

# 城市自然生态安全动态评价方法及其应用

赵 清, 杨志峰\*, 陈 彬

(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:**城市自然系统是城市社会经济发展的重要载体。城市自然生态安全评价最重要目的在于对未来可能出现的不安全状态预测和预警, 以实现对城市生命支持系统——自然系统的可持续生态安全管理。针对目前城市生态安全评价方法实用性与可操作性差的缺点, 基于城市自然生态安全因果互动关系, 建立城市自然生态安全发展度动态评价方法, 实现了对未来城市自然生态不安全状态的预警以及关键影响要素的识别。以厦门为例的评价结果表明, 2007 ~ 2020 年厦门自然生态不安全发展度将处于持续恶化蓝灯(轻度)预警的变化态势, 其主导因素将是快速发展的对生态安全负反馈的来自社会经济系统的外部驱动; 各子系统生态不安全程度排序为: 大气系统 > 水系统 > 土地系统 > 生物系统。大气系统和水系统各项调控措施的发展度需予以提高。

**关键词:**城市; 自然生态安全; 动态评价; 厦门市

文章编号: 1000-0933(2009)08-4138-09 中图分类号: X32 文献标识码: A

## A dynamic evaluation method for urban natural ecological security and its application

ZHAO Qing, YANG Zhi-Feng\*, CHEN Bin

School of Environment, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China  
*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4138 ~ 4146.

**Abstract:** In view of urban natural system as an important carrier of urban socio-economic development, the most important aim of urban natural ecological security (UNES) assessment is to forecast and predict the potential ecological insecurity, thereby contributing to sustainable ecological security management of the life support system. Regarding the shortage of operability and utility of the current method, a dynamic method of UNES developmental degree assessment was set up in this paper based on the identification of its critical factors and warning of the potential ecological insecurity. Xiamen city was taken as a case to develop a suit of UNES indicator system based on its natural environment characteristics. The results showed that the development degree of Xiamen natural ecological insecurity (NEI) will in blue (mild) warning status and sustainable enlarged trend during 2007 — 2020. The critical factor will be the external driving force of socio-economic system with continuously increased negative feedback. The degree of ecological insecurity can be ranked as: atmosphere subsystem > water subsystem > land subsystem > biology subsystem. It is necessary to speed up the development degree of regulation measures of these subsystems.

**Key Words:** urban; natural ecological security; dynamic evaluation; Xiamen City

随着全球性环境与生态问题的恶化, 生态安全研究已成为国内外研究的热点<sup>[1-3]</sup>。城市作为地区政治经济和文化生活中心, 其生态安全问题日益受到关注。作为生命支持系统的自然系统的生态安全是城市生态安全的核心, 也是城市可持续发展的基础。目前城市生态安全评价方法研究大多基于城市复合生态系统或城市

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目(973)(2005CB724204); 国家自然科学基金资助项目(40871056)

收稿日期: 2008-05-13; 修订日期: 2009-02-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn.

自然子系统及其某一要素开展。国外在城市生态安全评价领域的相关研究大多针对城市环境污染和毒理的单要素或多要素关键因子对人体健康危害的风险评价<sup>[4,5]</sup>,国内也有学者开展此类相关研究<sup>[6]</sup>;而系统评价城市生态安全的研究有限。国内城市生态安全评价主要分为两类,一类是学者们将土地利用/覆盖变化(LUCC)作为区域土地资源生态安全状态改变的最主要驱动因素,借助 3S 技术开展城市景观生态安全评价或格局分析<sup>[7,8]</sup>,但目前在 LUCC 生态影响方面的模型研究仍不够深入<sup>[9]</sup>,且土地利用/覆盖只是影响城市生态安全的一部分,作为一个生态系统,城市生态安全还待从更全面的角度来展开评价和预测;另一类研究以城市自然-社会-经济复合生态系统理论为基础,主要基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)概念模型<sup>[10]</sup>,通过各种线性与非线性方法开展了城市<sup>[11~16]</sup>及其子系统(如水系统)<sup>[17,18]</sup>生态安全现状评价研究。也有学者尝试通过趋势分析开展城市生态安全预测与动态评价<sup>[19~21]</sup>。但已有这些研究忽视了自然生命支持系统作为城市生态安全重要载体,基于 PSR 概念模型建立的评价指标体系在实际评价中忽略了自然系统与社会经济系统各要素间的因果互动关系;由于安全是一相对概念,而大多研究从正向角度关注城市生态安全问题,往往难以有一统一客观评判标准;建立的指标体系大多强调其普适性,并未结合具体城市生态安全特征展开;而最为重要的并未实现对城市生态安全真正的动态预测。生态安全研究的最终目的应是对可能出现的不安全状态实现动态预警,以此为生态安全可持续性管理服务。

针对上述问题,本文以自然系统作为城市生态安全的研究主体,以其为核心建立基于它与城市社会经济系统之间因果互动关系的 S-PRD 评价概念模型和针对案例城市(厦门)生态安全特征的评价指标体系,通过灰色 GM(1,1)残差模型和坎蒂雷加权构造指数,实现了对城市自然生态安全系统的预测,并通过建立城市自然生态安全发展度评价模型及信号灯预警区间,最终实现了其不安全状态的动态预警,从而为可持续性管理提供了有效的技术支持。

