

# 基于动态因子的农田生态系统稳定性评价

赵志轩<sup>1,2</sup>, 金鑫<sup>2,3</sup>, 王凌河<sup>2,3</sup>, 张诚<sup>2</sup>, 魏芳菲<sup>4</sup>, 严登华<sup>2</sup>

(1 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2 中国水利水电科学研究院 水资源研究所 北京 100044;

3 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116023; 4 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:**在分析自然生态系统与农田生态系统稳定性内涵差异的基础上,结合国内外已有的研究成果,给出了农田生态系统稳定性的概念,指出维持较高的系统产出是系统稳定性的基本特征,动态波动性是系统动态稳定性的典型特性;分析了农田生态系统模式,并在此基础上构建起区域农田生态系统稳定性评价的指标体系,分为区域生态环境质量、自然和人工投入、产量形成过程和经济社会过程4类共19项指标;利用本文提出的评价模型,以东莞市农田生态系统为例,从时间尺度上对其稳定性进行了评价,结果表明,东莞农田生态系统处于基本稳定状态,反映了评价模型的正确性。

**关键词:**动态因子; 农田生态系统; 稳定性; 评价

中图分类号: S181

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2010)04-0022-05

## Study on Farmland Ecosystem Stability Evaluation Based on Dynamic Factors

ZHAO Zhi-xuan<sup>1,2</sup>, JIN-xin<sup>2,3</sup>, WANG Ling-he<sup>2,3</sup>, ZHANG-Cheng<sup>2</sup>, WEI Fang-fei<sup>4</sup>, YAN Deng-hua<sup>2</sup>

(1 Civil Engineering College, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2 Water Resources Department, China

Institute of Water Resources & Hydropower Research (IWHR), Beijing 100044, China;

3 Department of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

4 Civil Engineering College, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Farmland ecological stability is the foundation of regional farmland ecological security and sustainable development. Based on analysis of differences between the natural ecosystem and farmland ecosystem, and combined with existing studies on the ecological stability in and out of China, the concept of farmland ecosystem stability was developed that keeping a relatively high output and dynamic fluctuation are the basic and typical characteristic, respectively, of the stability of the farmland ecosystem. The farmland ecosystem pattern was analyzed in order to construct an assessment index system, which included regional eco-environmental quality, artificial and natural input process, yield formation process and economy-society process and 19 concrete indices. Dongguan municipality was taken as a case study and its ecological stability situation of farmland from 1990 to 2004 was assessed quantitatively with the assessment indexes. The result showed that farmland ecosystem in Dongguan was at a stable status and indicated the correctness of the evaluation model.

**Key words:** dynamic factors; farmland ecosystem; stability; evaluation

稳定性是生态系统的重要特征之一,也是决定生态系统兴亡的重要特性<sup>[1]</sup>,生态系统稳定性研究在理论和实践中都有重大的意义<sup>[2]</sup>. 自20世纪50

年代 MacArthur 和 Elton 先后提出生态系统稳定性理论以来,稳定性便成为了理论生态学的焦点问题之一<sup>[3]</sup>. 生态学者们围绕稳定性定义<sup>[2-7]</sup>、生物多样性

收稿日期: 2009-09-21

作者简介: 赵志轩(1983—), 男, 博士研究生, E-mail: zhaozx@iwhr.com

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(50721006); “973”项目专题(2006CB403402-3)



与稳定性<sup>[8-10]</sup>、时空尺度与稳定性<sup>[11]</sup>、生态系统稳定性评价等方面做了大量研究. 在稳定性评价方面, 评价对象主要集中在湿地<sup>[12-14]</sup>、山地<sup>[15-16]</sup>、绿洲<sup>[17-18]</sup>、森林<sup>[19-20]</sup>、荒漠<sup>[6]</sup>等自然生态系统. 当前生态系统稳定性评价主要是针对自然生态系统, 对人工生态系统尤其是农田生态系统的稳定性研究仍然较少<sup>[22]</sup>. 农田生态系统覆盖了地球上约30%的陆地面积, 向全世界提供66%的粮食供给, 是地球上最重要的生态系统之一<sup>[21]</sup>. 在过去的50年中, 人口增长和日益恶化的生态环境使世界范围内40%的农业用地出现不同程度的退化, 农田生态系统稳定与否直接关系到其自身健康水平, 并在很大程度上决定了区域农业的可持续发展程度, 开展农田生态系统的稳定性评价研究, 具有重要的理论意义和现实意义. 农田生态系统稳定性随时间呈现动态波动特征, 并存在趋势性, 系统过去稳定并不意味着现在稳定, 更不能说明系统将来是否稳定, 本文针对农田生态系统的特点, 探讨了其系统稳定性概念, 从区域资源、环境及经济社会角度考虑, 构建了稳定性评价的指标体系, 考虑到系统稳定性的时间序列特征, 建立了基于动态因子的稳定性评价模型, 最后以位于珠江三角洲的东莞市农田生态系统为例, 对其系统稳定性进行了评价.

