

# 基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价

魏 婷, 朱晓东\*, 李杨帆

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210093)

**摘要:** 针对海湾地区城市发展进程中的快速、大规模变化等特征, 采用突变级数法对厦门市生态系统健康(1996~2006年)进行了定量评估和动态趋势分析。该方法很大程度上避免了人为制定权重的主观性, 同时避免了主观判断健康标准的不确定性。研究结果表明: (1) 厦门城市生态系统健康趋势走线第 1 个拐点出现在 1999 年, 主要反映出大范围、高强度的填海造地, 破坏森林植被等生态干扰远远超过了生态系统自身的修复能力; (2) 厦门城市生态系统健康趋势走线第 2 个拐点出现在 2001 年, 主要受其海湾型生态城市重大战略转变的影响; (3) 突变级数法捕捉到了快速城市化背景下, 厦门生态系统短期、快速的突变过程, 更为客观地揭示出其生态系统健康演变的规律。

**关键词:** 快速城市化; 生态系统健康; 突变级数法; 突变模型; 厦门

文章编号: 1000-0933(2008)12-6312-09 中图分类号: X826 文献标识码: A

## Ecosystem health assessment of Xiamen City: the catastrophe progression method

WEI Ting, ZHU Xiao-Dong\*, LI Yang-Fan

State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6312 ~ 6320.

**Abstract:** In the context of large-scale and rapid changes in coastal city ecosystems driven by recent urbanization, this research evaluated the ecological health status and trends of Xiamen City from 1996 through 2006 using the quantitative catastrophe progression method (CPM). The results show that CPM has less subjectivity than traditional methods in weight evaluation and uncertainty in estimating the standard of health subjectively. The ecosystem health curve of Xiamen City displays its first inflexion in 1999, which can be attributed to the large-scale and profound ecological disturbance from major projects such as sea reclamation and deforestation. The projects overstepped the ability of Xiamen City's ecosystem to ecologically remediate the disturbance. The second inflexion of Xiamen City's ecosystem health curve appears in 2001 due to the significant strategic transformation from its original island-based configuration to a new larger bay-area-based eco-city. CPM captures short-term changes in Xiamen City's ecosystem under rapid urbanization, and provides an objective assessment of changes in Xiamen City's ecosystem health.

**Key Words:** rapid urbanization; ecosystem health; catastrophe progression method; catastrophe progression model; Xiamen City

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40576024); 国家海洋局 908 专项资助项目(908-02-04-08); 南京大学人才引进培养基金(2007 年度)

收稿日期: 2007-08-07; 修订日期: 2008-06-17

作者简介: 魏婷(1981~), 女, 天津人, 博士生, 主要从事城市生态系统健康研究. E-mail: weiting0618@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdzhu@nju.edu.cn

致谢: 感谢美国圣地亚哥州立大学 Molly M. Pohl-Costello 博士润色英文摘要, 特此致谢。

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40576024); 908 Special Program of State Oceanic Administration of China (No. 908-02-04-08); Talent Introduction and Cultivation Foundation of Nanjing University (2007)

**Received date:** 2007-08-07; **Accepted date:** 2008-06-17

**Biography:** WEI Ting, Ph D., mainly engaged in urban ecosystem health. E-mail: weiting0618@163.com

近年来,生态系统健康研究已成为国际生态领域新的研究热点<sup>[1~4]</sup>,主要研究集中在对各类型生态系统(海洋、森林、农田、沙漠生态系统等)健康的内涵、评价方法的探讨<sup>[5,6]</sup>。随着城市环境问题的日趋突出,城市生态系统健康评价受到学者们的广泛关注。目前已研究的评价方法主要有层次分析法、主成分分析法、集对分析法、能值分析法、模糊评价法、神经网络法、熵权-模糊评价法,并已应用于案例研究中。这些评价方法各有优劣和适用范围,极大推动了该领域研究的进展。然而目前,城市生态系统健康评价理论和方法还未成熟,很多问题有待进一步研究和解决<sup>[7~9]</sup>,主要聚焦在3点:(1)“健康”状态标准的判定仍是国内外学者争论的焦点,未达成一致意见<sup>[10,11]</sup>。(2)指标权重判定的主观色彩,大大影响了评价结果的客观性、科学性。(3)评价理论缺乏系统突变特性的考虑,Nortn、Costanza<sup>[12]</sup>指出生态系统健康具有动态性、相关性、脆弱累积性,即生态系统是一个关于时间的动态过程,系统受到的外界干扰具有累积性,当累积达到一定程度或系统某一要素产生的重大干扰超过系统既定临界值后,整个系统将会崩溃;快速城市化地区、尤其港湾地区,随着城市发展水平的激增,城市结构和功能不合理性的不断累积,各种生态矛盾往往会在某些特定发展阶段集中爆发<sup>[13]</sup>;同时人类长时间、高强度、大范围的生态干扰使其在生态环境改变的速率上,在抵抗外部干扰的能力上,在生态系统的稳定性、完整性、健康性上都表现出脆弱性和易变性的一面<sup>[14]</sup>,系统内一个因子的微小变化极易导致整个复杂大系统结构和功能的突变。因此,快速城市化地区、尤其港湾地区生态系统健康评价的突破,生态系统健康演变过程中突变特性的反应和减少评价过程的主观性、不确定性应该起到决定作用。这也正是本文尝试解决的问题。

基于此,本文将突变理论与模糊数学结合起来,探索评价城市生态系统健康的突变级数法,尝试解决该领域的上述难点问题,并定量评价了1996~2006年我国港湾快速城市化典型地区——厦门的生态系统相对健康状态,通过时间序列的比较对系统健康的发展趋势进行了分析,较为客观、科学地揭示了厦门城市生态系统健康演变的规律。