## 1 城市自然生态安全评价概念模型与指标体系

### 1.1 城市自然生态安全评价概念模型

城市自然系统的生态安全是社会经济系统生态安全的基础。如果将城市生态安全作为研究对象,很难对一个作为整体的对象开展其因果关系的辨识。因此本文将城市自然生态安全抽离出来作为研究的关注焦点,鉴于安全标准对于不同对象的相对性以及目前已经普遍出现的城市自然生态不安全现象,从逆向角度关注其生态不安全状态,并将城市社会经济系统作为其外部影响要素,辨析两者之间的因果互动关系,以此建立城市自然生态安全 S-PRD (state pressure regulation external driving force; 状态-压力-调控-外部驱动)概念模型。鉴于城市自然系统中水、大气、土壤、生物四大圈层是城市社会经济发展的载体,能基本反映城市自然生态安全遭受威胁的主要方面,也可集中反映自然系统内部发生的各种资源、环境和生态等方面的问题,即将所有的生态安全问题以四圈层为主线展开,从某种程度上回避了目前存在的环境安全、生态安全、资源安全的差异和分歧<sup>[22]</sup>。因此本研究将水系统、大气系统、土地系统和生物系统作为城市自然生态安全研究的四大体系

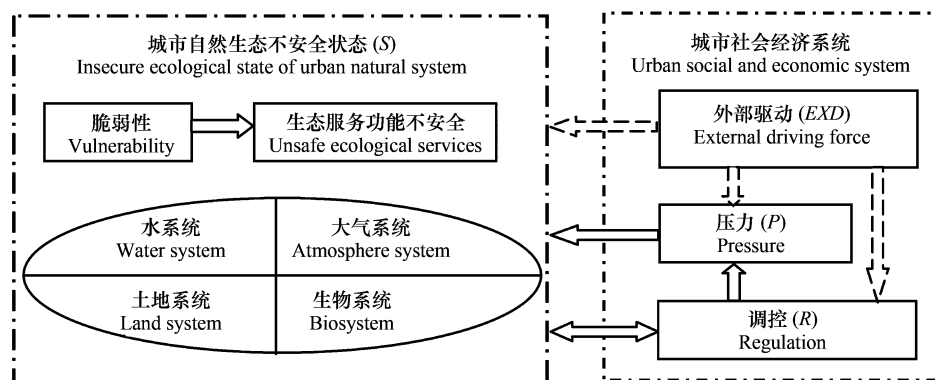


图1 城市自然生态安全评价概念模型

Fig. 1 Assessment concept model of urban natural ecological security

(图 1), 并提出本文对城市自然生态安全(urban natural ecological security, UNES)的定义: 城市自然生态安全是指在外界因素压力胁迫、驱动和相应调控综合作用下, 城市自然系统抵御风险, 维持自身安全及其对人类生态服务功能安全的发展状态, 具有相对性和动态性特征。

## 1.2 城市自然生态安全评价指标体系

本文研究的目的在于通过对城市生态安全的核心——城市自然系统的生态不安全进行预测和预警, 从而为生态安全管理提供可操作的要素, 因此所建立的指标体系信息最好是完备的, 以保证其评价结果为生态安全管理提供充足依据。本文基于 UNES 评价概念模型, 以厦门为例, 通过定性辨析厦门城市自然生态环境特征<sup>[23]</sup>, 并根据指标的独立性、数据可获得性和时间连续性原则(本文主要针对厦门 UNES 指标 1996~2005 年统计数据<sup>①</sup>展开研究), 为保证指标信息完备性, 在统计数据可获得性保证前提下尽量选取涵盖城市自然各子系统生态安全相关信息的指标, 从而建立厦门 UNES 初级评价指标体系。在此基础上, 利用 SPSS13.0 的 Pearson 相关性分析工具剔除其中部分信息重叠的指标, 最终建立的指标分为两大类: 一类是指征城市自然生态不安全状态的结果指标; 另一类是导致自然生态不安全状态产生的原因指标, 包括社会经济系统压力指标、调控指标和外部驱动指标。其中水系统和大气系统指标主要参照厦门水环境功能分区和大气环境功能分区进行筛选。根据由于每一环境功能分区具备相应须执行的环境质量标准, 因而较好的解决了目前生态安全评价中难以确定客观统一评判标准的问题。土地系统和生物系统的分区数据较难获取, 因而其指标立足于整个城市进行筛选。