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

东莞市位于广东省中南部, 珠江口东岸, 东江下游的珠江三角洲, 地理坐标为东经113°31′~114°15′、北纬22°39′~23°09′, 属亚热带季风气候, 年平均气温23.3℃, 年均降水量2042.6mm, 水资源丰富, 境内多年平均年径流总量275.64亿m<sup>3</sup>, 地势东南高、西北低. 地貌以丘陵台地、冲积平原为主, 丘陵台地占44.5%, 冲积平原占43.3%, 山地占6.2%. 区内土地肥沃, 是我国传统的农业高产区, 近年来, 种植业发展迅速, 但在生产过程中也产生了较多的生态环境问题, 加上该地区工业化程度较高、城市化进程较快, 给区域的农业生态环境造成了一定压力.

本文的土壤资料来自《中国土种志》和《全国耕地土壤监测论文集》, 受灾面积与成灾面积资料来自1991—2005年《广东农村统计年鉴》, 其他相关资料来自1991—2005年《东莞统计年鉴》.

### 1.2 农田生态系统稳定性评价指标体系

农田生态系统属半自然半人工生态系统. 目前, 国内部分学者对农田生态系统稳定性做了研究<sup>[22-23]</sup>. 农田生态系统模式如图1所示.

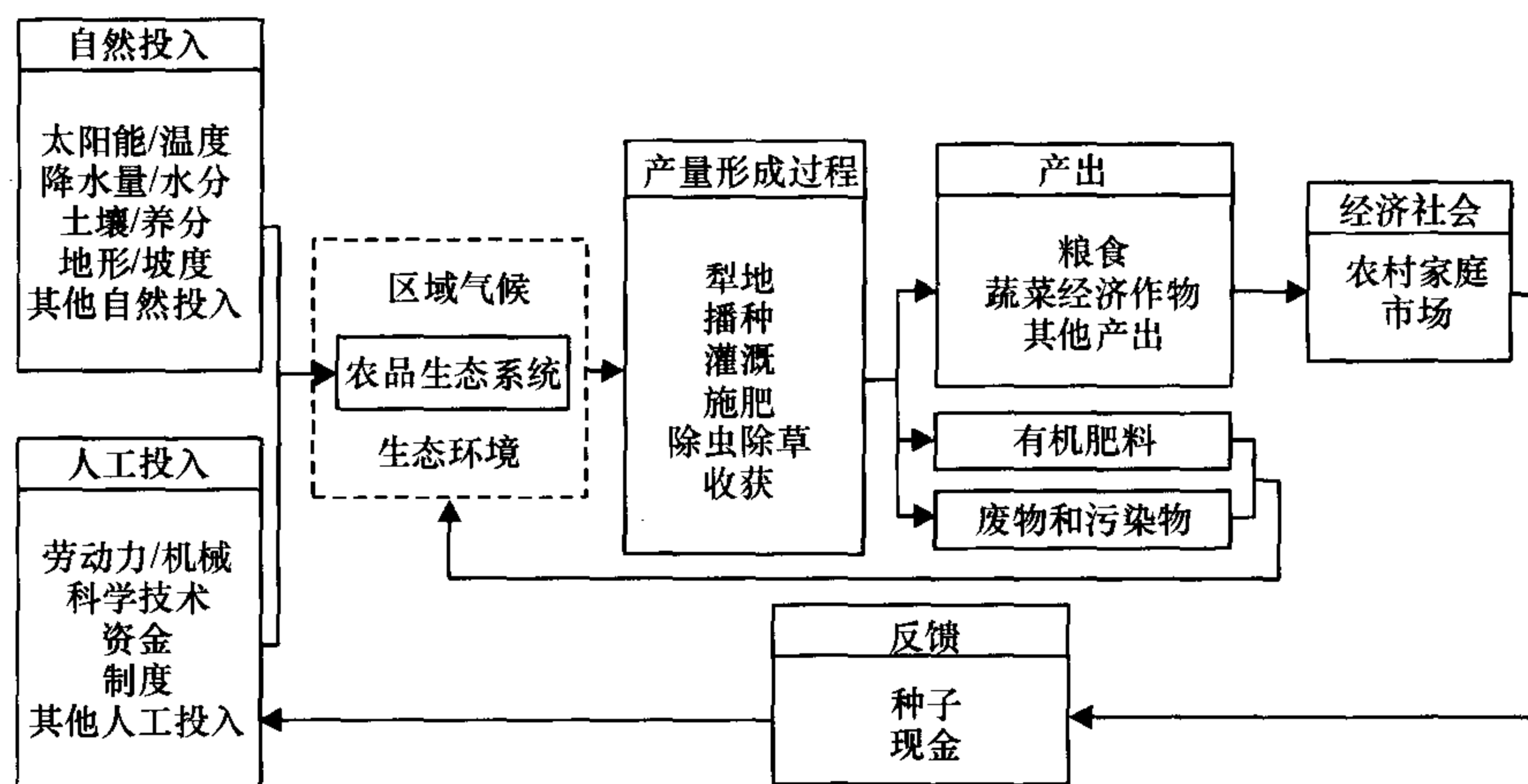


图1 农田生态系统模式图

Fig. 1 Farmland ecosystem pattern

农田生态系统稳定性是指在自然和人为施加的不间断干扰下, 保持系统结构较为合理, 系统物质循环和能量流动能够保持相对平衡, 且系统产出围绕某一量值上下波动的一种动态过程, 该量值可随着科技的进步而提高, 但存在上限. 农田生态系统稳定性评价是以区域农田生态系统稳定性评价作为目标层, 将其表征指标分为系统所处的区域生态环境质量( $C_1$ )、自然和人工投入过程( $C_2$ )、产量形成过程( $C_3$ )和经济社会过程( $C_4$ )4大类分类指标( $C$ ), 考虑指标选择的独立性、科学性、实用性及数据的可获

得性原则, 在咨询专家基础上, 筛选出19项单项指标( $S$ ), 构建起农田生态系统稳定性评价的指标体系.