## 1 突变理论与突变级数法

### 1.1 突变理论

突变级数法的理论基础是突变理论(Catastrophe Theory),该理论利用动态系统的拓扑理论构造数学模型,从而描述、预测自然现象与社会活动中事物连续性中断的质变过程。突变理论的研究对象是系统的势函数。势函数通过系统的控制变量 $u$ 与状态变量 $x$ 描述系统行为,即 $V = V(x, u)$ 。突变理论把状态曲面的奇点集映射到控制空间,得到状态变量在控制空间的轨迹—分叉集。处于分叉集中的控制变量值会使势函数发生突变,即从一种质态跳跃到另一种质态。当状态变量为1维时,势函数及其分叉集方程<sup>[15]</sup>见表1。

表1 突变模型相关公式  
Table 1 Correlative formula of catastrophe models

| 突变模型<br>Forms    | 控制变量<br>Dimensions of<br>control space | 势函数<br>Potential function                                                                      | 分叉集<br>Bifurcation set                                | 归一公式<br>Normalization formula                                                                     |
|------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 折叠突变 Fold        | 1                                      | $V(x) = x^3 + u_1 x$                                                                           | $u_1 = -3x^2$                                         | $X_{u_1} = \sqrt{u_1}$                                                                            |
| 尖点突变 Cusp        | 2                                      | $V(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}u_1 x^2 + u_2 x$                                           | $u_1 = -6x^2, u_2 = 8x^3$                             | $X_{u_1} = \sqrt{u_1}, X_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}$                                                   |
| 燕尾突变 Swallowtail | 3                                      | $V(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}u_1 x^3 + \frac{1}{2}u_2 x^2 + u_3 x$                      | $u_1 = -6x^2, u_2 = 8x^3, u_3 = -3x$                  | $X_{u_1} = \sqrt{u_1}, X_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}, X_{u_3} = \sqrt[4]{u_3}$                          |
| 蝴蝶突变 Butterfly   | 4                                      | $V(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}u_1 x^4 + \frac{1}{3}u_2 x^3 + \frac{1}{2}u_3 x^2 + u_4 x$ | $u_1 = -10x^2, u_2 = 20x^3, u_3 = -15x^4, u_4 = 4x^5$ | $X_{u_1} = \sqrt{u_1}, X_{u_2} = \sqrt[3]{u_2}, X_{u_3} = \sqrt[4]{u_3}, X_{u_4} = \sqrt[5]{u_4}$ |

### 1.2 突变级数法

突变级数法的基本原理是基于落在分叉集内控制变量的取值会使系统状态发生突变的性质来构建评价

模型的<sup>[16]</sup>。

构建评价模型时,当某个上级指标(状态变量 $x$ )包含2个下级指标(控制变量 $u$ )时,对各控制变量按重要程度进行排序,即重要指标 $u_1$ 和次要指标 $u_2$ ,然后根据对应的尖点模型分叉集方程,通过 $u$ 隶属度值得系统发生突变时的状态变量值 $x$ 。同理,当上级指标含有1、3、4个下级指标时,可分别根据折叠、燕尾、蝴蝶突变模型计算。如果一个指标的下级指标个数多于4,需利用因子分析法对指标进行提纯。

直接利用分叉集方程还不能进行评价、分析,此过程的实现要靠归一公式(表1)完成。归一公式把控制变量统一化为状态变量表示的质态。一个状态变量含有多个控制变量,利用归一公式计算后将得到对应的多个状态变量值( $x_1, x_2, x_3, x_4$ )。本文考虑到选取指标的相互独立性,则取 $x_1, x_2, x_3, x_4$ 的平均值作为最终状态值 $x$ 。

综上所述,突变级数法的评价步骤为:建立多级评价指标体系,并对各级指标按照重要程度排序;建立递级突变模型;原始数据处理后带入对应的突变模型归一公式,计算各级状态变量相对隶属度。

## 2 厦门生态系统健康评价

### 2.1 指标体系的构建

至今,学术界尚未统一生态系统健康的概念<sup>[17,18]</sup>。Hancock 等众多学者普遍认为城市生态系统健康应包括以下5个范畴<sup>①②③</sup><sup>[10,19]</sup>:

- (1) 城市人口的健康,包括身体、心理和所享受社会福利的情况;
- (2) 城市社区的健康,包括社会的、经济的和文化的状况,管理过程的有效性(包括教育、参与、获取决策力),和这些以及其他健康决定因素的分配(社会平等);
- (3) 人工环境的质量,包括住房质量、交通、水供应和污水排放、公园和其它文明设施;
- (4) 城市环境在空气、水、土壤和噪音污染方面的质量;
- (5) 生物群落的健康,包括生境质量和生物多样性。

上述评价体系较好的总结了城市系统的关键要素<sup>[10]</sup>,但是其着眼点是系统要素或局部,不能如实地说明系统的整体性及人类对于生态环境的调控作用,用于对城市这一长期受人类活动影响、以人为中心的社会—经济—自然复合生态系统<sup>[20]</sup>的研究还显不足。因此本文构建厦门城市生态系统健康评价指标体系时,把城市生态系统健康的关键要素归类到生态环境系统、社会经济系统中,同时增加了人类对环境的调控系统。另外在指标选取中,由于一部分指标的不可获得性只能使用其它指标来代替,如以每公顷耕地面积农药使用量、每公顷耕地面积化肥使用量反映土壤环境质量,以绿化覆盖率、森林覆盖率、自然保护区面积覆盖率反映生物群落在生境质量及生物多样性方面的健康情况;或暂时没有列入指标体系中,如城市人口心理健康指标的判定等。据此提出的厦门生态系统健康评价指标体系包括3个系统、7个要素、44个原始指标(表2)。本文利用SPSS软件完成因子分析的操作,筛选了24个重复、次要的指标,确定了最终评价指标体系(表2)。

