

# 基于熵权的海岛地区城市生态系统健康动态评价研究

——以舟山群岛新区为例

吴婧慈<sup>1,2</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 邵晨<sup>1,2</sup>, 赵晟<sup>1,2</sup>

(1.浙江海洋大学 舟山 316022; 2.国家海洋设施养殖工程技术研究中心 舟山 316022)

**摘要:**文章将舟山群岛新区作为研究对象,以结构、功能、协调这3个基准点为视角,构建舟山群岛新区城市生态系统健康的评价指标体系;运用熵权法进行客观赋权,探讨海岛地区城市生态系统健康的主要影响因素;分析系统各主要因素间彼此的联系和相互关系,评价舟山城市生态系统健康动态,以便进一步提高舟山群岛新区城市生态系统健康水平,优化经济结构,为加强海岛地区生态与环境管理,促进海岛地区经济发展提供决策依据。研究结果表明:近年来,舟山群岛新区城市生态系统健康程度以稳中有升的趋势在不断提高;结构指数有小幅波动,功能指数波动显著,改善明显,其中,城市环境是造成结构指数波动的主要原因。城市文明率较低和可持续性持续走低是城市协调度的主要限制因素。由此,优化资源配置、改善经济结构、持续减排、提升城市环境是确保舟山群岛新区城市生态系统健康水平的关键。

**关键词:**舟山群岛新区;城市生态系统;熵权法;生态评价

中图分类号:P74

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)07-0053-07

## Urban Ecosystem Health Evaluation of the Dynamic Island Area Based on the Entropy Weight Method: A Case Study of Zhoushan Islands

WU Jingci<sup>1,2</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, SHAO Chen<sup>1,2</sup>, ZHAO Sheng<sup>1,2</sup>

(1.Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;

2.National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhoushan 316022, China)

**Abstract:** In this paper, the Zhoushan islands new district was considered as the research object, an urban ecosystem health evaluation index system was built on the three basic viewpoints such as structure, function and coordination, by objectively using the entropy weight method, to explore the main impacting factors of the urban ecosystem health in island area. The mutual contact and relationship between main factors of the system were analyzed to evaluate the dynamic of ecosystem health in Zhoushan city, in order to further improve the level of Zhoushan islands new district urban ecosystem health, optimize the economic structure, and strengthen the management of ecol-

收稿日期:2017-01-10;修订日期:2017-06-01

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY15D060006);科技部国际科技合作项目(2015DFR30450).

作者简介:吴婧慈,硕士研究生,研究方向为海岛开发与保护

通信作者:赵晟,教授,博士,研究方向为海洋生态,生态经济,环境管理与规划及可持续发展等

ogy and environment in island region and promote the economic development for decision-making basis. The results showed that in recent years, the level of ecosystem health in Zhoushan islands new district urban was increasingly improving. The structure index slightly fluctuated and the function index fluctuated and improved significantly, among which, the urban environment is the main cause of structure index fluctuation. The low urban civilization rate and falling sustainability were the main limiting factors of urban coordination degree. As a result, optimization of the allocation of resources, improvement of the economic structure, continuously reducing emission, and improving the urban environment are the key ways to ensure the ecosystem health level of Zhoushan islands new district urban.

**Key words:** Zhoushan islands, Urban ecological system, The entropy weight method, Ecological evaluation

## 1 引言

伴随着人们对生态环境的日益关注,对生态系统健康的研究也越发深入,众多学者分别从不同的学科视角和研究个案出发,对生态系统健康的概念、生态系统健康的影响因子及评价指标的选择和方法等方面进行了研究<sup>[1-2]</sup>。早期学者主要关注自然生态系统的健康,大部分研究主要集中在湖泊/流域生态系统健康评价<sup>[3]</sup>、森林生态系统健康长期监测<sup>[4]</sup>、农业生态系统健康评价<sup>[5]</sup>等方面。但近些年来,研究热点转移到对城市生态系统健康的研究,城市生态系统健康评价是按照生态系统的观点,运用生态学和环境科学的相关理论和方法,对城市生态系统结构、功能和协调性等进行综合评价,以确定该系统的发展水平、发展潜力和制约因素,是城市生态规划、生态建设和生态管理的依据<sup>[6]</sup>。正确评价城市生态系统,了解城市生态系统健康状况,对于引导城市发展方向以及实现各方发展的可持续均具有重要意义。