$C_1$ 有6个单项指标: 区域森林覆盖率( $S_1$ ) = (林地面积/土地总面积) × 100%, 环境固体废弃物负荷( $S_2$ ) = 排放量 - 处理量, 环境污水负荷( $S_3$ ) = 排放量 - 处理量, 农田化肥负荷( $S_4$ , 实物量)/(kg · hm<sup>-2</sup>) = 使用量/农作物播种面积, 农田农药负荷( $S_5$ )/(kg · hm<sup>-2</sup>) = 使用量/农作物播种面积, 农田人口负荷( $S_6$ )/(hm<sup>2</sup> · 人<sup>-1</sup>) = 总耕地面积/总人口数量.

$C_2$ 有5个单项指标: 生育期光能稳定指数( $S_7$ ) =



$(L_1 - \bar{L})/\bar{L} \times 100\%$ , 生育期降水稳定指数荷( $S_8$ ) =  $(P_1 - \bar{P})/\bar{P} \times 100\%$ , 生育期热量稳定指数荷( $S_9$ ) =  $(T_1 - \bar{T})/\bar{T} \times 100\%$ , 式中  $L$ 、 $P$ 、 $T$  分别为生育内日照时数、降雨量、 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$  积温的实际值,  $\bar{L}$ 、 $\bar{P}$ 、 $\bar{T}$  为对应的评价水平年的平均值. 农业机械化程度荷( $S_{10}$ )/( $\text{kW} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 机械总动力/农作物播种面积, 农业技术人员比例荷( $S_{11}$ ) = 农业科技人员总数/农业人口总数  $\times 100\%$ .

$C_3$  有 5 个单项指标: 复种指数荷( $S_{12}$ ) = 农作物播种面积/耕地总面积  $\times 100\%$ , 粮食单产荷( $S_{13}$ )/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = 粮食总产量/种植面积, 土壤有机质含量荷( $S_{14}$ )/% 和土壤速效营养物质荷( $S_{15}$ )/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 为标准检测值, 气象灾害成灾率荷( $S_{16}$ ) = 成灾面积/受灾面积  $\times 100\%$ .

