于安全是一个相对的概念, 在安全与不安全之间存在着模糊的界限, 而且城市生态安全受许多因素的影响, 因此, 本文选取模糊综合评价法作为城市生态安全状态评价的模型。设评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是有限集, 评判因素集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 单因素 u_i 的评判结果是 V 上的 Fuzzy 集, 对确定的 u_i , 可用 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij})$ 表示, 其中 r_{ij} 表示对于第 i 个因素 u_i 获得第 j 个评语的隶属度。当每个因素都被评定之后, 就可获得矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, 称评判矩阵, 它是 U 到 V 的 Fuzzy 关系。由于各因素对整个系统的影响不相等, 所以, 需要对各因素加权。用 U 上的 F 集 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 表示各因素的权系数分配(用层次分析法获得), 它与评判矩阵 R 的合成, 就是对各因素的综合评判, $Y = W \circ R = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 其中:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m) \quad w_i = 1, w_i = 0$$

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad r_{ij} \in [0, 1]$$

$$y_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

这个模型采用实数的加乘运算, 比用“ \circ ”运算精细。在城市生态安全的评价中, 评语集 V 选 5 级(优, 良, 中, 差, 极差), 其中, 中级以上(包括中级)设为安全级别。评判因素集为指标集。

5.2 趋势分析

城市生态系统是一个不断发展的动态复杂大系统, 其生态安全具有动态性的特征。因此, 只有在一个时间段内评估其生态安全才有意义。如图 1 所示, 点 A 处于一个不断恶化的趋势之中, 而点 B 处于一个改善的趋势中。C 点所处的趋势是保持现状, D 点处于拐点, 仅从状态分析, 不能正确比较系统某时段的安全性。

从理论上分析, 客观地评价城市发展的某一时间点的生态安全, 必须给定一个时间尺度 Δt 。在 Δt 内生态安全评价价值变化的斜率 $K(\Delta t)$ 是一个重要的参考值。 $K(\Delta t)$ 反映了在给定的时间段内生态安全程度的变化。 $K(\Delta t) > 0$ 表明生态安全向好的方向发展, $K(\Delta t) < 0$ 表明生态安全向不好的方向发展。当然系统的发展是波动的, 如果考察某一时间段的趋势, 可运用数学方法拟合出渐进线来判断其趋势。根据系统发展的一般规律, 这里有 3 种基本趋势: 图 2, 图 3, 图 4 分别表示了下降, 上升趋势和相

