

基于灰色聚类法的长江经济带中心城市生态安全评价研究^{*1}

柯小玲^{1, 2} 向梦^{1, 2} 冯敏^{1, 2}

(1. 中国地质大学(武汉) 经济管理学院, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心, 湖北武汉 430074)

【摘要】: 以长江经济带为研究区域, 选取长江经济带中心城市武汉市、上海市、重庆市为研究对象, 首先运用 PSR 模型构建具有长江经济带特色的生态安全评价指标体系, 包含目标层、准则层、指标层 3 个层次共 31 个指标; 然后通过主成分分析方法进行权重求解, 消除了指标间的影响, 使各指标权重更加客观; 最后构建基于白化权函数的灰色聚类模型对 3 个城市 2004 ~ 2015 年的生态安全状态进行评价。评价结果表明: 3 个城市 2004 ~ 2015 年间生态安全水平总体呈上升趋势, 生态安全状态不断好转。

【关键词】: 长江经济带; 中心城市; 生态安全; 主成分分析; 灰色聚类

【中图分类号】: X821 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)11-1734-09

DOI: 10. 11870 /cjlyzyyhj201711002

近年来我国工业化和城镇化使得资源环境日益严峻, 资源约束压力持续增大, 环境污染仍然在加重, 生态系统退化依然严重, 生态问题更加复杂。在此背景下, 国务院出台了划定生态保护红线的战略决策, 旨在维护国家和区域生态安全及经济社会可持续发展, 保障人民群众健康。长江经济带是我国综合实力最强、战略支撑作用最大的区域之一, 也是生态文明建设的先行示范带。它覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 省市, 面积约 $205 \times 10^4 \text{ km}^2$, 人口和生产总值均超过全国的 40%。但是, 随着长江经济带的日益建设和发展, 其引发的生态环境问题也日益突出: 临流域系统性保护不足, 生态功能退化严重; 污染物排放量大, 饮用水安全保障任务艰巨; 沿江化工行业环境风险隐患突出, 守住环境安全底线压力大; 部分地区城镇开发建设严重挤占江河湖库生态空间, 发展和保护矛盾凸显。根据环保部的部署, 2017 年底前, 长江沿江 11 省市要完成生态保护红线划定, 全面建立生态保护红线制度。可见, 长江经济带生态环境保护形势依然紧迫而复杂, 因此对长江经济带城市生态安全评价研究迫在眉睫。

生态安全是人类生存环境不受威胁的一种状态, 其本质是自然资源在社会、经济和生态环境中有序稳定地发展, 它随着外部环境的变化而改变, 具有整体性、长期性和不可逆性^[1]。一个安全的生态系统不仅能在一定的时间尺度内维持自身的组织结

¹ 收稿日期: 2017-02-16; 修回日期: 2017-04-05

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金(13YJC630065) [Research Foundation of Humanities and Social Sciences of Ministry of Education of China (13YJC630065)]

作者简介: 柯小玲(1980 ~), 女, 博士, 副教授, 研究方向为资源管理工程。 E-mail: kxlcug@163. com

构,而且具有一定的恢复能力。对于不安全的生态状态,可以通过脆弱性分析,采取各种措施不断改善脆弱性,解除环境灾难,降低风险。

在生态安全评价中,研究方法逐渐从定性研究转变为定量研究,常见的生态安全评价方法包括综合指数法、生态足迹法、模糊综合评价、物元分析法和人工神经网络法等,如张红等^[2](2016)针对海岛城市特点,构建了专门用于评价海岛城市土地承载力的改进的生态足迹模型,为海岛城市土地资源的合理利用提供有效的评价方法。王雪玉等^[3](2014)采用综合指数法求得各准则层的综合指数,从而对大连市2003~2012年的生态安全状况进行评价。张钦礼等^[4](2016)为有效监测区域生态安全的动态变化,根据变权灰色关联模型计算评价对象的综合安全度,并确定其生态安全等级。陶晓燕等^[5](2013)基于城市生态安全模糊性的特点,将模糊物元理论应用于城市生态安全评价。秦晓楠等^[6](2015)将BP神经网络与决策实验室分析法相结合,研究了影响我国沿海城市生态安全系统的因素。不同的评价方法都有其自身的优缺点和适用范围,如模糊综合评价法虽能解决难以量化的问题,系统性强,但强调极值作用,会导致信息过多损失,评价结果不够科学;人工神经网络法能够很好地处理大型复杂系统,但样本需求量大、精度不高;生态足迹法具有广泛的应用范围,但对生态系统的考虑缺乏完整性,假设条件太多;主成分分析法能消除信息重叠,但不能对生态安全等级进行判定。由于城市生态系统是一个复杂的系统,其安全状况由多种因素决定,指标的选取、权重的分配都是评价中的基本问题,受到个人经验、知识等已知和未知因素的影响,人们对生态安全的认知往往具有较强的模糊性,尚处于一种灰色的状态^[7],因此本文拟采用灰色聚类法对长江经济带中心城市的生态安全状态进行评价。灰色系统是一种部分信息明确的技术系统,能分析生态系统的内在联系和规律,并对数据进行分类,使数据呈现一定的规律性或分类性。