本研究采用Delphi专家打分法,最终确定各指标重要性的排序(表2)。

### 2.2 突变模型的构建

据此,本文提出的厦门生态系统健康评价指标逐级集成的突变模型如图1所示。

### 2.3 评价分级标准的制定

由于突变级数法归一公式的特点,算出的评价值一般均较高,且指数间差距很小,与人们习惯上根据评价

① Hancock T. 2000. Urban ecosystems and human health. A paper prepared for the seminar on CIID-IDRC and urban development in Latin America, Montevideo, Uruguay, April 6 ~ 7 2000. [http://www.idrc.ca/fr/ev-8385-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/fr/ev-8385-201-1-DO_TOPIC.html)

② McMullan C. Indicators of urban ecosystem health. International development research center (IDRC). [http://www.idrc.ca/fr/ev-3459-201-1-DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/fr/ev-3459-201-1-DO_TOPIC.html). 1999

③ Durga D J, Minu S. An urban ecosystem health approach to make a cleaner city and better health in kathmandu, Nepal. A paper prepared for the world congress of public health. 2006

表2 厦门城市生态系统健康评价指标体系

Table 2 The indicator system of Xiamen City's ecosystem health assessment

| I 系统(排序)                 | II 要素(排序)               | III 类别  | IV 原始指标                                                                                                                                                                                                                                                                       | V 评价指标 | VI 排序 |
|--------------------------|-------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| A <sub>1</sub> 生态环境系统(2) | B <sub>1</sub> 生物群落 (2) | 1 生境质量  | C <sub>1</sub> 绿化覆盖率, %<br>C <sub>2</sub> 森林覆盖率(%)                                                                                                                                                                                                                            | √      | 1     |
|                          |                         | 2 生物多样性 | C <sub>3</sub> 自然保护区覆盖率(%)                                                                                                                                                                                                                                                    | √      | 2     |
|                          | B <sub>2</sub> 自然环境 (1) | 3 空气    | C <sub>4</sub> 城市空气污染指数                                                                                                                                                                                                                                                       | √      | 1     |
|                          |                         | 4 水     | C <sub>5</sub> 地表水功能区水质达标率(%)<br>C <sub>6</sub> 近岸海域功能区水质达标率(%)                                                                                                                                                                                                               | √      | 1     |
|                          |                         | 5 土壤    | C <sub>7</sub> 每公顷耕地面积农药使用量(g·hm <sup>-2</sup> )<br>C <sub>8</sub> 每公顷耕地面积化肥使用量(g·hm <sup>-2</sup> )                                                                                                                                                                          | √      | 1     |
|                          |                         | 6 噪声    | C <sub>9</sub> 交通干线噪声平均值, dB(A)<br>C <sub>10</sub> 区域环境噪声平均值, dB(A)                                                                                                                                                                                                           |        |       |
|                          |                         | 7 生活质量  | C <sub>11</sub> 恩格尔系数                                                                                                                                                                                                                                                         | √      | 1     |
|                          |                         | 8 社会安定  | C <sub>12</sub> 失业率(%)<br>C <sub>13</sub> 基尼系数                                                                                                                                                                                                                                | √      | 3     |
|                          |                         | 9 基础设施  | C <sub>14</sub> 人均住房面积(m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>15</sub> 千人拥有公交车辆(辆·千人 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>16</sub> 自来水供水面积(m <sup>2</sup> )<br>C <sub>17</sub> 污水管铺设长度(m)<br>C <sub>18</sub> 人均公共绿地面积(m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>19</sub> 公园覆盖率(%) | √      | 4     |
|                          |                         | 10 政府管理 | C <sub>20</sub> 公众获取、参与决策率(%)                                                                                                                                                                                                                                                 |        |       |
|                          | B <sub>4</sub> 经济 (1)   | 11 经济实力 | C <sub>21</sub> 人均 GDP, 万元<br>C <sub>22</sub> GDP 平均年增长率(%)<br>C <sub>23</sub> 固定资产投资总额占 GDP 比重(%)                                                                                                                                                                            | √      | 2     |
|                          |                         | 12 经济结构 | C <sub>24</sub> 第三产业产值占 GDP 比例(%)<br>C <sub>25</sub> 高新技术产值占工业总产值比重(%)                                                                                                                                                                                                        | √      | 3     |
|                          |                         | 13 经济效率 | C <sub>26</sub> 能源弹性系数(吨标煤·万元 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>27</sub> 水资源弹性系数(m <sup>3</sup> ·万元 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>28</sub> 经济密度(万元·km <sup>-2</sup> )                                                                                                                     | √      | 1     |
|                          |                         | 14 人群健康 | C <sub>29</sub> 人口自然增长率(%)<br>C <sub>30</sub> 人口预期寿命, 岁<br>C <sub>31</sub> 婴儿死亡率(%)                                                                                                                                                                                           | √      | 1     |
|                          |                         | 15 文化教育 | C <sub>32</sub> 平均教育年限(年)<br>C <sub>33</sub> 万人在校大学生数(人·万元 <sup>-1</sup> )                                                                                                                                                                                                    | √      | 2     |
|                          |                         | 16 社会福利 | C <sub>34</sub> 千人拥有医院床位数(张·千人 <sup>-1</sup> )<br>C <sub>35</sub> 教育费用占 GDP 比例(%)                                                                                                                                                                                             | √      | 3     |
| A <sub>3</sub> 环境调控系统(3) | B <sub>6</sub> 污染控制 (2) | 17 废水   | C <sub>36</sub> 工业废水达标排放率(%)<br>C <sub>37</sub> 生活污水处理率(%)                                                                                                                                                                                                                    |        |       |
|                          |                         | 18 废气   | C <sub>38</sub> 工业二氧化硫达标排放率(%)                                                                                                                                                                                                                                                |        |       |
|                          |                         | 19 固废   | C <sub>39</sub> 工业固废综合利用率(%)<br>C <sub>40</sub> 生活垃圾无害化处理率(%)                                                                                                                                                                                                                 | √      | 1     |
|                          |                         | 20 资金   | C <sub>41</sub> 环境投资占 GDP 比例(%)                                                                                                                                                                                                                                               | √      | 1     |
|                          | B <sub>7</sub> 环境治理 (1) | 21 管理   | C <sub>42</sub> 重点企业清洁生产审核率(%)<br>C <sub>43</sub> 重点企业循环经济培训率(%)                                                                                                                                                                                                              |        |       |
|                          |                         | 22 宣传教育 | C <sub>44</sub> 市民环保知识普及和参与率(%)                                                                                                                                                                                                                                               | √      | 2     |