### 1.2.1 城市自然子系统生态安全分要素

#### (1) 水系统

①水生态不安全状态  $S_1$  (城市主要地表水体及海域水质超标所表现的水系统脆弱性和生态服务不安全性)  $s_1$  北溪引水源头粪大肠菌群超标率(%)、 $s_2$  板头水库粪大肠菌群超标率(%)、 $s_3$  湖边水库  $BOD_5$ 、 $s_6$  湖边水库石油类超标率(%)、 $s_7$  九龙江河口石油类超标率(%)、 $s_8$  杏林湾水库  $BOD_5$  超标率(%)、 $s_9$  杏林湾水库高锰酸盐指数超标率(%)、 $s_{10}$  杏林湾水库总氮超标率(%)、 $s_{11}$  杏林湾水库总磷超标率(%)、 $s_{12}$  东部海域无机氮超标率(%)、 $s_{14}$  粪大肠菌群超标率(%)、 $s_{16}$  西南海域无机氮超标率(%)、 $s_{17}$  西南海域活性磷超标率(%)、 $s_{18}$  西南海域粪大肠菌群超标率(%)、 $s_{20}$  同安湾活性磷超标率(%)、 $s_{21}$  粪大肠菌群超标率(%)、 $s_{22}$  马銮湾无机氮超标率(%)、 $s_{24}$  筭筭内湖活性磷超标率(%)、 $s_{25}$  筭筭内湖粪大肠菌群超标率(%)、 $s_{26}$  筭筭内湖石油类超标率(%)、 $s_{27}$  九龙江河口区无机氮超标率(%)、 $s_{28}$  九龙江河口区粪大肠菌群超标率(%)。

②水压力  $P_1$  (水污染与水资源不合理利用)  $p_1$  九龙江无机氮年入海量(t)、 $p_3$  九龙江  $COD_{Mn}$  年入海量(t)、 $p_4$  九龙江石油类年入海量(t)、 $p_5$  九龙江铅年入海量(t)、 $p_6$  工业废水年排放总量(万 t)、 $p_7$  工业  $COD$  年排放量(t)、 $p_8$  工业石油类年排放量(t)、 $p_9$  生活污水排放量(万 t)、 $p_{10}$  船舶年排油量(t)、 $p_{11}$  海水养殖氮年排放量(t)、 $p_{15}$  单位  $GDP$  生产用水量( $t/万元$ )、 $p_{16}$  人均日生活用水量( $t/人 \cdot d$ )。

③水调控  $R_1$  (水污染治理与水资源管理)  $r_1$  工业废水排放达标率(%)、 $r_2$  城市生活污水集中处理率(%)、 $r_3$  废水治理项目投资额(万元)、 $r_4$  工业重复用水率(%)。

#### (2) 大气系统

①大气生态不安全状态  $s_2$  (大气污染物超标所反映的大气系统脆弱性和生态服务不安全性)  $s_{29}$  API 综合指数年平均值、 $s_{30}$  酸雨频率(%)、 $s_{31}$  一类功能区(鼓浪屿)  $PM_{10}$  超标率(%)、 $s_{33}$  一类功能区(鼓浪屿)  $NO_2$  超标率(%)、 $s_{34}$  二类功能区(同安区)  $PM_{10}$  超标率(%)、 $s_{35}$  二类功能区(同安区)  $SO_2$  超标率(%)、 $s_{36}$  二类功能区(同安区)  $NO_2$  超标率(%)。

① 厦门经济特区统计年鉴编辑委员会. 厦门经济特区统计年鉴. 1997~2006 年; 厦门市环境保护局. 厦门市环境功能区划(第二次修订文本), 2004. 9; 厦门市环境保护局. 厦门市环境统计与城考资料汇编. 1996~2006 年; 厦门市环境保护局. 厦门市环境质量报告书(1996~2000 年), 2001. 4; 厦门市环境保护局. 厦门市环境质量报告书(2001~2005 年), 2006. 3; 厦门市环境保护局. 厦门市环境质量公报. 1997~2006 年; 厦门市海洋与渔业局. 厦门市海洋环境质量公报. 2002~2006 年; 福建省水利局. 福建省水利统计公报. 2002~2006 年

②大气压力  $P_2$  (大气污染与能源消耗)  $p_{17}$  工业  $\text{SO}_2$  年排放量(t)、 $p_{18}$  工业  $\text{NO}_x$  年排放量(t)、 $p_{19}$  工业  $\text{PM}_{10}$  年排放量(t)、 $p_{21}$  移动  $\text{NO}_x$  年排放量(t)、 $p_{23}$  生活  $\text{SO}_2$  年排放量(t)、 $p_{24}$  生活  $\text{NO}_x$  年排放量(t)、 $p_{26}$  单位 GDP 能耗(吨标煤/万元)。

③大气调控  $R_2$  (大气污染治理与能源结构调整)  $r_5$  工业  $\text{SO}_2$  排放达标率(%)、 $r_7$  工业粉尘排放达标率(%)、 $r_8$  机动车尾气排放达标率(%)、 $r_9$  烟尘控制区覆盖率(%)、 $r_{10}$  废气治理项目投资额(万元)、 $r_{11}$  城市气化率(%)、 $r_{12}$  清洁能源使用率(%)。

### (3) 土地系统

①土地生态不安全状态  $S_3$  (水土流失导致的脆弱性与土地生产力水平)  $s_{37}$  年降水量(mm)、 $s_{38}$  水土流失面积( $\text{km}^2$ )、 $s_{39}$  耕地未有效灌溉面积比例(%)、 $s_{40}$  耕地旱涝未保收率(%)。

②土地压力  $P_3$  (土壤污染与土地资源负荷)  $p_{27}$  危险废物产生量(t)、 $p_{28}$  农业化肥总施用强度( $\text{kg}/666\text{m}^2$ )、 $p_{29}$  农药总施用强度( $\text{kg}/666\text{m}^2$ )、 $p_{30}$  人口密度(人/ $\text{km}^2$ )、 $p_{31}$  非农建设占用耕地率(%)。