国内外有关城市生态系统健康的研究已有很多。国际上,在“人类健康的生态系统研究方法”(Ecosystem Approaches to Human Health)的研究报告中,就曾详尽地分析探讨了城市生态系统健康的内涵、标准、评价指标、城市生态系统的管理目标、管理方式和采取的政策措施等<sup>[7]</sup>。Jerry 等<sup>[8]</sup>通过采用驱动力—压力—状态—暴露—影响—响应模型,探讨了城市生态系统健康的概念及建立评价指标体系的理论、方法的建立问题。Guidotli<sup>[9]</sup>对城

市生态系统健康的研究进展及研究趋势进行了综述分析。国内,郭秀锐等<sup>[10]</sup>应用生态系统健康的理论与方法,探讨城市生态系统健康评价的方法,采用模糊数学方法建立了评价模型,并以广州市为例,参比北京、上海,对其作生态系统健康状况的比较评价。曾勇等<sup>[11]</sup>采用压力—状态—响应模型构建出城市生态系统健康评价指标体系框架,建立模糊优选评价模型,并以上海为例做出评价。官冬杰等<sup>[12]</sup>通过定性和定量分析构建了五大类 32 项的评价指标体系,提出评价城市生态系统健康的初级指标体系,以重庆为对象作实例研究,将北京、天津、上海作为参比城市进行了对比分析评价。马爽爽等<sup>[13]</sup>利用自相似理论与分形理论计算系统分维数,建立了基于土地利用空间格局的区域生态系统健康评价指标体系,借助于 GIS 和数学分形理论对湖州市城市生态系统健康进行定量评估。魏婷等<sup>[14]</sup>采用突变级数法,对厦门城市生态系统健康进行了定量评估,通过时间序列的比较对系统健康的发展趋势进行了分析。于苏建<sup>[15]</sup>采用投影寻踪模型,对福州市、厦门市和泉州市 2007 年的城市生态系统健康状况进行评价。郭锐利等<sup>[16]</sup>建立熵权综合评价模型,对 2005—2009 年期间重庆市城市生态系统健康进行了评价,建立 GM(1,1)灰色预测模型,对 2010—2015 年期间重庆市生态系统健康进行了动态预测分析。景彩娥等<sup>[17]</sup>采用主观赋权法和 CRITIC 法确定权重,运用模糊综合法分析了 2000—2009 年太原市城市生态系统健康水平,同时

应用灰色预测模型对 2010—2050 年太原城市生态系统健康水平进行预测。

综上所述,已有的城市生态系统健康研究主要是对内陆区域的城市评价,针对海岛地区的城市生态健康研究较少,海岛地区由于其特殊的地理区位,在生态、经济、社会等方面都存在着其独特特征。从地理环境角度上看,海岛地理位置特殊,相对孤立地处于海洋之中,岛屿和大陆分开,岛与岛之间和岛与陆地之间联系较为困难,长期分离而形成了不同的生态条件。其次,由于海岛的地理隔离和生态隔离,其土地资源及森林资源相当有限,资源稀缺,生态系统脆弱,淡水资源短缺,环境承载力有限,经济发展存在较强局限性和依赖性<sup>[18]</sup>。由于其自然环境、生态环境的特殊性,海岛地区的城市发展状况必然不同于内陆县域经济或沿海区域经济,更不同于现代化都市,它在生态环境、经济和社会发展等方面都具有独特性。针对目前的研究现状,在总结以往学者研究成果的基础上,本研究尝试构建海岛地区城市生态系统健康评价的指标体系,以舟山群岛新区为实例研究对象对其做城市生态健康动态评价。