$C_4$  有 3 个单项指标: 农田生产效率荷( $S_{17}$ ) = 农田总产出/总投入  $\times 100\%$ , 农民生产性纯收入( $S_{18}$ )/元, 农业商品率荷( $S_{19}$ ) = 农业商品价值/农产品总价值  $\times 100\%$ .

1.3 数据处理方法与评价模型的建立

1.3.1 指标值的归一化处理 由于各指标的含义及量纲各不相同, 缺乏可比性, 因此必须对各指标的原始数据进行处理, 以消除量纲的影响, 区域农田生态系统稳定性评价指标有正向和负向 2 类, 正向指标(如有效灌溉面积)越大越有利于系统稳定, 负向指标(如污染物排放量)则越小越有利于稳定. 为了使正向和负向指标均能够用来表征系统的稳定性, 将负向指标通过如下公式转换为正指标:

$$I'_{ij} = 1/I_{ij}, \tag{1}$$

式中,  $I'_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  个指标的转换值;  $I_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  个负指标原始值.

本研究采用修正的 Z-Score 法对指标值的原始数据(对于负向指标而言用转换后的数据)进行标准化, 将原始数据转化为标准值, 该方法计算公式为:

$$Z_i = 60 + \frac{x_i - \bar{x}}{10s}, \tag{2}$$

式中,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , 为第  $i$  个指标的多年平均值;  $s =$

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

1.3.2 综合评价指标权重的确定 采用四标度法(1~4)进行打分, 并构造比较矩阵, 然后将比较矩阵转化为判断矩阵, 并对一致性进行检验<sup>[24]</sup>, 若随机一致性比率(CR) < 0.1, 则认为判断矩阵满足一致性要求.

1.3.3 评价模型及方法 由于评价指标体系中每一单项指标均是从某一侧面反映系统的稳定性状况, 为全面反映区域农田生态系统的稳定性, 需将各

指标整合以进行综合评价, 评价模型如下:

$$R = S \times W^T, \tag{3}$$

式中,  $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$  为  $n$  个评价水平年农田生态系统稳定性评价结果向量;  $S = (S_{ij})_{n \times m}$  为  $n$  个水平年各单项指标的无量纲数据矩阵;  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  为  $m$  个评价指标的权重向量.

农田生态系统稳定性体现为一种不断发展演变的动态过程, 其稳定性是一种趋势, 而非一个(组)固定的数值, 因此农田生态系统稳定性最终由所研究区域一定时段内各年的系统稳定性综合评价指数值所构成的曲线的趋势线斜率来衡量<sup>[25]</sup>, 分为以下 4 种情况:

$$K \in \begin{cases} k < -0.15, \text{不稳定} \\ -0.15 \leq K \leq 0, \text{基本不稳定} \\ 0 < K < 0.15, \text{基本稳定} \\ K > 0.15, \text{稳定} \end{cases} \tag{4}$$

2 结果与分析

2.1 指标权重计算结果

根据各指标相对重要性建立判断矩阵, 并计算得到的判断矩阵单排序及层次总排序, 结果见表 1 和表 2.

表 1 矩阵单排序计算结果<sup>1)</sup>

| Tab. 1 Weight value of the indices to its upper index layer |                  |                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| $C$                                                         | $C$ 权重值( $W_c$ ) | $S$ 权重值向量( $W_s$ )                                                        | 一致性比率(CR) |
| $C_1$                                                       | 0.176 696        | [0.148 26, 0.123 45, 0.166 42, 0.186 80, 0.18 120, 0.193 87] <sup>T</sup> | 0.0 712   |
| $C_2$                                                       | 0.232 545        | [0.178 92, 0.205 53, 0.143 63, 0.232 02, 0.239 90] <sup>T</sup>           | 0.090 5   |
| $C_3$                                                       | 0.314 215        | [0.223 44, 0.236 32, 0.152 23, 0.182 81, 0.205 20] <sup>T</sup>           | -0.074 2  |
| $C_4$                                                       | 0.276 544        | [0.435 98, 0.346 04, 0.217 99] <sup>T</sup>                               | 0.0 779   |

1)  $C$  指标权重的一致性比率(CR)为 -0.060 36.