③土地调控  $R_3$  (土地污染治理与耕地保护)  $r_{13}$  工业固体废物处置利用率(%)、 $r_{14}$  医疗危险废物处置率(%)、 $r_{15}$  生活垃圾无害化处理率(%)、 $r_{16}$  固体废物治理项目投资额(万元)、 $r_{17}$  新垦耕地面积比例(%)。

### (4) 生物系统

①生物不安全状态  $S_4$  (生境脆弱性)  $s_{41}$  森林覆盖率(%)、 $s_{42}$  建成区绿化覆盖率(%)、 $s_{43}$  人均公共绿地面积( $\text{m}^2$ )。

②生物压力  $P_4$  (生境干扰)  $p_{32}$  海水养殖面积比例(%)。

③生物调控  $R_4$  (生境保护、生境恢复)  $r_{18}$  自然保护区覆盖率(%)、 $r_{19}$  公园面积( $\text{hm}^2$ )、 $r_{20}$  退耕还林面积( $666\text{m}^2$ )。

## 1.2.2 城市自然生态安全分要素(其中状态 S、压力 P、调控 R 要素由子系统分要素构造得到)

外部驱动 EXD  $d_1$  城市总人口数(万)、 $d_2$  城市化水平(%)、 $d_3$  国内生产总值(亿元)、 $d_4$  全部工业总产值(亿元)、 $d_5$  农业总产值(亿元)、 $d_6$  人均 GDP(元)。

## 2 发展度动态评价方法

### 2.1 灰色 GM(1,1) 残差预测模型

灰色系统理论以“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对“部分”已知信息的生成、开发、提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控<sup>[24]</sup>。城市自然生态安全可以说是一个灰色巨系统,城市化进程中产生各种污染物对环境和生态的破坏最终导致了城市自然生态安全问题的产生,这一点是可以明确的,然而哪些关键原因导致了城市自然生态安全问题? 当这些污染和破坏达到何种程度才可以说是不安全的? 而更为重要的是如何来预报可能产生的不安全,实现城市自然生态不安全预警从而为预防风险提供管理的科学支持? 这也正是本研究想解决的关键问题,通过对指标的预测来实现城市自然生态不安全的动态预警。灰色预测建模的突出特点是即使数据少于 4 个,仍可建立精度较高的动态模型<sup>[25]</sup>。对于目前研究不成熟的城市自然生态安全研究领域,灰建模可以很好的弥补其数据少,且现有研究缺乏动态预测的缺点。

城市自然生态安全指标体系中的各指标之间存在千丝万缕联系和相互影响,如何能在预测时就将这些联系和影响考虑在内是一个难点。由于将指标进行综合加权后再开展预测将会在很大程度上抹煞指标自身的变化特点,因此本文采取了在评价前通过 SPSS 统计软件剔除信息重叠指标,对指标进行独立平行预测的方式,并通过定性分析构建指标体系,在此基础上通过综合加权来构建指标预测值之间的联系,从而实现对城市自然生态安全要素的预测。基于厦门 UNES 指标 1996 ~ 2005 年 10a 数据,并根据指标相对要素层指数的不同性质,选取灰色 GM(1,1) 残差模型预测指标 2006 ~ 2020 年指标数据,残差检验效果满意。灰色预测具体步骤详见参考文献<sup>[24]</sup>。

## 2.2 坎蒂雷加权构造指数

本文拟通过式(1)构造城市自然生态安全分要素指数与外部驱动指数:

$$y_k = \sum_{j=1}^n \alpha_{kj} X_{kj} \quad (1)$$

$$\text{其中: } X_{kj} = \frac{x_{kj}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_{kj})^2}} \quad (k = 1, 2, \dots, m)$$

式中,  $y_k$  为城市自然安全第  $k$  个分要素指数值,  $\alpha_{kj}$  为第  $k$  个分要素第  $j$  个指标的权重,  $X_{kj}$  为第  $k$  个分要素第  $j$  个指标的标准化数据,  $x_{kj}$  为第  $k$  个分要素第  $j$  个指标的原始数据,  $\bar{x}_{kj}$  为第  $k$  个分要素第  $j$  个指标的多年平均值,  $n$  为第  $k$  个分要素层内所含指标数,  $m$  为要素个数(在本研究中,四大自然子系统分别包含 S、P、R 三个要素,加上外部驱动要素,因此  $m = 13$ )。

由于城市四大自然子系统对于城市自然系统来说同等重要,不存在孰轻孰重问题,因此对四大体系的不安全状态、压力和调控要素指数赋予同等权重,通过式(2)构造 UNES 综合指数:

$$z_K = \frac{1}{4} \sum_{s=1}^4 y_{sK} \quad (K = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中,  $z_K$  为第  $K$  个 UNES 综合指数值,  $y_{sK}$  为第  $s$  个子系统的第  $K$  个分要素指数值。