舟山是我国首个以群岛建制的地级市,近年来发展迅猛,基础设施建设、人口及用地规模等都有着不同程度的提升与扩大。在新区建设的过程中不免存在着资源浪费、环境污染、大范围废弃物排放等诸多问题,对于自然正常的生态系统和功能结构造成了巨大的冲击与破坏。生态环境问题不容忽视,所以,科学地评价舟山群岛新区城市生态系统健康状况十分必要,基于此,本研究选取近 5 年的数据,运用“熵权法”对数据进行处理分析,评价舟山群岛新区城市生态系统健康状况。

## 2 评价指标体系

参考宋永昌教授(我国城市生态学专家)等<sup>[19]</sup>生态城市的指标体系与评价方法一文,以综合性、代表性、可比性、可操作性为原则确定本研究的评价指标体系,设置了舟山群岛新区生态系统健康的评价标准<sup>[20]</sup>。本研究指标体系主要划分为结构、功能、协调 3 个主要要素,共涉及十大因素,30 项指标(表 1),其中权重的确定由本研究 2.2.2 的方法计

算得出。指标体系中,结构是表现生态系统结构的复杂性,涉及人口结构、基础设施、城市环境、城市绿化 4 个方面;功能是反映相关环境污染符合程度,以物质还原、资源配置、生产效率 3 个方面来得以体现;协调是衡量在发展过程中系统及其内部各个要素间彼此的和谐程度,它能体现系统无序至有序的变化趋势,以社会保障、城市文明、可持续性 3 项指标来得以体现。30 项指标中,除环境噪声、万元产值能耗、失业率、刑事案件发生率的指标性质为“—”外,其余均为“+”。

表 1 舟山群岛新区生态系统健康评价指标体系及其权重

| 一级指标 | 二级指标                        | 三级指标                         | 权重      |
|------|-----------------------------|------------------------------|---------|
| 结构   | 人口结构                        | 人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )   | 0.020 2 |
|      |                             | 人均期望寿命/岁                     | 0.030 8 |
|      |                             | 中高等学历人数/万人                   | 0.046 0 |
|      | 基础设施                        | 人均道路面积/(m <sup>2</sup> /人)   | 0.026 6 |
|      |                             | 人均住房面积/(m <sup>2</sup> /人)   | 0.019 8 |
|      |                             | 万人病床数/(床/万人)                 | 0.035 0 |
|      |                             | 污染控制综合得分                     | 0.026 8 |
|      | 城市环境                        | 空气质量/(mg·m <sup>-2</sup> )   | 0.023 2 |
|      |                             | 环境噪声/dB(A)                   | 0.026 5 |
|      |                             | 人均公共绿地面积/(m <sup>2</sup> /人) | 0.019 9 |
| 城市绿化 | 城市绿地覆盖率/%                   | 0.030 8                      |         |
|      | 自然保留地面积率/%                  | 0.227 0                      |         |
| 功能   | 物质还原                        | 固体废物无害化处理率/%                 | 0.020 1 |
|      |                             | 废水处理率/%                      | 0.021 2 |
|      |                             | 工业废气处理率/%                    | 0.020 7 |
|      | 资源配置                        | 百人电话数/(部/百人)                 | 0.019 6 |
|      |                             | 人均生活用水/(L/人)                 | 0.035 4 |
|      |                             | 人均生活用电/(kW·h/人)              | 0.026 6 |
| 生产效率 | 人均 GDP/(元/人)                | 0.025 9                      |         |
|      | 万元产值能耗/(吨/万元)               | 0.039 2                      |         |
|      | 土地产出率/(万元/km <sup>2</sup> ) | 0.024 0                      |         |
| 协调   | 社会保障                        | 人均保险费/(元/人)                  | 0.028 0 |
|      |                             | 失业率(市区)/%                    | 0.026 6 |
|      | 城市文明                        | 劳保福利占工资比重/%                  | 0.027 4 |
|      |                             | 万人藏书量(市区)/(册/万人)             | 0.026 9 |
| 可持续性 | 城市卫生达标率(市区)/%               | 0.012 5                      |         |
|      | 刑事案件发生率/(件/万人)              | 0.029 1                      |         |
|      | 社会服务投资占 GDP 比重(市区)/%        | 0.037 8                      |         |
|      |                             | 科教投入占 GDP 比重(市区)/%           | 0.032 6 |
|      |                             | 城乡收入比/%                      | 0.026 7 |