本文首先根据主成分分析法,从统计的角度科学建立长江经济带城市生态安全的评价指标体系,进而构建基于白化权函数的灰色聚类模型对长江经济带中心城市生态安全进行评价,以期对长江经济带中心城市的生态建设提供决策支持。

1 生态安全评价指标体系的构建

生态安全评价指标体系是开展生态安全评价工作的基础,常见的构建生态安全指标体系的模型包括压力—状态—响应模型(PSR模型)、驱动力—压力—状态—影响—响应模型(DPSIR模型)和自然—经济—社会模型(NES模型)等。这些概念模型为生态安全评价提供了量化依据,在引导生态文明建设不断拓展、深入和完善上产生了积极的作用,但由于评价对象的局限,文献中构建的指标体系并不能反映长江经济带城市生态安全系统独有的特性,亦不能通过评价结果,指导长江经济带城市生态建设。PSR模型是将人类活动同自然环境有机结合在一起的因果关系明确的模型,常用于评价生态系统的健康状况,具有较强的系统性,能对环境指标进行有效地分类^[8],因此本文拟在PSR模型的基础上,结合长江经济带城市的特色构建长江经济带城市生态安全指标体系。

PSR模型即压力—状态—响应模型,该模型是由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)共同发展起来的。压力指标(P)是人类进行社会活动给自然环境带来压力的因素,状态指标(S)能够反映当前自然环境系统所处的状态或趋势,响应指标(R)体现了人们通过采取措施用以减轻或消除对环境的负面影响^[9]。本文基于该概念模型,从“社会、经济、自然”3个维度构建长江经济带城市的生态安全评价指标体系,每个维度下具体指标的选择以《国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》中提到的长江经济带生态影响因素为基础,通过梳理相关文献中的“高频指标”来确定。具体过程如下:

首先选取《国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》中提到的人均用水量、工业废水排放量等17个评价指标,然后对2001~2015年间的260篇CSSCI核心期刊论文进行整理,挑选出单位GDP能耗指数、单位产值工业废水排放量等36个高频指标,剔除两者重复的指标之后,依照可操作性、整体性、层次性和动态性原则,最终确定了包含目标层、准则层、指标层3个层次在内的31个指标,具体的评价指标体系见表1。

表 1 长江经济带城市生态安全评价指标体系

目标层	准则层 1	准则层 2	指标层
生态安全状态(A)	生态	社会压力	人口自然增长率 (D ₁) *、人均住房面积 (D ₂) *、城市化水平 (D ₃) *
	安全	经济压力	人均 GDP (D ₄) *、单位 GDP 能耗 (D ₅) **
	压力(B1)	自然压力	化肥施用量 (D ₆) **、农药使用量 (D ₇) **、工业废水排放量 (D ₈) **、工业 SO ₂ 排放量 (D ₉) **、工业烟尘排放量 (D ₁₀) **、氨氮排放量 (D ₁₁) **、废气排放总量 (D ₁₂) **
	生态	社会状态	人均用水量 (D ₁₃) #、人均耕地面积 (D ₁₄) *、人口密度 (D ₁₅) *
	安全	经济状态	城镇居民人均可支配收入 (D ₁₆) *、GDP 增长率 (D ₁₇) *
	安全	自然状态	人均煤炭消费量 (D ₁₈) **、化学需氧量 (D ₁₉) **、建成区绿化覆盖率 (D ₂₀) *、森林覆盖率 (D ₂₁) **、空气质量优良率 (D ₂₂) **、自然保护区面积比重 (D ₂₃) **
	生态	社会响应	环境投入占财政支出比重 (D ₂₄) *、科学技术支出占财政支出比重 (D ₂₅) *
	安全	经济响应	第三产业占 GDP 比重 (D ₂₆) *、医疗卫生支出占财政支出比 (D ₂₇) *
生态安全状态(B3)	响应	自然响应	工业 so ₂ 去除率 (D ₂₈) **、工业固体废弃物综合利用率 (D ₂₉) *、工业烟尘去除率 (D ₃₀) **、全市污水处理量 (D ₃₁) **

注：* 是选取相关文献中的“高频指标”，** 是国务院相关文件中提到的指标。

2 主成分分析法确定指标权重

权重作为评价模型的重要组成部分，在评价过程中起着举足轻重的作用。本文选用主成分分析法确定评价指标的权重，因为它能够用有限个不可观察的潜在变量解释原变量的相关性，同时对变量或样本进行分类处理，用较少的指标表达大部分信息量^[10]。本部分的研究数据主要来源于 2004 ～ 2015 年的《武汉统计年鉴》和《武汉建设年鉴》，以及相应年份的中经网统计数据。指标权重的求取过程如下：

2. 1 数据的预处理

(1) 数据正向化处理。通过对逆向指标取相反数进行正向化处理。指标正向化处理既消除了指标性质不同造成的差异，又使所得出的各主成分得分值同城市生态安全正相关^[11]。

$$X_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, & \text{正向指} \\ -x_{ij}, & \text{向指} \end{cases}$$

(1)

(2) 数据标准化处理。数据标准化是为了消除不同量纲带来的差异。这里采用 Z-score 法：

$$P_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma}$$

(2)