表 2 层次总排序计算结果

| Tab. 2 Weight value of the indices to the target layer |                                                                                 |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $C$                                                    | 层次总排序权重向量( $W_i$ )                                                              |
| $C_1$                                                  | [0.026 197, 0.021 814, 0.029 405, 0.033 006, 0.032 018, 0.034 257] <sup>T</sup> |
| $C_2$                                                  | [0.041 608, 0.047 795, 0.034 400, 0.053 955, 0.055 788] <sup>T</sup>            |
| $C_3$                                                  | [0.070 207, 0.074 257, 0.047 831, 0.057 443, 0.064 477] <sup>T</sup>            |
| $C_4$                                                  | [0.120 567, 0.095 694, 0.060 283] <sup>T</sup>                                  |

2.2 稳定性评价结果

根据公式(2)计算得到的归一化数据矩阵, 利用表 1 和表 2 中各指标权重值, 通过公式(3)分别计算得到各评价水平年  $C$  的稳定性指数及综合稳定指数, 做出区域农田生态系统稳定性动态变化曲线并标出其趋势线, 结果见图 2 和图 3.

区域生态环境质量稳定性指数如图 2a. 趋势线方程斜率( $K$ ) = -0.005, 处于基本不稳定状态, 稳定性指数从 1990 年的 0.637 下降为 2004 年的 0.572,



降幅为12.2%,年均下降2.44%,造成该指数下降的主要原因是化肥、农药使用量的快速增加及固体污染物、污水净排放量增大所致,如化肥、农药的使用强度分别由1990年的1 913.41、28.02 kg/hm<sup>2</sup>,增加为1994年的1 976.73、39.38 kg/hm<sup>2</sup>,分别增加3.3%和45.5%;1995—1998年稳定性指数缓慢回升

到0.656,主要原因是在此期间单位面积化肥、农药用量有所减小,固体废弃物和污水排放量虽有增加,但增速相对缓慢,同时森林覆盖率增幅较大,从1995年的27.83%上升为1998年的29.9%;1998年以后,由于各负向指标指示量值总体有所上升(除2004年外),使得C<sub>1</sub>稳定性总体呈逐渐下降趋势。