排序中数值  $i+1$  代表指标的重要性小于数值  $i$  代表指标的重要性 ( $i=1, 2, 3, 4$ ) The indicator of Num  $i+1$  is less important than the indicator of Num  $i$  in ranking ( $i=1, 2, 3, 4$ )

I System(ranking); II Component(ranking); III Catalogue; IV Ordinary indicators; V Processed indicators; VI Ranking; A<sub>1</sub> Eco-environmental system; A<sub>2</sub> Socio-economic system; A<sub>3</sub> Environmental control system; B<sub>1</sub> Biotic community; B<sub>2</sub> Natural environment; B<sub>3</sub> Society; B<sub>4</sub> Economy; B<sub>5</sub> Human health; B<sub>6</sub> Pollution control; B<sub>7</sub> Environment management; 1 Habitat quality; 2 Biodiversity; 3 Air; 4 Water; 5 Soil; 6 Noise; 7 Life quality; 8 Social stability; 9 Public infrastructure; 10 Government management; 11 Economic ability; 12 Economic structure; 13 Economic efficiency; 14 Population health; 15 Cultural education; 16 Social welfare; 17 Wastewater; 18 Waste-gas; 19 Solid waste; 20 Fund; 21 Management; 22 Educational Propaganda; C<sub>1</sub> Coverage rate of city green area; C<sub>2</sub> Coverage rate of forestry; C<sub>3</sub> Coverage rate of natural reserves; C<sub>4</sub> Air Pollution Index; C<sub>5</sub> Qualification ratio of surface

water function;  $C_6$  Qualification ratio of inshore function zones;  $C_7$  Consumption of pesticide per hectare cropland;  $C_8$  Consumption of chemical fertilizer per hectare cropland;  $C_9$  Average of traffic noise;  $C_{10}$  Average noise value;  $C_{11}$  Engel coefficient;  $C_{12}$  Unemployment rate;  $C_{13}$  Gini coefficient;  $C_{14}$  Housing area per capita;  $C_{15}$  Public traffic vehicles per 1000 population;  $C_{16}$  Area of water supply;  $C_{17}$  Length of sewage pipes;  $C_{18}$  Per capita public green area;  $C_{19}$  Coverage rate of park;  $C_{20}$  Ratio of public's acquiring and participation in policy-making;  $C_{21}$  GDP per capita;  $C_{22}$  Average annual GDP growth rate;  $C_{23}$  Fixed assets invest per GDP;  $C_{24}$  Tertiary industry production per GDP;  $C_{25}$  Gross output value of high and new technology per gross industrial output value;  $C_{26}$  Elasticity ratio of energy;  $C_{27}$  Elasticity ratio of water resource;  $C_{28}$  Economic density;  $C_{29}$  Population natural growth rate;  $C_{30}$  Life expectancy;  $C_{31}$  Infant death rate;  $C_{32}$  Average schooling years;  $C_{33}$  Average number of undergraduate student per 10000 population;  $C_{34}$  Hospital beds per 1 000 population;  $C_{35}$  R&D expense per GDP;  $C_{36}$  Industrial wastewater effluent compliance;  $C_{37}$  Rate of domestic sewage treated;  $C_{38}$  Rate of industrial  $SO_2$  reaching the discharge standards;  $C_{39}$  Industrial solid waste comprehensive utilization;  $C_{40}$  Domestic garbage treatment rate;  $C_{41}$  Environment invest per GDP;  $C_{42}$  Rate of cleaner production audit of key firms;  $C_{43}$  Rate of circular economy training of key firms;  $C_{44}$  Rate of citizen's popularization and participation on environmental protection; 下同 the same below

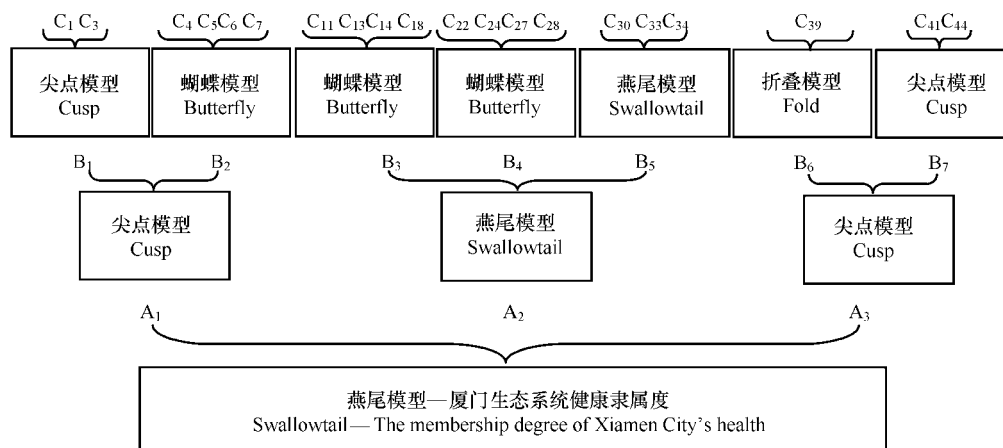


图1 厦门城市生态系统健康评价的递进突变模型

Fig. 1 Catastrophe progression model for Xiamen City's ecosystem health assessment