式中： P_{ij} 为标准化后的指标值； X_{ij} 为正向化以后的指标值； $\bar{X}_j$ 为j个指标的均值； σ 为样本标准差。

2. 2 主成分分析结果

将原始标数据通过式(1)、式(2)进行指正向化及标准化处理，用 SPSS 软件对处理后的数据进行主成分分析，得到 4 个主成分，见下表 2、表 3。

表 2 评价指标主成分分析结果

指标成分	初始特征值		
	特征值合计	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
1	21.827	70.409	70.409
2	3.695	11.919	82.328
3	1.965	6.339	88.668
4	1.366	4.407	93.074
5	0.643	2.074	95.148
6	0.539	1.74	96.888
7	0.421	1.358	98.246
8	0.274	0.884	99.13
9	0.137	0.443	99.573
10	0.08	0.258	99.831
11	0.052	0.169	100

表 3 主成分载荷表

评价指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分
人口自然增长率	-0.91	-0.27	0.243
人均住房面积	0.922	0.005	0.248
城市化水平	0.927	-0.166	0.193
人均 GDP	0.9	-0.074	0.127
单位 GDP 能耗	0.679	0.061	0.623
化肥施用量	0.764	0.437	-0.122
农药使用量	0.852	-0.374	0.194
工业废水排放量	0.869	-0.43	0.133
工业 SO ₂ 排放量	0.853	0.5	0.055
工业烟尘排放量	-0.789	0.072	-0.284

氨氮排放量	0.819	0.478	-0.091
废气排放总量	-0.816	-0.118	0.152
人均用水量	0.932	-0.292	0.118
人均耕地面积	-0.973	0.057	0.106
人口密度	-0.303	0.583	0.458
城镇居民人均可支配收入	-0.522	0.333	0.653
GDP 增长率	-0.971	0.148	0.091
人均煤炭消费量	0.95	0.071	-0.123
化学需氧量	-0.683	0.342	0.538
建成区绿化覆盖率	0.148	0.887	-0.185
森林覆盖率	0.884	0.39	0.098
空气质量优良率	-0.916	0.283	0.056
自然保护区面积比重	0.974	0.072	0.016
环境投入占财政支出比重	-0.922	-0.053	-0.17
科学技术支出占 GDP 比重	0.795	0.501	-0.124
第三产业占 GDP 比重	0.995	0.056	0.009
医疗卫生支出占财政支出比重	0.897	-0.265	0.212
工业 SO ₂ 去除率	-0.517	-0.639	0.147
工业固体废弃物综合利用率	0.974	-0.14	0.029
工业烟尘去除率	0.906	-0.33	0.096
全市污水处理量	-0.935	0.032	0.274

一般情况下，确定主成分的个数应当综合考虑特征根大于 1，且提取的累计方差贡献率达到 85%以上的情况。由表 2 可以看出，前四个主成分的特征根均大于 1，且这 4 个主成分累计方差贡献率为 93.074%，超过 85%。故主成分分析提取 4 个主成分，且这 4 个主成分基本可以反映全部指标的信息。另外，由各特征向量值可以看出大多数指标在第一主成分中荷载较大，因此第一主成分反映了绝大部分指标的信息，森林覆盖率、工业 SO₂ 去除率在第二主成分中荷载较大，城镇居民人均可支配收入、单位 GDP 能耗在第三主成分中荷载较大，人口密度在第四主成分中荷载较大。主成分分析法得出的数据出现负数，通过数据平移对数据进行非负化处理^[12]。这里对成份矩阵进行平移，将所有数据加上一个最小负数的绝对值^[13]。

2.3 指标权重的确定

主成分分析的数学模型为：

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \cdots + a_{p1}X_p \\ F_2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{p2}X_p \\ \cdots \\ F_m = a_{1m}X_1 + a_{2m}X_2 + \cdots + a_{pm}X_p \end{cases} \quad (3)$$

式中： $F_1, F_2, \dots, F_m$ 是 m 个主成分， a_{ij} 为线性组合中的系数。其中，

$$a_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

f_{ij} 为初始因子荷载， λ_j 为第 j 个主成分对应的特征值。

将平移后的成份矩阵通过式(3)、式(4) 得到 4 个主成分线性组合：

$$\begin{cases} F_1 = 0.039X_1 + 0.045X_2 + \dots + 0.397X_{31} \\ F_2 = 0.459X_1 + 0.558X_2 + \dots + 0.780X_{31} \\ F_3 = 0.822X_1 + 0.511X_2 + \dots + 0.753X_{31} \\ F_4 = 1.235X_1 + 1.103X_2 + \dots + 0.764X_{31} \end{cases} \quad (5)$$

由此确定主成分综合得分模型为：

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (6)$$

式中： $b_1, b_2, \dots, b_p$ 为综合得分模型中的系数，即各个指标的权重。其中，

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}\theta_j}{\sum_{j=1}^m \theta_j}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