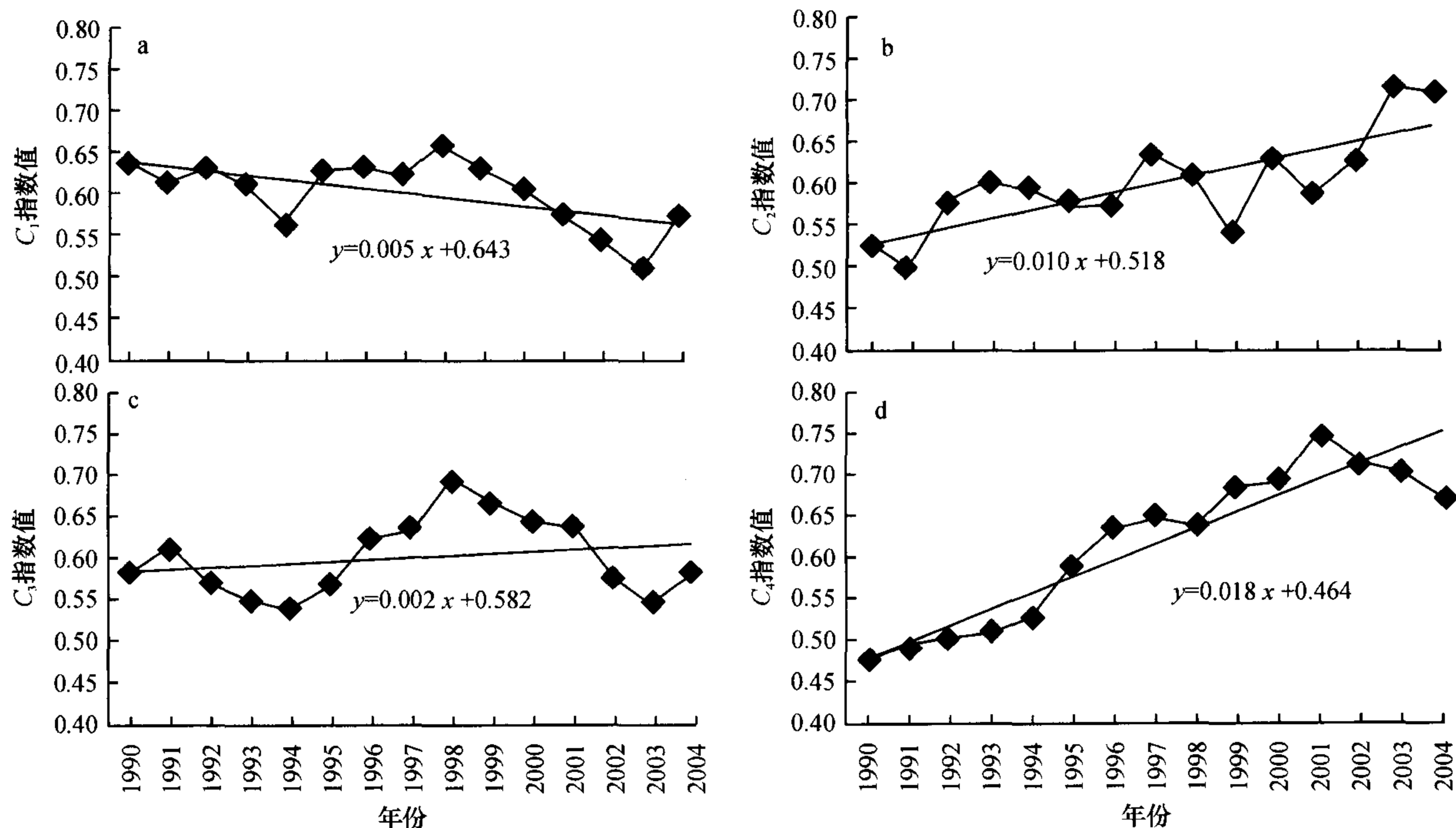


图2 分类指标(C)指标稳定性评价结果

Fig. 2 The evaluation results of the stability status for C index layer

自然和人为投入稳定性指数见图2b.该指数趋势线方程斜率( $K$ )=0.01,处于基本稳定状态,稳定性指数由1990年的0.525上升为2004年的0.711,年均增幅2.37%.其中,自然投入部分随时间呈现动态波动特征,人为投入则呈现稳定增长状态,如农业科技人员比例从1990年的0.16%上升为2004年的0.36%,增幅为1.25倍;农业机械化程度由1990年的11.71 kW/hm<sup>2</sup>,上升为2004年的55.26 kW/hm<sup>2</sup>,增幅3.72倍;自然和人工投入的综合效应使得C<sub>2</sub>指标的稳定性指数在动态波动过程中呈现总体上升的趋势。

产量形成过程稳定性指数见图2c. C<sub>3</sub>指数趋势线方程斜率( $K$ )=0.002,处于基本稳定状态,但指数值的上下波动较大,主要是因为区域内部粮食单产与气象灾害成灾率均呈动态波动特征.15年来,区域内农田土壤有机质及速效养分含量呈上升趋势,但增幅较小,如有机质含量增加0.53%,速效氮、磷、钾分别增加14.76%、54.76%和16.93%,这有效地保证了农作物生长所必需的营养成分,有利于系统的稳定.区域内农作物复种指数逐年减小,从1990年的209.47%下降为2004年的94.44%,年均下降

3.66%,其中1993年降幅达23.31%,对产量形成过程稳定性指数造成了负面影响。

社会经济过程稳定性指数见图2d.趋势线方程斜率( $K$ )=0.018,处于基本稳定状态.15年来,稳定性指数值由0.478上升为0.672,主要是由于各单项指标指示量值均呈持续稳定上升趋势,如农民人均生产性纯收入从1990年的1 359元上升为2004年的8 586元。

区域农田生态系统稳定性综合指数见图3.该指数反映了自然和人为干扰下农田生态系统稳定性的综合特征,是各分类指标对系统稳定性贡献的综合体现,其趋势线方程斜率( $K$ )=0.006,表明东莞农田生态系统总体处于基本稳定状态,总的看来,在15年的时间里,稳定性指数由0.557上升为0.639,这主要是因为自然和人工投入过程、经济社会过程中各单项指标值以及产量形成过程中部分单项指标有所增加,区域生态环境质量和产量形成过程指数值下降,体现了自然灾害和生态环境恶化给农田生态系统稳定性构成了威胁,稳定性指数呈现动态波动特征,是农田生态系统在自然和人为双重干扰下响应的具体体现。