值对评价对象“优”、“劣”的直观判断相距甚远。因此制定出适合突变级数法的等级标准,而不是绝对意义下的常规等级标准,是使突变级数法更具实用价值的关键,也是目前使用突变级数法的难点。

为解决上述问题,本文提出如下思路:在指标体系给定的前提下,设底层控制指标相对隶属度均取为  $x$ ,则从理论意义上讲,此时评价总体的总隶属度也应为  $x$ 。把评价标准划分为病态、不健康、亚健康、健康、很健康五级,则设当底层控制指标对应的相对隶属度均取为  $x_i$  ( $x_i = 0/0.2/0.4/0.6/0.8/1$ ) 时,由突变级数法进行计算,可得到其总隶属度为  $y_i$ 。则可算出突变级数法在绝对意义下的等级标准值。由上述思路计算得到的突变级数法的评价等级标准见表 3。

## 2.4 原始数据及其预处理

原始数据来源:《厦门经济特区年鉴》(1996~2006 年);《厦门市环境质量状况公报》(1996~2006 年);《厦门市水资源保护规划报告》,2002 年;《福建省海湾数模与环境研究:厦门湾综合研究报告》,2006 年;《厦门市环境保护“十五”规划和 2015 年远景目标》,2001;《厦门市生态城市概念性规划》,2003;《厦门市城市总体规划修编(2004~2020)》,2004;相关职能部门统计数据。

原始数据预处理时采用相对隶属度的概念,效益型指标(数值越大越好的指标)相对健康隶属度公式见(1);成本型指标(数值越小越好的指标)相对健康隶属度公式见(2)。该计算方法能够避免常规绝对隶属度计算中要对健康标准进行定制的难点问题:

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad x_{\min} < x < x_{\max} \quad (1)$$

$$\frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad x_{\min} < x < x_{\max} \quad (2)$$

表3 厦门城市生态系统健康评价等级标准  
Table 3 The grade standard of Xiamen City's ecosystem health assessment

| 等级<br>Grade | 健康状况<br>Health condition | 常规值<br>General value | 突变级数法 Catastrophe progression method |                |                |                |
|-------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|             |                          |                      | 总值 Total value                       | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> |
| I           | 很健康 Very health          | >0.8                 | >0.99                                | >0.96          | >0.97          | >0.96          |
| II          | 健康 Health                | 0.6~0.8              | 0.97~0.99                            | 0.91~0.96      | 0.94~0.97      | 0.91~0.96      |
| III         | 亚健康 Sub-health           | 0.4~0.6              | 0.95~0.97                            | 0.84~0.91      | 0.90~0.94      | 0.84~0.91      |
| IV          | 不健康 Un-health            | 0.2~0.4              | 0.91~0.95                            | 0.74~0.84      | 0.83~0.90      | 0.74~0.84      |
| V           | 病态 Morbidity             | <0.2                 | <0.91                                | <0.74          | <0.83          | <0.74          |

A<sub>1</sub>: 生态环境系统 eco-environmental system; A<sub>2</sub>: 社会经济系统 Social-economic system; A<sub>3</sub>: 环境调控系统 environmental control system

## 2.5 评价结果与分析

1996~2006年厦门城市生态系统健康相对隶属度(图2)为:[0.867,0.910,0.930,0.949,0.937,0.931,0.948,0.967,0.968,0.985,0.988]。

(1) 厦门城市生态系统健康趋势走线第1个拐点出现在1999年,其原因:①1996~2001年厦门大力加快城市化进程,突出表现在经济密度、人均住房面积、千人拥有医院床位数、人口预期寿命指标上;这些指标在1996~2001年的增长率分别为12.75%、21.42%、1.96%、3.18%;社会经济系统健康隶属度也由1996年的0.768(V级)波动上升到2001年的0.845(IV级)。②快速城市化导致了绿化覆盖率、自然保护区覆盖率指标值自1999年快速、持续的下降,2001年该指标降至11a来的最低值-34.90%、6.79%;主要源于此期间无序、过度的开山取石造成了森林植被的严重破坏。③快速城市化带来的另一个严重问题是城市发展空间的严重不足,填海造地成为厦门解决“土地赤字”问题的主要方式<sup>[21,22]</sup>,但也随之导致了1999年厦门近岸海域功能水质达标率的急剧降低;该指标1999~2001年年均递减率达5.74%。根据厦门大学的研究<sup>[22]</sup>,尤其是1999~2001年间,厦门海域共进行9处围填海工程,填海造地面积高达376.98hm<sup>2</sup>,造成海洋泥沙淤积、海洋环境质量下降和海岸带生物多样性减少等严重影响。黄宗国等人的研究表明<sup>[23,24]</sup>,1999~2001年间,过度的城市生活、工业废水入海和水产养殖污染等,与海洋工程项目造成的纳潮量、水动力条件改变叠加,引发厦门海湾赤潮频发;不合理地海滩取沙和占滩建筑,造成了严重的海岸侵蚀。④同时1999~2001年间,环保投资占GDP比例从2.8%降至2.2%,年均递减率达12.31%;工业固废综合利用率、市民环保知识普及和参与率的年均增长率仅为1.28%、1.38%;环境调控系统健康水平仍处于Ⅲ和Ⅳ等级,环境调控力度的不足使这种大范围、高强度的生态干扰远远超过了生态系统自身修复能力。因此厦门生态环境系统健康隶属度由1999年的0.872(Ⅲ级)直降至2001年的0.736(V级);生态系统健康趋势走线在4a稳步上升后于1999年出现了第1个拐点,健康隶属度由1999年的0.949(Ⅳ级)降至2001年的0.931(Ⅳ级)。