θ_j 为第 j 个主成分对应点方差贡献率。

通过式(6) 得到综合得分模型为：

$$Y = 0.203X_1 + 0.193X_2 + \dots + 0.487X_{31} \quad (8)$$

将指标权重即综合得分模型中的系数进行归一化处理，得到最终的指标权重，见下表 4。

表 4 指标权重

指标	权重	指标	权重
人口自然增长率	0.018	GDP 增长率	0.014
人均住房面积	0.017	人均煤炭消费量	0.031
城市化水平	0.015	化学需氧量	0.040
人均 GDP	0.015	建成区绿化覆盖率	0.041
单位 GDP 能耗	0.040	森林覆盖率	0.041
化肥施用量	0.042	空气质量优良率	0.018
农药使用量	0.042	自然保护区面积比重	0.041
工业废水排放量	0.040	环境投入占财政支出比重	0.043
工业 SO ₂ 排放量	0.043	科学技术支出占 GDP 比重	0.043
工业烟尘排放量	0.040	第三产业占 GDP 比重	0.024
氨氮排放量	0.023	医疗卫生支出占财政支出比重	0.035
废气排放总量	0.016	工业 SO ₂ 去除率	0.042
人均用水量	0.042	工业固体废弃物综合利用率	0.040
人均耕地面积	0.014	工业烟尘去除率	0.038
人口密度	0.016	全市污水处理量	0.043
城镇居民人均可支配收入	0.043		

通过主成分分析求权重，不仅减少了变量的数量，而且抓住了主要矛盾，有利于对问题进行分析和处理，这种方法也减少了计算的工作量，计算较为规范，得出的结果也较为客观和合理。由表 4 可以看出，工业 SO₂ 排放量、城镇居民人均可支配收入、环境投入占财政支出比重、全市污水处理量、科学技术支出占 GDP 比重在所有指标中权重较大，表明这些指标对该市生态安全的影响较大，GDP 增长率、人均耕地面积所占权重最小，说明对该市生态安全的影响较小。权重的数值的大小代表指标对生态安全的影响程度，该市指标权重的确定为后续评价生态安全状况提供了依据。

3 建立灰色聚类评价模型

灰色聚类法是将观测指标通过关联矩阵或白化权函数聚集成若干个可定义类别，从而得到有价值信息的方法，它能够在信息不完全的条件下实现系统建模、预测和决策，使决策结果更加准确客观^[14]。

灰色聚类评价模型先将评价指标划分灰类数，建立白化权函数，在此基础上进行加权综合，从而反映系统的整体状况。其具体步骤如下：

(1) 构造样本矩阵

对拟评价的长江经济带城市的统计数据进行处理，利用规范化数据来确定样本矩阵。

$$\text{对正向指标, } d_{ij} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

$$\text{对逆向指标, } d_{ij} = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

假定拟评价城市的生态安全数据包含 m 年 n 个评价指标, 规范化的数据可构成样本矩阵 D , 则样本矩阵表达式为:

$$D = \begin{Bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

$$D = \{d_{ij}\}_{m \times n} (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n)$$

(2) 构造白化权函数

白化权函数是根据已知信息定量描述各数据属于某灰类的程度, 其具体步骤为:

①灰类的确定

将标准化后的数据所在区间划分为四个评价灰类, 设其相应的评价等级集合为 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{0.9, 0.7, 0.5, 0.2\}$, 对应于评语集{优, 良, 中, 差}, 构建评价灰类序号集 $e = \{1, 2, 3, 4\}$, 分别表示“优”、“良”、“中”、“差”, 灰数 $\otimes$ 表示灰类下的一个数集区间^[15~18]。

②白化权函数的确定

根据灰数、评价等级建立白化权函数 $f_e(e = 1, 2, 3, 4)$ 。

第1灰类“优” $e = 1$, 灰数 $\otimes 1 \in [0.9, \infty]$, 白化权函数 f_1 如图1(a)所示, 具体为:

$$f_1 = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{0.9}, & d_{ij} \in [0, 0.9] \\ 1, & d_{ij} \in (0.9, \infty] \\ 0, & d_{ij} \notin (0, \infty) \end{cases} \quad (12)$$