科学确定指标权数在多指标综合评价中举足轻重。目前指标赋权方法分为两大类:客观赋权法和主观赋权法。鉴于本研究对象——城市自然生态安全是一灰色巨系统,为了更好的考察系统内部要素之间相互影响效应,本文选取客观赋权法中计算系统效应权数的坎蒂雷法对 2006 ~ 2020 年厦门 UNES 评价指标的预测数据进行赋权。坎蒂雷( Amal KantiRary) 赋权法假设指标  $x_i$  的权数  $W_i$  与分指标  $x_i$ 、综合指标  $Y$  二者之间的相关系数  $\text{cor}(x_i, Y)$  是成比例的。因此,一个与综合指标  $Y$  高度相关的评价指标应赋以一个较大的权数,反之应赋以较小权数。根据这一假设,坎蒂雷提出:指标  $x_1, x_2, \dots, x_p$  的权数  $W_i$  是矩阵  $RS$  的最大特征根所对应的特征向量(其中  $R$  为  $P$  个评价指标的相关系数矩阵,  $S$  为由指标标准差所组成的对角矩阵)。其中各指标的标准差矩阵  $S$  可以反映指标的变异性,而其变异性程度上的差异信息则包含在各指标所构成的相关系数矩阵  $R$  中,因此由这些权数构成的综合指标能够较大限度地反映指标数据的原始信息。将  $W_i$  作归一化处理,即可得各指标的归一化权重  $\alpha_{ij}^{[26]①}$ 。

## 2.3 发展度评价模型

城市自然生态安全组成要素评价值的动态演变趋势分析可以揭示要素的发展变化幅度大小,但却无法揭示其变化的快慢,而后者可为生态安全预警和管理提供更为具体的科学指导。借用物理学中速度的概念,本文通过构造 UNES 发展度评价模型(式 3),来实现对城市自然生态不安全变化快慢的动态评价与预警。当这一变化大于零时,可以认为城市自然生态不安全状态正在恶化,需要予以预警。

$$D_{ki} = \frac{M_{ki} - M_{k(i-1)}}{\Delta t} \quad (i = 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中,  $D_{ki}$  为第  $k$  个指数第  $i$  年的发展度,  $M_{ki}$  为第  $k$  个指数第  $i$  年的评价值,  $n$  为评价年份数(本研究中  $n = 15$ ),  $m$  为指数个数(本研究中  $m = 16$ ),  $\Delta t$  为时间间隔(本研究计算指数每年变化的速度,取  $\Delta t = 1$ )。

对于导致生态不安全状态结果指数  $S$  来说,原因指数中,  $P$  是效益型指数( $P$  越大,越不安全,  $S$  越大),  $R$  是成本型指数( $R$  越大,越安全,  $S$  越小),  $EXD$  是适中型指数( $EXD$  太大或太小,越不安全)。基于对以上要素因果互动关系的分析,通过对指数  $S$  的年发展度设定信号灯预警区间开展对厦门城市自然生态不安全发展度动态评价与预警,即:

绿灯(无预警)  $D \leq 0$

① 曾宪报. 统计权数论. 东北财经大学博士学位论文, 1998. 4 ~ 9.

蓝灯(轻度预警)  $0 < D \leq 0.2$

黄灯(中度预警)  $0.2 < D \leq 0.4$

红灯(重度预警)  $D > 0.4$

### 3 结果与分析

基于厦门 UNES 指标 2006 ~ 2020 年灰色预测数据,通过坎蒂雷加权法计算厦门 UNES 分要素指数评价。通过式(3)计算 UNES 分要素发展度,结果见表 1。根据表 1 分析 UNES 发展度动态变化趋势,见图 2 和图 3。根据发展度预警区间对厦门 UNES 进行动态评价,结果见表 2。

表 1 厦门 UNES 发展度

Table 1 Developmental degree of Xiamen UNES

系统 System	指数 Index	年份 Year													
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
水系统 Water system	$S_1$	-0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.09	0.12	0.12
	$P_1$	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.11	0.11	0.13	0.13	0.14	0.16
	$R_1$	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.16	0.16	0.18	0.18	0.21	0.22	0.23	0.26
大气系统 Atmosphere system	$S_2$	0.06	0.08	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.21	0.25	0.30	0.38	0.45	0.57
	$P_2$	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.21	0.24	0.28
	$R_2$	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.18	0.21	0.27	0.35	0.45	0.61
土地系统 Land system	$S_3$	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10
	$P_3$	0.03	0.03	0.05	0.05	0.07	0.09	0.10	0.13	0.17	0.20	0.26	0.33	0.42	0.53
	$R_3$	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.12	0.18	0.26	0.37	0.52	0.76
生物系统 Biosystem	$S_4$	-0.12	-0.11	-0.13	-0.12	-0.13	-0.14	-0.13	-0.15	-0.15	-0.15	-0.17	-0.16	-0.18	-0.18
	$P_4$	-0.13	-0.13	-0.13	-0.12	-0.13	-0.12	-0.12	-0.11	-0.12	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.10
	$R_4$	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.22	0.24	0.27	0.29	0.33
自然系统 Natural system	$S$	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16
	$P$	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.03	0.06	0.07	0.09	0.11	0.14	0.18	0.21
	$R$	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.15	0.17	0.20	0.24	0.30	0.38	0.48
	EXD	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.19	0.21	0.23	0.27	0.29	0.34