(2) 厦门城市生态系统健康趋势走线第2个拐点出现在2001年。虽然多年填海造地、开山取石缓解了“土地赤字”,城市化快速发展举措带来了厦门社会经济系统健康的持续上升。但其负面影响却不容忽视,本岛土地资源日益枯竭、生态环境承载能力趋于饱和,城市生态系统健康严重受损。这种情况下,厦门市于2002年正式提出并实施了由海岛型城市向海湾型生态城市转移的发展战略。扩充腹地、城市生态框架构建、生态功能区划、产业生态化、城市生态网络建设<sup>[25]</sup>,使自然保护区覆盖率、地表水功能区水质达标率、近岸海域功能区水质达标率、人均公共绿地面积、第三产业产值占GDP比例、水资源弹性系数、环保投资占GDP比例指标值增加。因此生态环境系统健康在多年下降后于2001年后回升,生态环境处于修复治理阶段;社会经济系统健康也呈现良性上升趋势,且在2001年后加快了上升速度;城市生态系统健康隶属度自1999年急剧下降的两年后,由2001年的0.931(Ⅳ级)逐步回升至2006年的0.988(Ⅱ级)。突变级数法捕捉到了快速城市化背景下,厦门生态系统短期、快速的突变过程,较为准确地反映出生态系统健康趋势。

(3) 厦门环境调控系统健康整体呈上升趋势,但在1999到2004年间波动很大。此期间正是海湾型战略提出之前和初步落实阶段,也是生态环境与社会经济增长矛盾最为激烈的阶段。

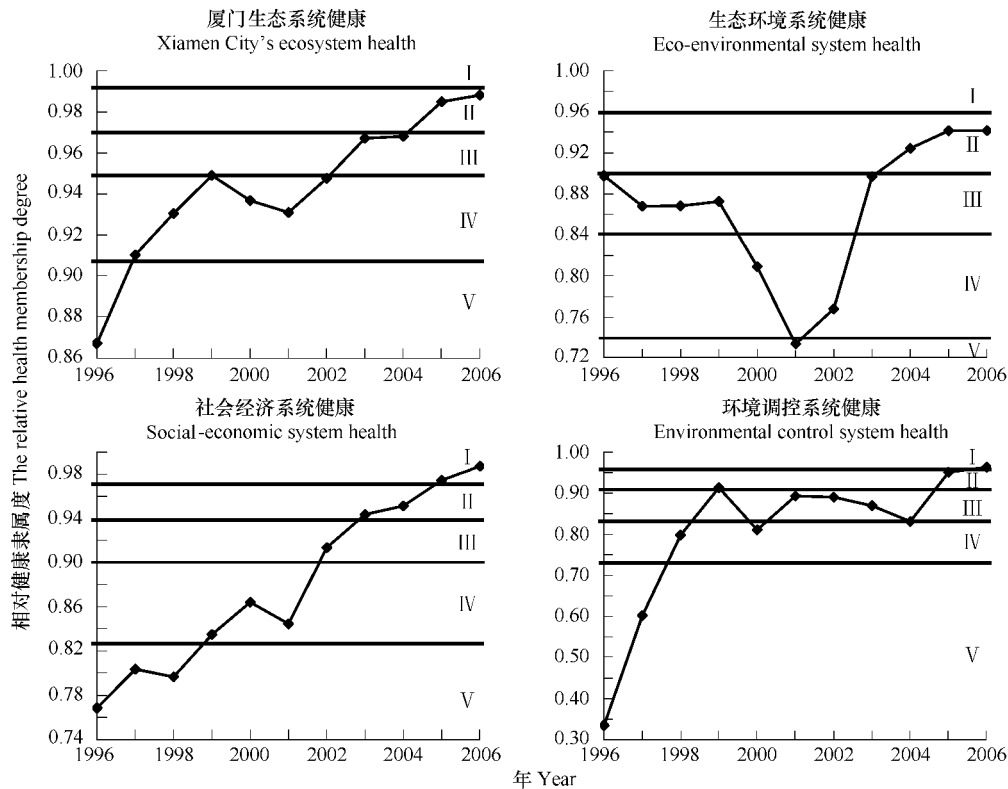


图2 1996~2006年厦门城市生态系统及各子系统相对健康评价

Fig. 2 Relative health assessment of Xiamen City's ecosystem and all the subsystem from 1996 to 2006

I ~ V: 评价等级 Assessment grade

### 3 结论与讨论

**3.1** 就目前城市生态系统健康评价方法中运用较多、认可度较高的主成分分析法、层次分析法、模糊评价法、熵权-模糊评价法对比分析如下。

(1) 技术路线分析 主成分分析法通过对原始变量相关矩阵内部结构关系的研究,筛选、识别出影响健康的主要且相互独立的指标,但只能实现定性评价。层次分析法把影响健康的要素按支配关系组成递阶、层次的评价指标体系,并通过两两比较对指标人为赋权,但仍存在着定量评价不足的缺陷。模糊评价法通过建立隶属函数,把绝对的属于或不属于“非此即彼”扩展为更加灵活的渐变关系,解决了健康状态与否的一刀切问题;同时构建的模糊数学模型可实现定量评价;然而在制定指标权重值和健康标准值时仍存在着较大的主观性。熵权-模糊评价法是模糊评价法的改进版,采用熵权法(依据指标反映的客观信息确定其重要度)对指标赋权重值,一定程度上减少了人为赋权的主观性。