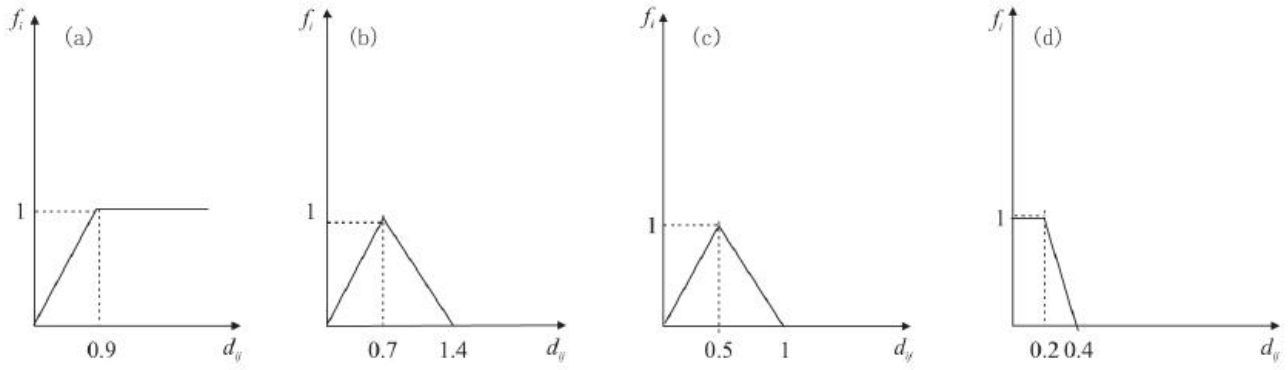


图 1 灰数及白化权函数

Fig. 1 Grey Category and Whitening Weight Function

第 2 灰类“良” $e = 2$ ，灰数 $\otimes 2 \in [0, 0.7, 1.4]$ ，白化权函数 f_2 如图 1(b) 所示，具体为：

$$f_2 = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{0.7}, & d_{ij} \in [0, 0.7] \\ 2 - \frac{d_{ij}}{0.7}, & d_{ij} \in (0.7, 1.4] \\ 0, & d_{ij} \notin (0, 1.4) \end{cases} \quad (13)$$

第 3 灰类“中” $e = 3$ ，灰数 $\otimes 3 \in [0, 0.5, 1]$ ，白化权函数 f_3 如图 1(c) 所示，具体为：

$$f_3 = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{0.5}, & d_{ij} \in [0, 0.5] \\ 2 - \frac{d_{ij}}{0.5}, & d_{ij} \in (0.5, 1] \\ 0, & d_{ij} \notin (0, 1) \end{cases} \quad (14)$$

第 4 灰类“差” $e = 4$ ，灰数 $\otimes 4 \in [0, 0.2, 0.4]$ ，白化权函数 f_4 如图 1(d) 所示，具体为：

$$f_4 = \begin{cases} 1, & d_{ij} \in [0, 0.2] \\ 2 - \frac{d_{ij}}{0.2}, & d_{ij} \in (0.2, 0.4] \\ 0, & d_{ij} \notin (0, 0.4) \end{cases} \quad (15)$$

(3) 灰色统计数的确定

用灰色统计法由确定灰数的白化权函数求出 d_{ij} 属于第 e 类评价等级的权数 f_e ，据此求出评判矩阵的总灰数统计数 U_{ie} 为：

$$U_{ie} = \sum_{e=1}^4 f_e(d_{ij}) \quad (16)$$

(4) 灰色评价权系数及灰色模糊评价矩阵的确定

记城市生态安全评价指标 d_{ij} 对第 j 个评价对象第 e 个灰类的评价权系数为 r_{ie} ，其表达式为：

$$r_{ie} = \frac{f_e(d_{ij})}{U_{ie}} \quad (17)$$

则长江经济带城市 n 个评价指标对各个评价灰类的灰色模糊评价矩阵 R 为：

$$R = \begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1e} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2e} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{j1} & r_{j2} & \cdots & r_{je} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

(5) 综合评价矩阵的确定

长江经济带城市生态安全综合评价矩阵 B 的表达式为：

$$B = W \times R$$

$$= (w_1, w_2, \cdots, w_n) \begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1e} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2e} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{j1} & r_{j2} & \cdots & r_{je} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

(6) 评价等级的确定

长江经济带城市生态安全评价等级 P 为：

$$P=B\times S \quad (20)$$

4 武汉市、上海市、重庆市生态安全评价结果与分析

长江经济带分为以上海为核心的长江三角洲城市群、以武汉为核心的长江中游城市群和以重庆为核心的成渝城市群，因此本文选取武上海、重庆和武汉 3 个城市作为样本城市开展生态安全研究。由于篇幅有限，只展示武汉市的评价过程。将武汉市 2004 ~ 2015 年的数据通过式 (9) ~ (19) 得到每年的综合评价矩阵 B 如下：

$$\begin{aligned} B_1 &= (0.167 \quad 0.125 \quad 0.062 \quad 0.646) \\ B_2 &= (0.187 \quad 0.190 \quad 0.189 \quad 0.434) \\ B_3 &= (0.167 \quad 0.184 \quad 0.194 \quad 0.455) \\ B_4 &= (0.195 \quad 0.223 \quad 0.251 \quad 0.330) \\ B_5 &= (0.230 \quad 0.269 \quad 0.283 \quad 0.219) \\ B_6 &= (0.249 \quad 0.297 \quad 0.297 \quad 0.156) \\ B_7 &= (0.309 \quad 0.296 \quad 0.223 \quad 0.173) \\ B_8 &= (0.264 \quad 0.277 \quad 0.240 \quad 0.219) \\ B_9 &= (0.279 \quad 0.290 \quad 0.240 \quad 0.191) \\ B_{10} &= (0.322 \quad 0.306 \quad 0.220 \quad 0.152) \\ B_{11} &= (0.410 \quad 0.329 \quad 0.145 \quad 0.117) \\ B_{12} &= (0.513 \quad 0.316 \quad 0.040 \quad 0.131) \end{aligned}$$

根据式 (20) 得出武汉市 2004 ~ 2015 年生态安全评价等级 P 的值分别为：0. 398、0. 482、0. 467、0. 524、0. 580、0. 612、0. 631、0. 595、0. 613、0. 644、0. 694、0. 729，分别属于较差、较差、较差、中、中、较良好、较良好、较良好、较良好、较良好、良好。同理可以得到上海市和重庆市的生态安全评价等级，具体结果如图 2 所示。