### 3 舟山群岛新区生态系统健康评价

#### 3.1 数据来源及说明

本研究的数据主要来源于《浙江省统计年鉴》(2011—2015年)、《舟山市统计年鉴》(2011—2015年)、《舟山市环境质量报告》、《舟山市国民经济和社会发展统计公报》(2010—2015年)以及浙江省环境监测中心、浙江省统计局、舟山市环保局、舟山市统计局等各大官方网站所公布的官方数据。其中,评价指标中的人均GDP、人均生活用水、人均生活用电、人口密度、中高等学历人数、人均住房面积、城镇化率、人均公共绿地面积、建成区绿化覆盖率、自然保留地面积率、废水处理率、工业废气排放量、固体废气无害化处理等数据均来源于《舟山市统计年鉴》;城镇居民人均住房面积、人均期望寿命、人均道路面积等数值源于《浙江省统计年鉴》;空气优良率、环境噪声、污染控制综合得分等数据均源于《舟山市环境质量报告》;万人病床数、万人藏书量、中高等学历人数、人均保险费、失业率(市区)、百人电话数等源于《舟山市国民经济和社会发展统计公报》;社会服务投资与当年市区财政支出的比值即为社会服务投资占财政支出的比重(市区);科教投入与当年地区生产总值的比重即为科教投入占财政支出的比重。

#### 3.2 评价方法

##### 3.2.1 归一化

首先需对数据统一进行标准化处理,以消除各评价指标单位、数据性质等量度上存在的差异。设 $U_1$ 为经济发展子系统参量, $U_2$ 为居民生活子系统参量, $u_{ij}$  ( $i=1,2; j=1,2,\dots,m$ )为经济发展子系统及居民生活子系统内部的基础观测指标。定义 $U_1 = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} u''_{ij}$ 为众多观测指标组成的两个子系统的外在发展功效,其中 $\lambda_{ij}$ 为各指标的权重,有 $\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ;  $u''_{ij}$ 为第 $i$ 个子系统的第 $j$ 个指标经过归一化后的标准化数值,归一化的具体过程为:

对于正向指标 $u''_{ij}$ ,令

$$u''_{ij} = \left[ \frac{\max_{1 \leq i \leq n} u_{ij} - u_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} u_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} u_{ij}} \right] \times 0.9 + 0.1$$

对于逆向指标 $u_{ij}$ ,令

$$u''_{ij} = \left[ \frac{u_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} u_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} u_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} u_{ij}} \right] \times 0.9 + 0.1$$

##### 3.2.2 权重的确定

对于变量的赋权,可以使用“主成分分析法”,也可以使用“熵权法”,本研究主要利用“熵权法”这一相对更加客观的赋权方法。以各项指标的变异程度为基准,用信息熵计算出各项指标的熵权,再通过熵权对各项指标的权重进行修正,最终得出较为客观的指标权重。具体过程如下。

(1)对指标数据进行归一化处理,得到归一化后的数据 $u''_{ij}$ 。

(2)计算第 $j$ 个指标下的第 $i$ 个子系统占该指标的比重( $p_{ij}$ )。

$$p_{ij} = \frac{u''_{ij}}{\sum_{i=1}^n u''_{ij}}$$

(3)计算第 $j$ 个指标的熵值( $e_{ij}$ ):

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

其中,调节系数 $K=1/\ln(n)>0$ 。

(4)计算第 $j$ 个指标的差异系数。对第 $j$ 个指标,其值的差异越大,对方案评价的作用就越大,熵值就越小。

定义差异系数为

$$g_i = \frac{1 - e_j}{m - E_e}, \quad E_e = \sum_{j=1}^m e_j$$

当 $0 \leq g_j \leq 1$ 时, $\sum_{j=1}^m g_j = 1$

(5)求权重。

由于 $\sum_{j=1}^m g_j = 1$ ,故差异系数就为所求权重。

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} = g_j, \quad j=1,2,\dots,m$$