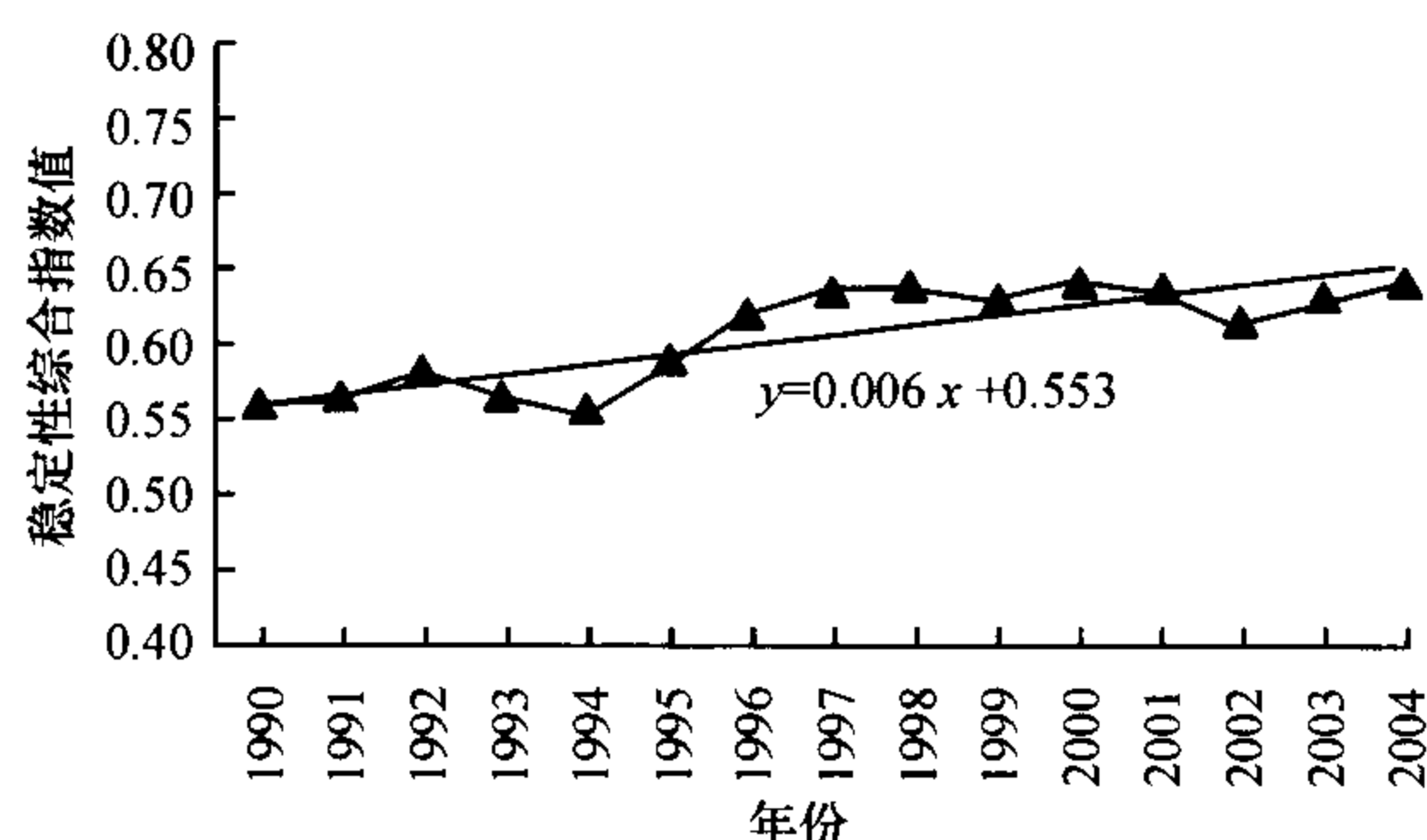


图3 农田生态系统稳定性综合评价结果

Fig. 3 The evaluation results of the stability status for the farmland ecosystem

### 3 结论

本文在分析农田生态系统与自然生态系统稳定性内涵的基础上,结合前人的研究成果,将农田生态系统稳定性初步定义为在自然和人为二元干扰下,使系统结构较为合理,系统物质循环和能量流动能够保持相对平衡,且系统产出始终围绕某一量值上下波动的一种动态过程。