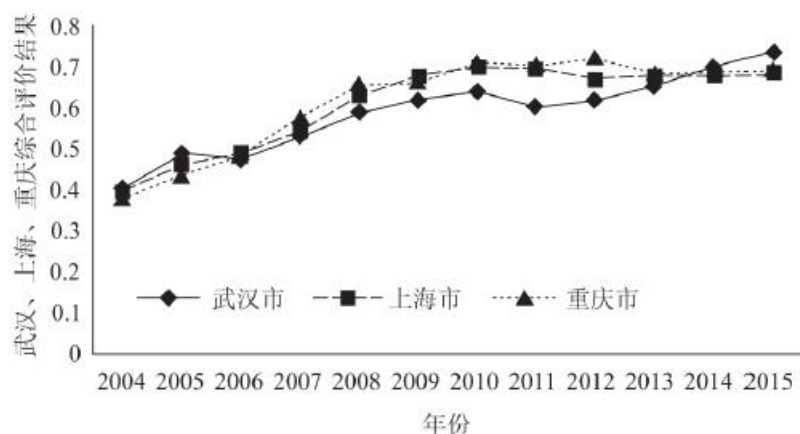


图2 武汉、上海、重庆 2004~2015 年生态安全评价结果

Fig. 2 Evaluation Results of Ecological Security in Wuhan, Shanghai and Chongqing in 2004–2015

同时根据上述公式分别对压力、状态、响应 3 个准则层的指标进行计算，得到武汉市的压力、状态、响应准则层的生态安全评价等级，如下图 3 所示。

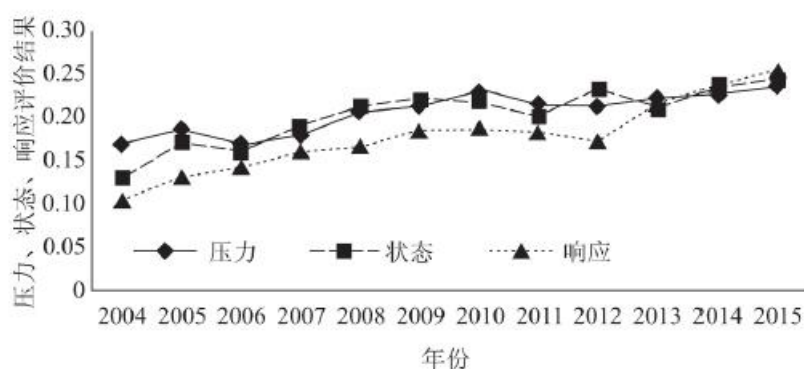


图3 武汉市 2004~2015 年生态安全压力、状态、响应评价结果

Fig. 3 Evaluation Results of Ecological Security Pressure, State, Response in Wuhan in 2004–2015

由图 2 和图 3 可以看出：武汉市 2004 ~ 2015 年生态安全水平大体呈上升趋势，除 2006 年外 2004 ~ 2010 年间总体逐年增加，2011 年有所下降，2012 ~ 2015 年稳步回升，其中 2015 年的生态安全状况最好，属于较良好水平。武汉市近 12a 生态安全呈如下特点：①生态安全压力方面：压力层的指标属于逆向指标，故评价结果的值越大反映的生态安全压力越小。由图 3 可知 2004 ~ 2015 年间，武汉市生态安全压力逐渐减小，2010 年达到最小。2010 年人口自然增长率最低为 1.59%，社会压力较小，同时工业 SO₂ 排放量、工业烟尘排放量较其他年份达到最低，生态压力达到最小。总体来说，2004 ~ 2015 年间“三废”排放量大致呈下降趋势，化肥施用量、农药使用量也逐年减少，生态压力状况逐渐好转。②生态安全状态方面：2004 ~ 2009 年间武汉市生态安全状态总体呈好转趋势，森林覆盖率、建成区绿化覆盖率、空气质量优良率等指标呈逐年增加趋势，但 2006 年人均煤炭消费量较其他年份多，故生态安全状态稍有下降，2010 ~ 2014 年呈起伏下降趋势，其中 2010 ~ 2011 两年间化学

需氧量和人均煤炭消费量较 2009 年有所增加,生态安全状态出现下降态势,2012 年建成区绿化覆盖率和森林覆盖率增加,生态安全状态回升,2013 年空气质量优良率低至 43.8%,生态安全状态下降,此后两年人均煤炭消费量减少,空气质量变好,故又呈回升趋势。③生态安全响应方面:2004 ~ 2010 年间武汉市加大社会、经济、自然 3 方面的响应力度,“三废”处理量、环保投资和医疗卫生支出增加,生态安全响应逐年增加,2011 ~ 2012 年间生态安全响应呈下降趋势,2013 ~ 2015 年回升。主要是 2010 ~ 2012 年工业 SO₂ 去除率、工业固体废弃物综合利用率下降,2012 年响应力度最低,2013 ~ 2015 年武汉市加大了工业 SO₂ 去除率和全市污水处理量,加强了响应力度。