对稳定的发展趋势。

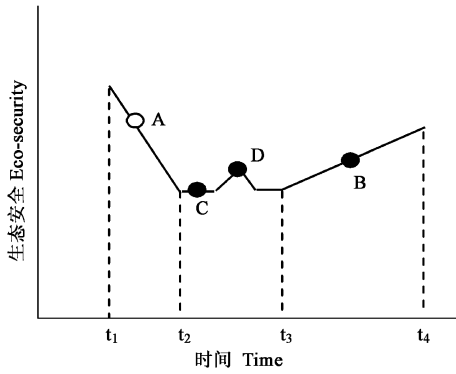


图 1 城市生态安全的变化

Fig. 1 Urban eco-security in different time

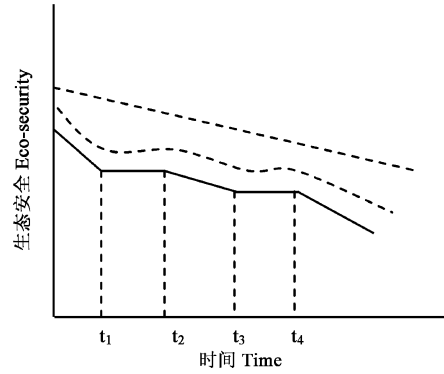


图 2 下降趋势

Fig. 2 Down trend of urban eco-security

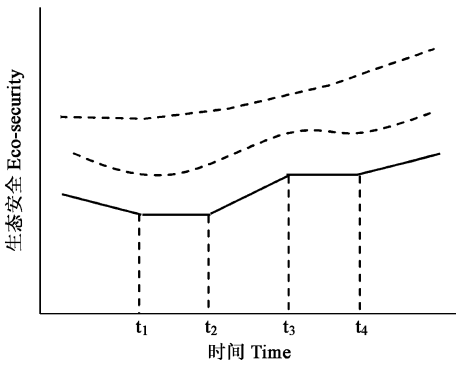


图 3 上升趋势

Fig. 3 Up trend

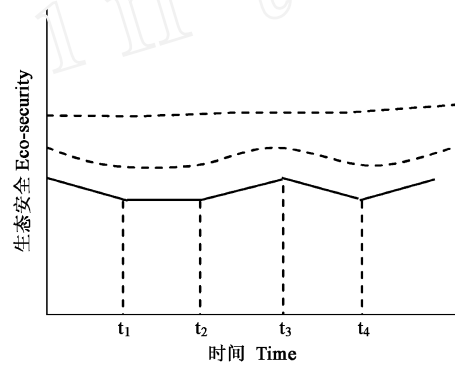


图 4 相对稳定趋势

Fig. 4 Relative stable trend

5.3 动态评价

系统的评价必须建立在系统的特征基础上^[19,20]。根据以上分析,城市生态安全不仅体现在某个时间段的状态上,还与系统的发展方向密切相关,只有对系统状态和系统发展趋势进行综合分析,才能对系统作出客观正确的评价。因此,本文提出一个集状态评价和趋势分析为一体的城市生态安全评价方法。

设 $A(t)$ 为城市生态安全系统的状态变量, $K(\Delta t)$ 为城市的生态安全系统的趋势变量,城市生态安全可用二元组 $(A(t), K(\Delta t))$ 来评价。其中,状态评价和趋势分析见 5.1 和 5.2 部分所述。评价结果有如下几种情况:

- (1) 状态处于安全级别,且趋势又是向良好的安全级别方向发展的系统,系统判定为安全系统;
- (2) 状态处于安全级别,但趋势是向不安全的级别方向发展,如果状态是中级以上,系统判定为不稳定的安全系统;如果是中级,系统判定为不安全系统;
- (3) 状态处于不安全级别,但趋势是向安全的级别方向发展,系统判定为可改善的不安全系统;
- (4) 状态处于不安全级别,趋势也是向不安全的级别方向发展,系统判定为恶化的不安全系统。

5.4 实例分析

本文以北京市为例,论文分析了 1996~2002 年北京市的生态安全的状况。根据前述的评价方法,得到北京市 1996~2002 年的模糊综合评价结果(见表 1)。根据各年的综合安全值得到 1996 年至 2002 年北京市的生态安全的趋势(见图 5)。

根据计算得出北京市自 1996 年至 2002 年的生态安全的状况,如表 2 所示,比较状态评价与动态评价的结果,表明状态评价不能全面反映城市生态安全的状况,需将状态评价与趋势分析相结合才能得出科学的评价结果。如根据 1996 年状态评价的结果,北京市的生态安全状况应为安全(中级),但考虑到其下降的趋势,最后的动态评价结果为不安全。因此,动态评价更客观地反映城市生态安全的状况,为决策提供了科学的依据,可根据动态评价的结果及时果断地调整城市发展策略,改善城市生态

安全的状况。

表 1 北京市生态安全综合模糊评判结果

Table 1 Syntheses fuzzy assessment for Beijing's eco-security

年份 Year	优 Excellence	良 Good	中 Middle	差 Bad	极差 Very Bad	优先级别 Result
1996	0.2446	0.1278	0.2816	0.2071	0.1391	中
1997	0.1612	0.0665	0.3093	0.3371	0.1260	差
1998	0.2446	0.0684	0.3342	0.2352	0.1176	中
1999	0.1612	0.1319	0.2354	0.2706	0.2010	差
2000	0.1529	0.1036	0.2941	0.2583	0.1912	中
2001	0.1746	0.0870	0.2517	0.3073	0.1794	差
2002	0.1636	0.0620	0.2221	0.3068	0.2456	差

表 2 北京市生态安全评价结果

Table 2 Dynamic assessment result for Beijing's eco-security

年份 Year	状态级别 Status	趋势 Trend	动态评判结果 Dynamic Result
1996	中	向低安全级别方向发展	不安全系统
1997	差	向低安全级别方向发展	恶化的不安全系统
1998	中	向低安全级别方向发展	不安全系统
1999	差	向低安全级别方向发展	恶化的不安全系统
2000	中	向低安全级别方向发展	不安全系统
2001	差	向低安全级别方向发展	恶化的不安全系统
2002	差	向低安全级别方向发展	恶化的不安全系统

