

DOI: 10.5846/stxb201411042166

檀菲菲, 陆兆华. 基于 NLPCA-GSO 可持续发展评价——以环渤海区域为例. 生态学报, 2016, 36(8): - .

Tan F F, Lu Z H. Sustainable development assessment based on NLPCA-GSO: a case study of the Bohai Rim region. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

基于 NLPCA-GSO 可持续发展评价 ——以环渤海区域为例

檀菲菲¹, 陆兆华^{1,2,*}

1 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

2 滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

摘要:区域可持续发展水平、发展的持续性和系统的协调性是区域可持续发展定量评价研究的三角构架,而传统的基于各子系统主成分分析结果直接进行形色各异的加权计算对可持续发展评价而言是有待商榷的。本文提出了非线性主成分分析和施密特正交化(NLPCA-GSO)耦合的方法评价区域的可持续发展水平来弥补传统方法的不足,并由此建立区域发展持续性模型和可持续发展系统协调度模型,再以环渤海区域为实证分析其 2001—2010 年的可持续发展状况。结果表明:基于 NLPCA-GSO 的可持续发展水平模型可以很好地弥补传统主成分分析及对各子系统结果的综合评价的不足;区域发展持续性模型、协调性模型和区域可持续系统变化的滤波分析形象地揭示区域可持续发展的实质和内涵;实证研究表明环渤海区域在研究时段内可持续发展水平有所上升,而环境子系统持续性的下降是引起区域发展持续性和系统协调度的变化的主要原因。研究结果可丰富可持续发展评价的方法学,也可为环渤海区域的可持续发展研究奠定基础。

关键词:非线性主成分分析;施密特正交化;可持续发展评价;环渤海区域

Sustainable development assessment based on NLPCA-GSO: a case study of the Bohai Rim region

TAN Feifei¹, LU Zhaohua^{1,2,*}

1 School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

Abstract: The regional sustainable development level, sustainability of regional development, and system coordination are the three components comprising regional sustainable development assessments. Traditional methods determining entire sustainable development system levels, including the sustainable development level of societies, economies, and environmental subsystems, using principal component analyses (PCA) are problematic. The sustainable development of the Bohai Rim region, including two municipalities and three provinces in China, is affected by extreme conflicts between socioeconomic development and environmental pollution. We proposed a model coupling nonlinear principal component analysis and Gram-Schmidt orthogonalization (NLPCA-GSO), and provided a holistic regional sustainable development assessment method, including the sustainable development level, sustainability of regional development, and system coordination, in a single society-economy-environment system, using the Bohai Rim region as a case study. The evaluation framework, including the NLPCA-GSO, sustainability of regional development (SRD), and sustainability coordination (SC) models, was initially constructed, and was composed of three modules as three steps in the specific analysis. In the

基金项目:国家自然科学基金项目(71273260/G0312);中国矿业大学(北京)博士研究生拔尖创新人才培养基金项目(800015Z668)

收稿日期:2014- - ; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lu-zhh@263.net

first module, the three subsystems in the sustainable development level were emphasized by NLPKA when the variables were selected, and the comprehensive level of the entire sustainable development system was highlighted by GSO when the different base vectors were determined; in second module, we focused on the dynamic potential of regional development and showed sustainability through the acceleration of the entire sustainable development level between each sample compared to first sample; and in third module, the sustainability of all subsystems was compared and the system coordination changes were emphasized, with a filtering analysis of sustainable development system changes presented. The present study emphasized a novel approach to determine the sustainable development level of several subsystems and to overcome the incomparability of PCA results among subsystems. NLPKA was used to overcome traditional PCA deficiencies in complex and multidimensional sustainable-development systems, and the eigenvector direction was determined to avoid distorted results. The results showed that the NLPKA-GSO model evaluated all the subsystems comprehensively; and the SRD and SC models graphically demonstrated the essential and connotation of sustainable development; the empirical study indicates that the Bohai Rim region has experienced a distinct development period, and while sustainability remained low, the sustainable development level and sustainability coordination increased slightly during the study period, possibly caused by the decrease of the environmental subsystem sustainability. Obviously, resources, energy, and ecological environmental factors cannot be substituted by physical or human capital only as the essential inputs in economic production, consumption, or welfare. The present study enriches the sustainable development assessment theory and methodology, and lays the foundation for further sustainable development research in the Bohai Rim region.

Key Words: nonlinear principal component analysis; Gram-Schmidt orthogonalization; sustainable development assessment; the Bohai Rim region

可持续发展系统是由生态环境、经济和社会组成的复合生态系统^[1],单因素的孤立性研究或子系统要素之间的研究是难以全面地把握区域可持续发展问题的本质。而区域可持续发展评价的实质是对研究对象的环境—经济—社会复合系统的发展水平、持续性和协调性的综合能力的评估和预测^[2],从而指引管理者和决策者通过实现努力地转变生产和生活方式使环境和社会条件稳定地支撑人类的人身安全、财富和健康^[3],因此,对可持续发展的度量和评价正是实施可持续发展战略的基础和核心环节^[4]。近年来,盛行的评价方法主要可分为社会经济学方法、生态学方法、系统学方法和新兴方法四大类,其中 GDP 核算^[5]、真实储蓄率测算法^[6]、人类发展指数模型^[7]等属于社会经济学方法,生态足迹^[8]、能值分析^[9]、物质流分析^[10]等属于生态学方法,而系统学方法主要包括指标体系法^[11]、模糊数学方法^[12]、系统动力学法^[13]、数据包络分析^[14],新兴方法包括非线性模型^[15](如神经网络、支持向量机等模型)、线性模型^[16](如物元可拓法、集对分析法等)和一些优化算法(如遗传算法、蚁群算法等)^[15]。