(6)综合得分

$$p = \sum_{j=1}^m \omega_j p_{ij}, \quad i,j=1,2,3,\dots,m$$

依据以上方法与步骤,并根据2010—2014年的基础数字。对舟山群岛新区进行了逐级指标的计算。其结果见表2。

表2 舟山群岛新区生态系统二级综合指标变化值

| 二级指标 | 年份      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|
|      | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    |
| 人口结构 | 0.051 1 | 0.033 1 | 0.041 1 | 0.039 5 | 0.065 2 |
| 基础设施 | 0.024 7 | 0.029 8 | 0.053 7 | 0.056 6 | 0.063 5 |
| 城市环境 | 0.050 6 | 0.039 7 | 0.0538  | 0.025 7 | 0.046 8 |
| 城市绿化 | 0.277 5 | 0.273 5 | 0.267 7 | 0.253 1 | 0.232 0 |
| 物质还原 | 0.042 4 | 0.053 8 | 0.022 9 | 0.055 3 | 0.061 9 |
| 资源配置 | 0.010 6 | 0.040 1 | 0.069 7 | 0.066 1 | 0.048 8 |
| 生产效率 | 0.014 1 | 0.022 5 | 0.041 4 | 0.072 4 | 0.089 0 |
| 社会保障 | 0.032 9 | 0.040 1 | 0.046 4 | 0.052 2 | 0.057 4 |
| 城市文明 | 0.031 8 | 0.022 1 | 0.022 3 | 0.024 6 | 0.038 5 |
| 可持续性 | 0.094 7 | 0.065 5 | 0.037 0 | 0.042 5 | 0.012 7 |
| 综合   | 0.630 2 | 0.620 1 | 0.655 8 | 0.688 1 | 0.715 9 |

## 4 结果分析与评价

### 4.1 结构

指数标准化后数值越大,其结构功能越好,生态健康的程度越高,从表2可以看出,2010—2014年人口结构虽有小幅波动但总体趋势呈现为稳中求升。人口结构能反映出一定时间与区域内的人口总体内部各不同性质规定性的数量及其比例关系,同时也能反映出一定时间及区域内的社会情况和经济状况,由表2可以看出,基础设施也呈现逐年增长的趋势,这正好应对了舟山趋好的社会经济状况。但城市环境在2010—2014年期间有所波动,是影响结构指数的关键因素。2010—2014年,基础设施、人口结构、城市环境与城市绿化四大指标的得分排序由高到低排列大致为:城市绿化、人口结构、基础设施、城市环境。城市环境指标最低,舟山群岛新区常住人口的人口密度较大,另外每万人口中的中高等学历人数、人均道路面积、城市绿化率、人均住房面积及其人均占有绿地面积等指标偏低等级。在城市环境方面,从5年的舟山市环境公报中的数据来看,空气质量一直保持着良好水平,但酸雨频率并没有大幅度减少,市民的主要引用水源地(水库)水质保持良好,但河道和翻水入库的引用水源地水质却有所欠缺,且有下降趋势,城区河道水质污染较为严重,海洋环境形势不容乐观,赤潮发生频率偏高,但从总体上看,舟山群岛新区生态系