表 2 厦门 UNES 发展度动态评价

Table 2 Dynamic evaluation of developmental degree of Xiamen UNES

系统 System	状态指数 $S$ 发展度 Developmental degree of index $S$	状态指数 $S$ 发展度 变化趋势 Trend of developmental degree of index $S$	影响因素发展度评价 Assessment of development degree of influencing factors
水系统 Water system	2007 ~ 2020 年:轻度预警(蓝灯) Mild warning(blue light)	持续增大 Progressive increasing	2007 ~ 2020 年: $D_{R1} > D_{P1}$ ( $D_{R1}$ 、 $D_{P1}$ 持续增大) (Both $D_{R1}$ and $D_{P1}$ increase continuously)
大气系统 Atmosphere system	2007 ~ 2015 年:轻度预警(蓝灯) Mild warning(blue light) 2015 ~ 2018 年:中度预警(黄灯) Mode degree warning(yellow light) 2018 ~ 2020 年:重度预警(红灯) Severe warning(red light)	持续增大 Progressive increasing	2007 ~ 2020 年: $D_{R2} > D_{P2}$ ( $D_{R2}$ 、 $D_{P2}$ 持续增大) (Both $D_{R2}$ and $D_{P2}$ increase continuously)
土地系统 Land system	2007 ~ 2020 年:轻度预警(蓝灯) Mild warning(blue light)	平稳发展 Stable development	2007 ~ 2016 年: $D_{R3} < D_{P3}$ 2017 年: $D_{R3} = D_{P3}$ 2017 ~ 2020 年: $D_{R3} > D_{P3}$ (2007 ~ 2020 年: $D_{R3}$ 、 $D_{P3}$ 持续增大) (Both $D_{R3}$ and $D_{P3}$ increase continuously)
生物系统 Biosystem	2007 ~ 2020 年:无预警(绿灯) Dismissal warning(green light)	持续减小 Continuous decreasing	2007 ~ 2020 年: $D_{R4} > D_{P4}$ ( $D_{R4}$ 持续增大、 $D_{P4}$ 持续减小) ( $D_{R4}$ increase continuously while $D_{P4}$ decrease continuously)
自然系统 Natural system	2007 ~ 2020 年:轻度预警(蓝灯) Mild warning(blue light)	持续增大 Progressive increasing	2007 ~ 2020 年: $D_{EXD} > D_R > D_P$ ( $D_{EXD}$ 、 $D_R$ 、 $D_P$ 持续增大) ( $D_{EXD}$ , $D_R$ and $D_P$ increase continuously)

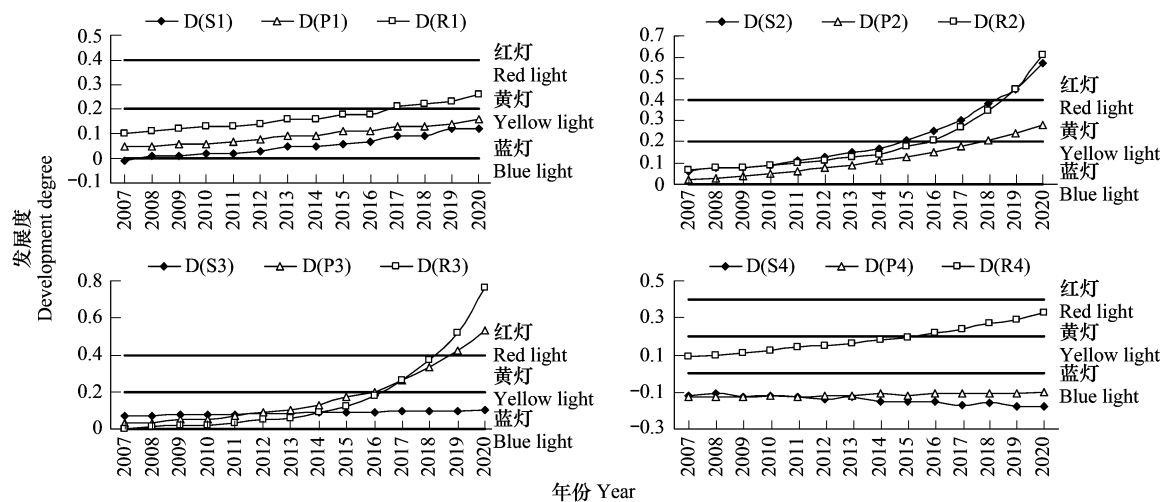


图2 厦门 UNES 子系统分要素发展度

Fig. 2 Developmental degree of Xiamen UNES sub-factors

从图2、图3以及表2可以看出:

(1) 厦门城市自然生态不安全发展度在 2007 ~ 2020 年将处于持续增大轻度预警 (蓝灯预警) 的发展趋势, 其影响要素发展度排序为外部驱动最大, 调控次之, 压力相对最小。说明在 2007 ~ 2020 年导致生态不安全状态 S 持续恶化的主要原因将是增长过快的城市社会经济外部驱动, 需予以预警。虽然调控措施力度按目前发展趋势预测其发展度将不断加强, 但还不足以缓解来自同样持续增长的社会经济系统的外部驱动以及压力对自然系统的胁迫。