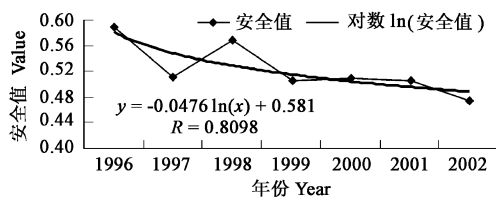


图 5 趋势分析

Fig 5 Trend analysis

Down trend; Insecurity; Very insecurity

6 结论

城市生态安全评价是解决城市生态安全问题的关键也是城市生态安全研究中的一个难点。本文阐述了城市生态安全的内涵,探讨了城市生态安全的动态特征,系统地分析了城市生态安全的主要问题,指出资源短缺和生态环境破坏是造成城市生态安全问题的根源。在此基础上,运用层次分析法建立了城市生态安全的评价指标体系。鉴于城市生态安全的动态特性,本文提出了基于状态评价和趋势分析的城市生态安全动态评价方法,包括状态评价模型,趋势分析模型和动态评价方法。根据北京市的生态安全实例分析得出,论文提出的评价方法弥补了传统静态评价方法的不足,评价结果能较为全面客观地反映城市生态安全的状况。

由于指标体系的选取受所选模型和指标量化程度等条件的限制,城市生态安全的指标体系需要在今后的实践中不断加以完善。

References

[1] Pirages D C and Degeest T M. *Ecological Security: An Evolutionary Perspective on Globalization*. New York: Bowman & Littlefield Publishers, 2004

[2] Qu G P. Focus on eco-security: Eco-security is becoming a hot topic on nation security. *Environment Protection*, 2002, (5): 3~ 5

[3] Wang F. *Urbanization in China and sustainable development* Beijing: Science Press, 2000

[4] Daily G. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* Washington D. C. : Island Press, 1997.

[5] Ellen R. *Environment, subsistence and system*. New York: Cambridge University Press, 1982

[6] Soffer A. Environmental quality and nation security. *Water Science and Technology*, 2000, **42**(1): 361~ 366

[7] Eckersley R. Ecological Security Dilemmas File: //E: \Eco-Security\ Ecological Security Dilemmas .htm.

[8] Xiao D N, Chen W B. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chin. J. App. Ecol.*, 2002, **13**(3): 354~ 358

[9] Zhou C X, Shen W S. Advances in ecological security. *Rural Eco-Environment*, 2003, **19**(1): 56~ 59

[10] Yang J P, Lu J B, ed *Analysis on eco-security*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002

[11] Wang R S, Zhou Q X, Hu D. *Ecological control and management method for urban development* Beijing: China Meteorological Press, 2000

[12] Steven A E. Toward a recycling society: ecological sanitation-closing the loop to food security, *Water Science & Technology*, 2001, **43**(4): 177~ 187.

- [13] Suzuki Y, Ueta K and Mori S, Eds *Global Environmental Security*. Springer Berlin Heidelberg New York Barcelona Budapest Hong Kong London Milan Paris Santa Clara Singapore Tokyo, 2002
- [14] Peng S. Global Change and Sustainability Development. *Ecological Science*, 1997, **16**(3): 5~ 9.
- [15] Bertollo P. Assessing Landscape Health: A Case Study from Northeastern Italy. *Environmental Management*, 2001, **27**(3): 349~ 365.
- [16] Schreurs M A and Pirages D. *Ecological security in northeast Asia*. Seoul: Yonsei University Press, 1998
- [17] Bnheur N and Lane B L. Natural resources management for human security in Cambodia's Tonle Sap Biosphere Reserve. *Environmental Science & Policy*, 2002, **5**(1): 33~ 41.
- [18] Wu K Y. Research on the assessment of regional eco-security. *A dissertation of university of science and technology of China*, 2003
- [19] Kullenberg G. Regional co-development and security: a comprehensive approach. *Ocean & Coastal Management*, 2002, **45**(11-12): 761~ 776
- [20] Luijten J C, Knapp E B and Jones J W. A tool for community-based assessment of the implications of development on water security in hillside. *Agricultural Systems*, 2001, **70**(2-3): 603~ 622

参考文献:

- [2] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态安全问题已成为国家安全的热门话题. *环境保护*, 2002, (5): 3~ 5
- [3] 王放. *中国城市化与可持续发展*. 北京: 科学出版社, 2000
- [8] 肖笃宁, 陈文波, 等. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, 2002, **13**(3): 354~ 358.
- [9] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展. *农村生态环境*, 2003, **19**(1): 56~ 59.
- [10] 杨京平, 卢剑波编. *生态安全的系统分析*. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [11] 王如松, 周启星, 胡聃. *城市生态调控方法*. 北京: 气象出版社, 2000
- [18] 吴开亚. *区域生态安全的综合评价研究*. 中国科学技术大学博士论文, 2003