(2) 建模思想分析 模糊评价法和熵权-模糊评价法的理论基础—模糊数学是研究和处理模糊性现象的一门数学分支,构造的模糊数学模型只是基于系统健康状态现象的判定,并未深入挖掘其内在的演变机理,更未能反映出演变过程中非连续、阶跃式的突变特性。

(3) 评价结果分析 由于模糊评价法和熵权-模糊评价法忽略了城市生态系统健康演变过程中的突变特性,掩盖了指标极值情况下对生态系统灾难性的影响。因此采用模糊评价法和熵权-模糊评价法得到的健康趋势走线可能会较平滑、拐点较少。并且在评价突变效应越为突出的对象时,这种差异越为明显。诚然,最好使用相同的指标体系、模型参数,分别用不同的方法进行评价,以此定量分析评价结果的差异。但模糊评价法和熵权—模糊评价法都要对指标赋权重值,突变级数法无需赋权,评价结果差异原因中夹杂的这种模型参数问题会大大影响对方法自身优劣的判别。如何消除这种模型参数对评价结果的影响,得到基于方法自身不同

所带来的结果差异的定量分析,需要今后进一步研究。

综上所述,突变级数法的比较优势主要体现在以下两点。

(1) 演变机理中突变特性的反映 快速城市化地区生态系统健康状态演变过程具有突变特性,并不是连续、渐变、平滑的。因此,这也要求评价快速城市化地区生态系统健康的数学模型,能够体现这种非连续、阶跃式的数理特征<sup>[26]</sup>。突变理论则正是这样一门以突变为研究对象的数学理论,也是目前唯一的一门研究系统运动由渐变引起突变的系统理论<sup>[16]</sup>。基于突变理论构造的突变级数法,反映了传统方法所忽略的快速城市化地区生态系统健康演变过程的突变特性,更为客观、准确的揭示了生态系统健康的演替规律和变化动力机制。

(2) 较高的客观性 突变级数法引用相对隶属度概念,避免了主观判断健康标准的不确定对评价结果客观性的影响。同时无需对指标赋权重值,只需按照指标内在逻辑关系对其重要程度进行排序,很大程度的减少了人为赋权的主观性;但仍不能完全避免主观性,这需要今后继续探索整合其他技术方法,加以进一步完善。

**3.2 快速城市化地区生态系统健康演变过程中突变特性的客观存在,以及突变理论研究所有跳跃的变迁、非连续性以及突发质变的一般性<sup>[26]</sup>为突变级数法提供了广阔的应用空间。**突变级数法具有一般性,可用于不同区域、不同时间尺度快速城市化地区生态系统健康的评价。诚然,突变具有时间尺度效应<sup>[27,28]</sup>,选取突变效应越为明显的时间尺度,突变级数法应用上的适用性就越为显著。本研究结果表明填海造地是导致厦门生态系统健康发展趋势突变的原因之一。但厦门填海造地由来已久,自从 1955 年以来共进行了约 50 处工程围垦,围垦面积达 90.13km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。由于数据收集等方面的限制,本研究年限为 11a,跨越时间并不长。而只有长时间尺度的城市生态系统健康研究才可以对其内在健康演替进行更为准确、深入的分析,为进一步探讨健康状态奠定基础。因此,基于突变级数法的厦门生态系统健康的未来研究尚有继续发展的空间。

**3.3 厦门是中国最早对外开放的沿海城市之一,经济实力强,城市化和开放时间长、程度高,受人类活动干扰强烈,具有快速城市化地区的典型特征<sup>[25]</sup>。尤其是近十几年来,厦门高强度、大范围的填海造地,无序、过度的开山取石造成森林植被的严重破坏,八大工业园区建设对农田等非建设用地的侵占,以高速公路、干线公路、国道和海底隧道为主的快速道路网建设,以及海湾型生态城市重大战略的转变、实施等,更加剧了其生态系统健康的易变性和脆弱性,情况令人堪忧<sup>[14]</sup>。因此,时空选取的典型性使得突变级数法在本研究中表现出较好的适用性。**

**3.4 本文运用突变级数法对厦门生态系统健康评价结果表明,由于受快速城市化进程中强烈生态干扰和政府重大决策的影响,1996~2006 年,厦门生态系统健康趋势走线共出现 2 个拐点,分别发生在 1999 和 2001 年。同时本研究为相对健康评价,即相对于 1996~2006 年,厦门 2006 年生态系统健康水平处于 II 等级(健康水平),但并不表明 2006 年已达到了绝对的健康水平。因此,决策层要意识到这点,保持乐观状态的同时不要放松警惕,应结合目前存在的问题、隐患采取积极的措施,以保证其生态系统健康可持续的迈向更高水平。**

## References:

- [1] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology*, 1998, 13(1): 397—402.
- [2] Rapport D J. Ecosystem health: Concept analysis. In: Rapport D J, Gandet C L, Callow P. *Evaluating and Monitoring the Health of Large Scale Ecosystem*. Berlin: Springer Verlag, 1994. 4—8.
- [3] Schaefer D J, Henricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: Measuring ecosystem health. *Environ Manage*, 1988, 12(3): 445—455.
- [4] Wei T, Wu C N. A case study on urban ecosystem health assessment. *Ecological Economy*, 2005, (8): 99—102.
- [5] Xu F L, Zhao Z Y, Zhan W. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment. *Ecol Model*, 2005, 188(2): 327—339.
- [6] Wei T, Wu C N. An ecosystem health assessment of industrial parks of method and its application. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(5): 680—684.
- [7] Annalee Y, Pedro M, Mariano B, et al. Applying an ecosystem approach to the determinants of health in centro Habana. *Ecosystem Health*, 1999, 5(1): 3—19.