对比武汉市和上海市、重庆市生态安全评价的结果可知:2004 ~ 2015 年 3 个城市的生态安全状态都不断提升,虽然个别年份偶有波动,但是整体发展态势较好。其中,2004 ~ 2006 年武汉市的生态安全状态优于上海市和重庆市;2006 ~ 2012 年,上海市和重庆市的生态安全综合值交替上升,且均高于武汉市;2012 ~ 2015 年,武汉市生态安全状态明显改善,优于上海市和重庆市。分析其原因是 2004 ~ 2006 年间,3 个城市的经济不断发展,节能减排不断推进,其中武汉市“三废”排放量、农药使用量和人口密度均小于上海市和重庆市,建城区绿化覆盖率较其他两个城市大,生态压力较小,故武汉市生态安全状态优于上海市和重庆市;2006 ~ 2012 年间 3 个城市实践“十一五”规划,牢牢把握国家中部崛起、“两型社会”和国家自主创新示范区建设等战略机遇,不断发展优势,环保投入持续增加,在大气污染治理、水污染治理以及绿化方面取得了显著成效 3 个城市的生态安全状态不断上升,在此期间,上海市和重庆市的空气质量优良率较武汉市好,全市污水处理量较武汉市多,环保投入也比武汉市大,在生态治理方面取得了较好的成效,故上海市和重庆市的生态安全状态优于武汉市;2012 ~ 2015 年武汉市加大环保投资力度,加强环境治理,减少“三废”排放量,提高“三废”处理率,在此期间武汉市“三废”排放量和化学需氧量少于上海市和重庆市,工业固体废弃物综合利用率和空气质量优良率均高于上海市和重庆市,故生态安全状态优于这两市。

5 小结与建议

本文以 PSR 模型为基础,以长江经济带城市武汉市、上海市、重庆市为研究对象,采用灰色聚类模型对长江经济带城市生态安全进行研究,主要研究结论如下:

(1) 通过 PSR 模型将社会、经济、自然 3 个子系统联系起来,考虑各要素之间的相互作用,从长江经济带城市的特色出发,选出 31 个评价指标构建长江经济带城市生态安全评价指标体系,为开展生态安全评价工作奠定了基础。

(2) 对武汉市数据进行主成分分析,选出 4 个主成分,每个主成分都不同程度地反映了生态安全状况。把主成分有效地运用到指标权重的求解过程中,消除了评价指标间的相关影响,使结果更加客观。

(3) 通过构建灰色聚类评价模型,建立白化权函数,对武汉市、上海市、重庆市 3 个城市最近 12 a 的生态安全状态进行评价。结果表明该 3 个城市在 2004 ~ 2015 年间生态安全状况总体均呈逐渐好转趋势。

综合来看,2004 ~ 2015 年武汉市、上海市、重庆市生态安全水平处于不断优化的状态,这对今后 3 个城市生态安全研究提供了指导和参考,要提高生态安全水平需要进一步加强以下方面的建设:

(1) 缓解环境压力,加大对高污染行业的监管力度,控制工业企业的废弃物排放,进一步做到降低“三废”排放量,提高“三废”处理量。同时深入排查水域污染源,加强长江流域的水资源保护,完善污染防治体制。

(2) 3 个城市的绿化面积虽不断增加,但建成区绿化覆盖率和森林覆盖率仍处于较低水平,需进一步扩大绿化面积;3 个城市空气质量优良率不高,可通过节能减排进一步提高空气质量。此外,武汉市应控制人口密度,上海市应减少氨氮排放量,重庆市需减少化肥施用量。

(3) 武汉市、上海市和重庆市在经济发展的同时也面临着资源短缺问题,要在总量和强度两方面严格控制高消耗项目,降低单位 GDP 能耗和人均煤炭消费量。同时要构建节能减排机制,健全公众参与机制,完善相关法律法规。

文章尚存在一些不足:首先受数据获得的限制,有些生态安全影响因素未被纳入评价指标,如生物多样性数据。在后期的研究中,我们会进一步完善评价指标体系、扩大样本城市的数量、搜集更多的统计数据进行研究,以期为长江经济带的生态安全建设提出有效的对策建议。

参考文献:

[1] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等. 生态安全研究进展 [J]. 生态学报,2005(04):861—868.

【CUI S H, HONG H S, HUANG Y F, et al. Progress of the ecological security research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(04):861—868.】

[2] 张红,陈嘉伟,周鹏. 基于改进生态足迹模型的海岛城市土地承载力评价——以舟山市为例 [J]. 经济地理,2016,36(6):155—160.

【ZHANG H, CHEN J W, ZHOU P. A modified ecological footprint model to evaluate the land carrying capacity of island cities: take Zhoushan city as example [J]. Economic Geography, 2016, 36(6):155—160.】

[3] 王雪玉,葛仁东,于成学,等. 辽宁沿海经济带生态安全评价研究——以大连市为例 [J]. 价值工程,2014(26):7—9.

【WANG X Y, GE R D, YU C X, et al. Research on the assessment of ecological safety for Liaoning coastal economic region:a case of Dalian [J]. Value Engineering, 2014(26):7—9.】

[4] 张钦礼,邵佳,彭秀丽,等. 民族贫困地区生态安全评价及影响因素分析——以湘西自治州为例 [J]. 中南大学学报(社会科学版),2016(3):83—90.