统的各项指标发展情况均趋于标准值。相信舟山群岛新区的生态城市建设会随着城市用地结构调整和基础设施的改善而得到乐观的发展。

### 4.2 功能

由表2可以看出在2010—2014年,物质还原指数波动显著,改善明显;2012年物质还原处于谷值主要由于当年工业废气排放量的迅猛增加,以及固体废弃物无害化处理相较往年有所降低而导致。随着舟山群岛新区的工业废气排放量递减,且废气废水的无害化处理率有所上升,可以看出在2012年之后物质还原程度有了明显改善。从表2中还可以看出,资源配置在2012—2013年间有下降趋势,而物质还原在这一年间呈现与资源配置对应趋势的增长,总体来说,物质还原与资源配置的能力基本相当,生产效率一直保持着匀速增长的趋势。从功能角度出发,2010—2014年的5年间,3项指标的得分排序由高到低依次为:生产效率、物质还原、资源配置。数据显示舟山群岛新区污染物的回收利用能力处于较低水平,有部分企业仍旧处于高污染、高能耗状态。并且舟山群岛新区中各领域的高科技运用并不发达,且现代化高科技生态工业园区也较少。由此可见,要提高舟山群岛新区城市生态系统的功能指数,应当着力于优化资源配置,提高固废无害化处理率,实现污染物的次序减排。

### 4.3 协调

由表2可以看出;2010—2014年社会保障稳步增长;城市文明有所波动,2010—2011年处于下降趋势,2011—2013年相对稳定,而后逐渐改善;可持续性一直处于下降趋势,且下降幅度大,从数据中得出,造成可持续性下降的原因主要在于社会服务投入与科教投入的降低,且城乡收入比也有下降趋势。基于协调指数,5年来其3项指标的得分排序由高到低依次为:社会保障、可持续性、城市文明。可持续性的走低与城市文明率偏低是制约城市协调度的主要限制因子。3项指标之间呈现有规律的差异。从城市生态系统的协调度来看,要提升城市协调度需要着力于控制可持续性指数的稳定和加强城市文明的建设,以此,加强对社会服务与科教文化产业的投入,提高工资福利水平和农民的收入

水平以减小城乡差异等,也在一定程度上有助于提升协调指数。与此同时,着力改善投资环境,吸引资金人力等要素的流入,做好人才的引进使用和后勤保障工作。

#### 4.4 综合指数

经过标准化处理后,综合指数的情况如图1所示,2010—2014年,舟山群岛新区城市生态系统健康状况是稳中有升,生态系统健康程度在不断提高。其中2011—2014年健康指数有明显增长,主要源自2011年舟山群岛新区正式写入全国“十二五”规划,在转型升级、生态保护等多方面设立了明确目标。并且,在浙江省委制定的“十二五”规划也将舟山群岛新区作为浙江省海洋经济发展的核心区块,各方都在加大投入,所以使得5年间舟山群岛新区的社会和经济情况都处于稳中有升的趋势,生态系统健康也趋于上升状态。

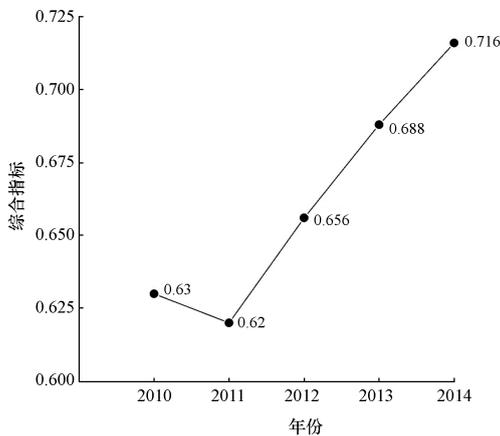


图1 舟山群岛新区生态系统评价综合指数

## 5 结论对策及展望

综上所述,舟山群岛新区城市生态系统健康程度不断提高,结构指数有小幅波动,城市环境是导致结构指数波动的主要原因,其中控制污染物的持续减排是改善城市环境的关键因素。正是由于实施了一系列的污染治理措施,使得2011—2014年主要污染物快速减排,环境质量明显改善,进而促进了舟山群岛新区城市生态系统健康程度的快速改善。所以,要持续提高舟山群岛新区城市生态系统健康水平,需进一步优化经济结构,确保主要污染物的持续减排是关键。功能指数波动显著,改善明显。城市文明较低和可持续性持续下降是限制协