- [ 8 ] Jerry M S, Mariano B, Annalee Y, *et al.* Developing ecosystem health indicators in centro Habana: A community-based approach. *Ecosystem Health*, 2001, 7(1): 15—26.
- [ 9 ] Xie H L, Li B, Wang C S, *et al.* Agroecosystem health assessment in western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3028—3036.
- [ 10 ] Zhou W H, Wang R S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3244—3251.
- [ 11 ] Zhang F L, Liu J L, Yang Z F. Ecosystem health assessment of urban rivers and lakes for six lakes in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3028—3036.
- [ 12 ] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: Cosanza R, Norton B D. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington D C: Island Press, 1992. 239—256.
- [ 13 ] Wang R S, Wu Q, Bao L S. On the problems and models of the development of Beijing's ecological landscape. *Urban Planning Forum*, 2004, (5): 37—43.
- [ 14 ] Li Y F, Zhu X D, Sun X. The spatio-temporal process and assessment of regional eco-environment in rapid urbanization. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(12): 2060—2066.
- [ 15 ] Thom R. Catastrophe theory. In: Thom R. *Structural Stability and Morphogenesis*. Benjamin: Reading Mass, 1972. 19—26.
- [ 16 ] Ling F H. The application of catastrophe theory. In: Ling F H. *The Theory and Application of Catastrophe Theory*. Shanghai: Jiaotong University Press, 1997. 129—131.
- [ 17 ] Rapport D J. The concept of ecosystem health. In: Rapport D J, Lasley W L, Rolston D E. *Managing for Healthy Ecosystem*. LLC: CRC Press, 2002. 110—115.
- [ 18 ] Tzoulas K. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. *Landscape Urban Planning*, 2007, (2): 1441—1452.
- [ 19 ] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, 22(6): 525—529.
- [ 20 ] Ma S J, Wang R S. The social-economic-nature complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1—9.
- [ 21 ] Lin G L, Zuo Y H. Pred regulation of Xiamen bay in the process of urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(2): 137—146.
- [ 22 ] Pen B R, Hong H S, Chen W Q, *et al.* Ecological damage appraisal of sea reclamation: Theory method and application. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 20(5): 715—726.
- [ 23 ] Huang Z G. Redtide biology. In: Huang Z G. *Species Biodiversity in Xiamen*. Beijing: Ocean Press, 2006. 150—157.
- [ 24 ] Lin G L, Zuo Y H. Cumulative ecological effects assessment on resource exploitation and utilization in bay. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 432—440.
- [ 25 ] Bian J W. Some thoughts on the city development and control: A case study of Xiamen City. *City Planning Review*, 2004, 28(7): 25—29.
- [ 26 ] Collie J S, Richardson K, Steele J H. Regime shifts: Can ecological theory illuminate the mechanisms. *Progress in Oceanography*, 2004, 60: 281—302.
- [ 27 ] Zhu X D. New thinking of geosciences—Advance and review on ten-year disaster theory of realism. *Advances in Earth Science*, 1993, 8(3): 53—57.
- [ 28 ] Hsu K J. Actualistic catastrophism, address of the retiring president of the international association of sedimentologists. *Sedimentology*, 1983, 30: 3—9.

#### 参考文献:

- [ 4 ] 魏婷, 吴长年. 城镇生态系统健康评价实证研究. *生态经济*, 2005, (8): 99—102.
- [ 6 ] 魏婷, 吴长年. 一种工业园区生态系统健康评价方法及其应用. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 680—684.
- [ 9 ] 谢花林, 李波, 王传胜, 等. 西部地区农业生态系统健康评价. *生态学报*, 2005, 25(11): 3028—3036.
- [ 10 ] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价. *生态学报*, 2005, 25(12): 3244—3251.
- [ 11 ] 张凤玲, 刘静玲, 杨志峰. 城市河湖生态系统健康评价——以北京市“六海”为例. *生态学报*, 2005, 25(11): 3019—3027.
- [ 13 ] 王如松, 吴琼, 包陆森. 北京景观生态建设的问题与模式. *城市规划汇刊*, 2004, (5): 37—43.
- [ 14 ] 李杨帆, 李晓东, 孙翔. 快速城市化对区域生态环境影响的时空过程及评价. *环境科学学报*, 2007, 27(12): 2060—2066.
- [ 16 ] 凌复华. 突变理论的应用. 见: 凌复华主编. *突变理论及其应用*. 上海: 上海交通大学出版社, 1997. 129—131.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1—9.
- [ 21 ] 林桂兰, 左玉辉. 厦门湾城市化过程的人口资源环境与发展调控. *地理学报*, 2007, 62(2): 137—146.
- [ 22 ] 彭本荣, 洪华生, 陈伟琪, 等. 填海造地生态损害评估: 理论、方法及应用研究. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 715—726.
- [ 23 ] 黄宗国. 赤潮生物. 见: 黄宗国主编. *厦门物种多样性*. 北京: 海洋出版社, 2006. 150—157.
- [ 24 ] 林桂兰, 左玉辉. 海湾资源开发的累积生态效应研究. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 432—440.
- [ 25 ] 边经卫. 对城市开发与控制若干问题的思考. *城市规划*, 2004, 28(7): 25—29.
- [ 27 ] 朱晓东. 地球科学的新思维——现实主义灾变论十年进展与回顾. *地球科学与进展*, 1993, 8(3): 53—57.