【ZHANG Q L, SHAO J, PENG X L, et al. Assessment of ecological security and analysis of the influence factors in minority poverty area: A case study of Xiangxi Autonomous Prefecture [J]. Journal of Central South University (Social Science Edition), 2016(3):83—90.】

[5] 陶晓燕. 基于模糊物元理论的城市生态安全预警评价 [J]. 资源开发与市场,2013(08):814—817.

【TAO X Y. Assessment of urban ecological security warning based on fuzzy, matter-element theory [J]. Resource Development& Market, 2013(08):814—817.】

[6] 秦晓楠,卢小丽. 基于 BP-DEMATEL 模型的沿海城市生态安全系统影响因素研究 [J]. 管理评论,2015(05):48—58.

【QIN X L, LU X L. A BP-EMATEL-Model-based research of the factors that affect coastal urban ecological security system [J]. Management Review, 2015(05):48—58.】

-
- [7] 庞庆华. 基于灰色理论的企业技术创新能力综合评价模型 [J]. 科技管理研究, 2007, 12: 113—118.
- 【PANG Q H. Comprehensive evaluation model of enterprise technological innovation capability based on grey theory [J]. Science and Technology Management Research, 2007, 12:113—118. 】
- [8] 张晓琴, 石培基. 基于 PSR 模型的兰州城市生态系统健康评价研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2010(03) : 77—82.
- 【ZHANG X Q, SHI P J. The assesment o f urban ecosystem health based on PSR model—a case study of Lanzhou city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010(03) :77—82. 】
- [9] 余子萍, 张彦儒, 张丽洁. 基于 PSR 模型的旅游生态系统健康评价——以南京玄武湖风景区为例 [J]. 安徽农业科学, 2012, 10: 6029—6032.
- 【YU Z P, ZHANG Y R, ZHANG L J. Evaluation on the health of tourism ecosystem based on PSR model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 10: 6029—6032. 】
- [10] 鲍学英, 李海连, 王起才. 基于灰色关联分析和主成分分析组合权重的确定方法研究 [J]. 数学的实践与认知, 2016, 46(9) : 129—134.
- 【BAO X Y, LI H L, WANG Q C. The Combined Weight Based on Grey Relation and Principal Component Analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46 (9) : 129 —134. 】
- [11] 杜忠潮, 韩申山. 基于主成分分析的土地生态安全评价实证研究——以陕西省 10 个省辖市为例 [J]. 水土保持通报, 2009(06) : 198—202.
- 【DU Z C, HAN S S. Land ecological security evaluation based on principal component analysis—take examples of 10 provincial cities in Shaanxi province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009(06) : 198—202. 】
- [12] 温秀琴, 汪应宏, 陈晨, 等. 主成分分析法与熵值法结合用于土地集约利用评价——以徐州市为例 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(28) : 12372—12373, 12538.
- 【WEN X Q, WANG Y H, CHEN C et al. Evaluation on land intensive utilisation based on the combination of principal component analysis and entropy value method [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36 (28) : 12372 — 12373, 12538. 】
- [13] 徐永智, 华惠川. 对主成分分析三点不足的改进 [J]. 科技管理研究, 2009(06) : 128—130.
- 【XU Y Z, HUA H C. The improvement of three points in the principal component analysis [J]. Science and Technology Management Research, 2009(06) : 128—130. 】
- [14] 杨光明, 赵光洲, 王玉芳. 基于灰色聚类法的生态住宅开发模式与评价研究——以云南 YX 公司地产项目为例 [J]. 生态经济, 2014, 11: 124—128.

【YANG G M, ZHAO G Z, WANG Y F. The development pattern and evaluation of ecological residence based on gray clustering method: take Yunnan YX real estate project as an example [J]. Ecological Economy, 2014, 11: 124—128. 】

[15] 郭凯. 基于灰色系统理论与模糊数学的洛阳创新型城市评价研究 [J]. 科技管理研究, 2014(05) : 49—53.

【GUO K. Study on evaluation of Luoyang innovative city based on grey system theory and fuzzy mathematics [J]. Science and Technology Management Research, 2014(05) : 49—53. 】

[16] 耿涌, 王珺. 基于灰色层次分析法的城市复合产业生态系统综合评价 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010(01): 112—117.

【GENG Y, WANG J. Comprehensive assessment of ecosystem of cities, integrative industries based on gray hierarchy analysis [J]. China Population, Resources and Environment, 2010(01) : 112—117. 】

[17] 王文川, 郑晓曦, 陈中伟, 等. 品牌竞争力模糊灰色综合评价方法研究 [J]. 统计与决策, 2010(06) : 69—71.

【WANG W C, ZHENG X X, CHEN Z W, et al. Research on fuzzy grey comprehensive evaluation method of brand competitiveness [J]. Statistics and Decision, 2010(06) : 69—71. 】

[18] 徐建中, 冷单. 制造企业核心竞争力提升机制运行效果的灰色模糊综合评价 [J]. 科技进步与对策, 2011(02) : 117—122.

【XU J Z, LENG D. The grey fuzzy comprehensive evaluation of the operation effect for promotion mechanism of manufacturing enterprise core competence [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2011(02) : 117—122. 】