(2) 在 2007 ~ 2020 年, 厦门城市自然各子系统中, 大气系统将发展成为生态最不安全系统 (其发展度 2007 ~ 2015 年蓝灯预警, 2015 ~ 2018 年黄灯预警, 2018 ~ 2020 年红灯预警), 水系统次之 (蓝灯预警), 土地系统虽处于轻度预警状态 (蓝灯预警), 但其恶化发展度变化较小, 属平稳发展态势, 生物系统将成为安全水平相对最高的系统 (绿灯无预警)。这一评价结果与现实相符。根据厦门市环境质量报告书 (2001 ~ 2005 年), 厦门地区生物资源丰富, 生态环境良好; 而水污染, 尤其是海水污染较为严重, 加上厦门特殊的地理位置, 来自高纬度地区以及港台地区的工业大气污染物易随海风扩散至厦门地区, 造成该地区较为严重的酸雨问题。随着以上各地区的城市工业化发展, 厦门地区的酸雨问题将更为严峻。

(3) 根据各自然子系统生态不安全发展度变化趋势分析, 对照其影响要素压力和调控, 可以发现, 按目前发展趋势, 在 2007 ~ 2020 年, 大气系统和水系统的调控措施都将不足以缓解压力对其系统的胁迫, 土地系统和生物系统的调控措施的效果则相反。说明要提高未来厦门城市自然生态安全水平, 最主要需加大大气系统和水系统的各种调控措施力度。

#### 4 结论与讨论

目前已有的城市生态安全评价方法, 大多基于城市复合生态系统理论与压力-状态-响应模型, 采用各种线性或非线性方法开展生态安全现状及发展趋势评价。由于静态综合指数错误混淆了生态安全问题产生的因果关系, 无从辨析导致生态不安全的关键要素; 且已有评价方法无法实现真正预测, 从而不能实现生态不安全预警, 也就无法为进一步生态安全调控提供可操作性技术支持。城市自然生态安全动态评价方法基于灰色

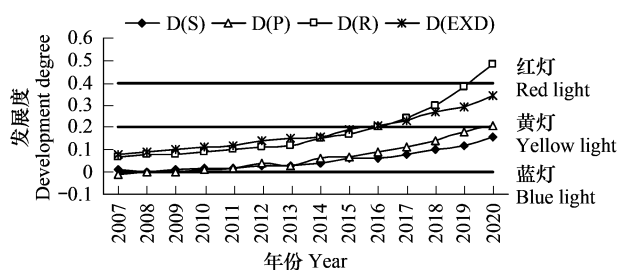


图3 厦门 UNES 分要素发展度

Fig. 3 Developmental degree of Xiamen UNES factors

GM(1,1)残差模型与坎蒂雷赋权法对生态安全要素实现了预测,并基于 S-PRD 互动关系机理,通过发展度评价模型及其信号灯预警评判区间可以实现对城市自然生态不安全未来发展快慢的预警以及不安全问题主导要素的识别。通过在厦门的应用评价结果表明厦门 2007 ~ 2020 年自然生态不安全发展度将处于持续增大轻度预警的发展态势,其主导因素将是发展度持续增大的对其正反馈的外部驱动要素;各子系统中,生态不安全程度排序分别是:大气系统 > 水系统 > 土地系统 > 生物系统。从而,明确了大气系统与水系统生态安全作为今后生态安全调控的重点。

城市自然生态安全动态评价方法克服了以往研究中忽视城市生态安全内部要素因果关系以及无法实现预测和预警的缺陷,其结果可为可持续性生态安全管理提供可操作性的决策依据。引入的灰色 GM(1,1)残差预测模型,虽然在预测精度上有所改进,但仍是对单指标的预测,之后通过对指标的加权综合得到各要素指数的时间序列预测数据。如何在预测的同时就考虑到指标间相互影响关系开展系统预测的方法还值得探讨。

## References:

- [ 1 ] Suzuki Y, Ueta K, Mori S. Global environmental security. Springer. Berlin Heidelberg New York Barcelona Budapest Hong Kong London Milan Paris Santa Clara Singapore Tokyo, 2002.
- [ 2 ] Qu G P. The problems of ecological environmental have become a popular subject of country safety. Environmental Protection, 2002, 5: 3 — 5.
- [ 3 ] Cui S H, Hong H S, Huang Y F, *et al.* Progress of the ecological security research. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 861 — 868.
- [ 4 ] Cornish A S, NG W C, Ho V C M, *et al.* Trace metals and organochlorines in the bamboo shark *Chiloscyllium plagiosum* from the southern waters of Hong Kong, China. Science of the Total Environment, 2007, 376: 335 — 345.
- [ 5 ] Corburn J. Urban land use, air toxics and public health: assessing hazardous exposures at the neighborhood scale. Environmental Impact Assessment Review, 2007 (27): 145 — 160.
- [ 6 ] Geng B, Liang L Q, Guan Y T, *et al.* Ecological safety assessment of the transgenic carp containing a growth hormone gene using genetic markers. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1139 — 1144.
- [ 7 ] Sun X, Zhu X D, Li Y F. Landscape ecological security assessment in rapidly urbanizing bay-area: a case study of Xiamen City, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3563 — 3573.
- [ 8 ] Gong J Z, Xia B C, Chen J F, *et al.* Dynamic analysis of the Guangzhou landscape eco-security pattern based on 3S technology. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4323 — 4333.
- [ 9 ] Zhang H, Ma W C, Ho H H. Recent advances in research on LUCC: based urban ecological security. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 2109 — 2117.
- [ 10 ] OECD. Environmental indicators for agriculture-methods and results, vol. 3. Paris: OECD Publications, 2001. 409.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] Xie H L, Zhang X S. Study on model of matter-element evaluation of city eco-security. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(2): 87 — 90.
- [ 13 ] Gao C B, Chen X K, Wei C H, *et al.* Application of entropy weight and fuzzy synthetic evaluation in urban ecological security assessment. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1923 — 1927.
- [ 14 ] Yang Y, Ren Z Y, Zhao X, *et al.* Ecological safety assessment and counter measures of resources based cities in west China: a case study of Tongchuan City. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1109 — 1113.
- [ 15 ] Wang M Q, Wang J D, Liu J S. Research on urban eco-security assessment -a case study of Changchun. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 72 — 76.
- [ 16 ] Zhang F T, Su W C, Zhou J X. Assessment of urban ecological security based on entropy-weighted gray correlation analysis. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1249 — 1254.
- [ 17 ] Zhang J Y, Han W X. Exploration on urban water security and its counter measures. Journal of University of Science and Technology Beijing (Social sciences edition). 2005, 21(2): 78 — 81.
- [ 18 ] Li S H, Dong Z C, Zhou Y. Water resources security research from perspective of complex giant system. Water Resources Protection, 2007, 23(2): 1 — 4.
- [ 19 ] Zhou W H, Wang R S. Methodology assessment of urban ecological security — A case study of Beijing. Chinese Journal of Ecology. 2005, 24(7): 848 — 852.