通过分析农田生态系统模式,结合其稳定性概念,将农田生态系统稳定性评价指标分为区域生态环境质量、自然和人工投入、产量形成过程社会经济4大类共19项指标,构建起评价指标体系,利用4标度层次分析法确定各指标权重值,基于各指标因子动态变化特征,建立了系统稳定性综合评价模型,并应用于广东省东莞市农田生态系统。模型计算结果基本反映了该地区农田生态系统的稳定性特征,初步表明了模型的正确性。

本文在选择稳定性表征指标时,考虑了指标的时间维。这种方式对数据量要求较高,受资料所限,研究中选定的稳定性表征指标可能并不完善。为更加科学客观评价区域农田生态系统稳定性,下一步研究重点是结合区域农田生态系统的具体特征,通过试验进一步研究不同指标及其量值(阈值)与系统生态稳定性之间的关系,分析各指标对系统稳定性影响的敏感程度,以确定趋势线方程斜率值与系统实际稳定状况之间的相关关系,进一步完善指标体系和模型结构。

#### 参考文献:

- [1] 冯耀宗. 人工生态系统稳定性概念及其指标[J]. 生态学杂志, 2002, 21(5): 58-60.
- [2] 马风云. 生态系统稳定性若干问题研究评述[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 401-407.
- [3] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 等. 生态系统稳定性定义剖析[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2635-2640.
- [4] PIMM S L. The balance of natural[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1991.
- [5] VOLKER G, CHRISTIAN W. Babel or the ecological sta-

bility discussions: An inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion[J]. Oecologia, 1997, 109: 23-334.

- [6] 丘君, 陈利顶, 高启晨, 等. 施工干扰下的生态系统稳定性评价: 以西气东输管道工程沿线新疆干旱荒漠区为例[J]. 干旱区地理, 2003, 26(4): 316-322.
- [7] 张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究综述[J]. 生态学杂志, 2003, 22(4): 42-48.
- [8] MICHEL L, NARAYAN B. Phenotypic diversity and stability of ecosystem process[J]. Theoretical Population Biology, 1999, 56(1): 29-47.
- [9] DOAK D F, BIGGER D, HARDING E K, et al. The statistical inevitability of stability: Diversity relationship in community ecology[J]. American Naturalist, 1998, 151: 264-276.
- [10] 黄建辉, 韩兴国. 生物多样性和生态系统稳定性[J]. 生物多样性, 1995, 3(1): 31-37.
- [11] ANKE J, CARL B, PETER S W. Scale, the dynamic stability of forest ecosystems, and the persistence of biodiversity[J]. Silva Fennica, 2002, 36(1): 393-400.
- [12] 王茜, 吴胜军, 肖飞, 等. 洪湖湿地生态系统稳定性评价研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 178-180.
- [13] 王玲玲, 曾光明, 黄国和, 等. 湖滨湿地生态系统稳定性评价[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3406-3410.
- [14] 张福群, 孙丽娜, 金成洙, 等. 基于集对分析的卧龙湖湿地生态系统稳定性评价[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 778-780.
- [15] 郑国璋, 张爱国, 张淑莉, 等. 山地稳定性研究的动态数值模型[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 363-367.
- [16] 朱瑜馨, 赵军, 曹静. 祁连山山地生态系统稳定性评估模型[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 33-37.
- [17] 周跃志, 潘晓玲, 吕光辉, 等. 现代绿洲稳定性评价: 以新疆阜康绿洲为例[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21(3): 178-181.
- [18] 张金萍, 张静, 孙素艳. 灰色关联分析在绿洲生态稳定性评价中的应用[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 195-200.
- [19] 李树人, 赵勇, 刘思峰, 等. 河南省森林生态系统类型划分及稳定性分析[J]. 河南农业大学学报, 1994, 28(2): 111-118.
- [20] 郑元润, 徐文铎. 沙地云杉种群稳定性的研究[J]. 生态学杂志, 1996, 15(6): 13-16.
- [21] 武兰芳, 欧阳竹, 唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2740-2748.
- [22] 李新旺, 门明新, 王树涛, 等. 基于过程的河北平原农田生态系统稳定性评价[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 431-439.
- [23] 曹文志, 王磐基. 区域农业生态系统稳定性分析与评价的理论和方法[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 1998, 28(1): 70-75.
- [24] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122.
- [25] 江凌, 吕光辉, 汪溪远, 等. 城市化进程中的绿洲生态系统稳定性评价探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 28-32.

【责任编辑 周志红】