调指数的关键因素,所以,需加强对社会服务和对科教文化产业的投入,提高工资福利水平,提高农民的收入水平,减小城乡差异以提升生态系统协调指数。随着城市的发展,其基础设施建设会不断完善,系统的结构水平必然会在一定程度上有所提高,从生态系统的协调度上可以看出,系统功能的调整与改善是慢于结构的,但相信只要城市生态系统结构得到了优化,并随着城市的经营管理水平的提高,舟山群岛新区城市生态系统的功能和协调能力一定会大幅度改善。

城市生态系统健康评价是当下可持续发展研究中的一大热点,但目前处于发展阶段,其评价指标体系尚不完善。尽管设计评价体系时考虑了指标间互不重叠,但指标数量多少适宜仍有待进一步研究。通常,评价指标数量越多,给予的信息量越大,越能真实地反映实际状况;然而,由于经济现象自相关性的存在,评价指标过多会引起指标间的自相关性问题,如果选择有重复性的指标则会影响评价结果的科学性。目前,可以采取主成分分析法、因子分析法等方法,努力消除指标间的相关关系,但要避免指标间的完全不重叠也是相当困难的,所以相关问题也有待于进一步的分析探讨。

## 参考文献

- [1] NORDIN M, AZRINA L A. Training and research for measuring and monitoring ecosystem health of a large scale ecosystem [J]. *Ecosyst Health*, 1998, 4(3): 188—190.
- [2] RAPPORT D J. Gaining respectability: development of quantitative methods in ecosystem health [J]. *Ecosystem Health*, 1999(5): 1—2.
- [3] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍. 湖泊生态系统健康定量评价方法[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1466—1574.
- [4] NOBLE L R, DIRZO R. Forests as human-dominated ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277: 522—525.
- [5] 谢花林, 李波, 刘黎明. 基于压力—状态—响应模型的农业生态系统健康评价方法[J]. *农业现代化研究*, 2005, 26(5): 366—369.
- [6] 周建顺, 刘志刚. 诺贝尔奖得主: 21世纪对世界影响最大的两件事[EB/OL]. (2003-09-26) [2016-12-12]. [http://www.ce.cn/sygdwx/t20030926\\_133599.shtml](http://www.ce.cn/sygdwx/t20030926_133599.shtml).
- [7] 罗绮. 重庆都市圈生态健康评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [8] JERRY M S, MARIANO B, ANNALEE Y, et al. Developing

- ecosystem health Indicators in centro habana: a community based approach[J].Ecosystem Health,2001,7(1):15-26.
- [9] GUIDOTLI T L.Perspective on the health of urban ecosystems[J].Ecosystem Health,1995,1(3):141-149.
- [10] 郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态系统健康评价初探[J].中国环境科学,2002,22(6):525-529.
- [11] 曾勇,沈根祥,黄沈发,等.上海城市生态系统健康评价[J].长江流域资源与环境,2005(21):208-213.
- [12] 官冬杰,苏维词.城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J].环境科学学报,2006,26(10):1716-1722.
- [13] 马爽爽,陈奕,许有鹏.基于分形理论的湖州市城市生态系统健康评价[J].生态学杂志,2012,31(7):1817-1822.
- [14] 魏婷,朱晓东,李杨帆.基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价[J].生态学报,2008,28(12):6312-6320.
- [15] 于苏建.基于投影寻踪的海西主体城市生态系统健康评价[J].江西农业大学学报(社会科学版),2010,9(3):101-105.
- [16] 郭锐利,郑钦玉,刘娟,等.基于熵值法和GM(1,1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J].中国环境科学,2012,32(6):1148-1162.
- [17] 景彩娥,张福平.太原市城市生态系统健康评价及其趋势预测[J].水土保持通报,2013,33(3):280-286.
- [18] 王广成,李忠才,孙玉峰.海岛地区生态经济模型及其实证研究[M].北京:经济科学出版社,2009.
- [19] 宋永昌,威仁海,由文辉,等.生态城市的指标体系与评价方法[J].城市环境与城市生态,1999(10):16-19.
- [20] 高彩玲,田采霞,麻冰涓.基于熵权法的焦作市城市生态系统健康动态评价[J].水土保持通报,2015,35(3):70-73.