- [20] Shi X Q, Zhao JZ, Ou-yang Z Y. Urban eco-security and its dynamic assessment method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3237—3243.
- [21] Gong J Z, Xia B C, Guo L. Assessment and prediction models of urban ecological security. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(1): 107—111.
- [22] Wang J L, Wu S Z, Cao D, *et al.* Environmental security management: evaluation and warning. Beijing: Science Press, 2007. 33—44.
- [23] Zhao Q, Yang Z F, Zhang L P, *et al.* Eco-city characteristics index discrimination and its application. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(2): 86—90.
- [24] Liu S F, Dang Y G, Fang Z G. Grey system theory and application (the third edition). Beijing: Science Press, 2007. 134—138.
- [25] Deng J L. The primary methods of grey system theory (the second edition). Wuchang: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004. 42—55.
- [26] Chen S Y. Objective weighting method of index in synthetic evaluation. *Shanghai Statistics*, 1995, (6): 16—18.

#### 参考文献:

- [2] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题. *环境保护*, 2002, 5: 3~5.
- [3] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 等. 生态安全研究进展. *生态学报*, 2005, 25(4): 861~868.
- [6] 耿波, 梁利群, 关云涛, 等. 转大麻哈鱼生长激素基因鲤生态安全性检测与分析. *生态学报*, 2007, 27(3): 1139~1144.
- [7] 孙翔, 朱晓东, 李杨帆. 港湾快速城市化地区景观生态安全评价——以厦门市为例. *生态学报*, 2008, 28(8): 3563~3573.
- [8] 龚建周, 夏北成, 陈健飞, 等. 基于 3S 技术的广州市生态安全景观格局分析. *生态学报*, 2008, 28(9): 4323~4333.
- [9] 张浩, 马蔚纯, Ho Hon Hing. 基于 LUCC 的城市生态安全研究进展. *生态学报*, 2007, 27(5): 2109~2117.
- [11] 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, 10(5): 705~710.
- [12] 谢花林, 张新时. 城市生态安全水平的物元评判模型研究. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(2): 87~90.
- [13] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 等. 熵权模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1923~1927.
- [14] 杨勇, 任志远, 赵昕, 等. 西部资源型城市生态安全评价与对策——以铜川市为例. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1109~1113.
- [15] 王明全, 王金达, 刘景双. 城市生态安全评价研究——以长春市为例. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(3): 72~76.
- [16] 张凤太, 苏维词, 周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1249~1254.
- [17] 张俊艳, 韩文秀. 城市水安全问题及其对策探讨. *北京科技大学学报(社会科学版)*, 2005, 21(2): 78~81.
- [18] 李少华, 董增川, 周毅. 复杂巨系统视角下的水资源安全及其研究方法. *水资源保护*, 2007, 23(2): 1~4.
- [19] 周文华, 王如松. 城市生态安全评价方法研究——以北京市为例. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 848~852.
- [20] 施晓清, 赵景柱, 欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法. *生态学报*, 2005, 25(2): 3237~3243.
- [21] 龚建周, 夏北成, 郭砾城. 城市生态安全评价与预测模型研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(1): 107~111.
- [22] 王金南, 吴舜泽, 曹东, 等. 环境安全管理评估与预警. 北京: 科学出版社, 2007. 33~44.
- [23] 赵清, 杨志峰, 张珞平, 等. 生态城市特征性指标的辨析及其应用. *安全与环境学报*, 2007, 7(2): 86~90.
- [24] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用(第三版). 北京: 科学出版社, 2007. 3, 134~138.
- [25] 邓聚龙. 灰色系统基本方法(第2版). 武昌: 华中科技大学出版社, 2004. 42~55.
- [26] 陈述云. 综合评价中指标的客观赋权方法. *上海统计*, 1995(6): 16~18.