而系统学方法中的指标体系法因其能较全面地反映和囊括整个可持续发展复杂巨系统而颇受学者青睐^[17-18],其中主成分分析法的运用尤为广泛^[19-21],且评价过程中区域可持续发展系统的发展水平^[22-23]或协调度^[24]通常源于各子系统分别完成主成分计算后的二次判断。但传统主成分分析方法常受指标间相关程度的影响,其结果也存在着线性映射等先天不足^[25-27],而且一旦各子系统的样本群不同,无论经过相关矩阵或协方差矩阵的预处理后数值都是变化多端的,继而造成的主成分与方差贡献率的变化,甚至多次评价结果的不一致,所以从原理上来看主成分分析法只适于子系统本身的一次性评价^[28],因此利用各子系统主成分分析的结果直接进行可持续发展评价的做法实际上忽略了主成分分析的本质。鉴于此,本文提出非线性主成分分析和施密特正交化耦合的方法来改进对各子系统主成分分析后的综合可持续发展水平评价,并在此基础上建立区域发展的持续性模型和可持续发展系统协调度模型。

同时,根据已建模型对环渤海区域 2001—2010 年的可持续发展状况进行实证分析。环渤海区域是中国三大经济圈之一^[29],也是中国经济的第三增长极和中国北方经济最活跃和发达的区域,主要包括京津冀、辽

宁、和山东在内的三省二市,加快环渤海地区的可持续发展既是经济结构变迁的结果,也是国家宏观战略发展的需要,而且相关的战略和政策制定需要通过可持续发展的定量评价研究来支撑,因此环渤海区域的可持续发展评价是该区域实现可持续发展的基本前提,也可为其他中观尺度研究提供示范。

1 研究方法

1.1 非线性主成分分析

非线性主成分(Nonlinear Principal Component Analysis, 记作 NLPCA)一般包括 Hastie 和 Stuetzle 提出的主曲线和主曲面方法^[30]、scholkopf 提出的核主成分分析^[31]以及 Aitchison 提出的中心对称比变换^[32-35],本文引用的 NLPCA 的中心思想源于后者。

一般来说,中心对称比变换可由描绘的原始数据的散点图的特征作出^[34],若设有 n 个样本, p 个指标,则 NLPCA 的步骤如下:

(1) 对原始数据进行中心化对数比变换:

$$y_{ij} = \lg x_{ij} - \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \lg x_{ij} \quad (1);$$

(2) 计算中心化对数比样本协方差矩阵:

$$S = (s_{ij})_{p \times p} \quad (2)$$

$$\text{其中 } s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ii} - \bar{y}_i)(y_{ij} - \bar{y}_j), \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ii}, \bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij};$$

(3) 从 S 出发求主成分,此后步骤类似于传统主成分分析。

(4) 上述过程中,一般要求解协方差矩阵的非负特征值及其对应的特征向量,有文献^[25,32,34]指出,使用不同的统计软件,有时会得到特征向量分量绝对值相等但方向截然相反的特征向量,为避免特征向量方向的随意性导致失真的评价结果,对于预处理后的数据矩阵,通过对假设存在的最优样本 A 和最劣样本 B (标准化值越大越优越劣)对比寻找确定特征向量的正负。式(3)为特征向量方向的验证公式,其中 $\vec{e}$ 为所求协方差的特征向量,若符合式(3)则为正,反之为负。

$$\vec{e}A > \vec{e}B \quad (3)$$

1.2 格莱姆施密特正交化

格莱姆施密特正交化(Gram Schmidt Orthogonalization, 记作 GSO)是线性代数中常用的正交化方法,它提供了通过子空间上的一个基向量得出其他正交基的一种方法,并可进一步求出对应的标准正交基,其基本思想是利用投影原理在已有正交基的基础上构造新的正交基^[36]。式(4)~(6)为三维向量正交化的一般过程。

由于可持续发展评价过程中各子系统的评价结果实质是源于自身样本群的主成分分析聚合值,不同样本群的数据离散程度的差异万千导致了各子系统的可持续发展水平评价只适于一次性分析^[27-28],因而本文认为传统的基于主成分分析的可持续发展评价研究中对各子系统的形色各异的加权计算是有待于商榷的^[22-24]。而本文认为若对全部子系统的主成分得分形成的向量组进行以各向量为基底向量的有限次正交化,从而通过投影的原理使得各子系统的评价结果保持独立和有可比性,因此引入正交化与非线性主成分分析的耦合来优化评价过程。

$$\vec{b}_1 = \vec{a}_1 \quad (4)$$

$$\vec{b}_2 = \vec{a}_2 - \frac{[\vec{a}_2, \vec{b}_1]}{[\vec{b}_1, \vec{b}_1]} \vec{b}_1 \quad (5)$$

$$\vec{b}_3 = \vec{a}_3 - \frac{[\vec{a}_3, \vec{b}_1]}{[\vec{b}_1, \vec{b}_1]} \vec{b}_1 - \frac{[\vec{a}_3, \vec{b}_2]}{[\vec{b}_2, \vec{b}_2]} \vec{b}_2 \quad (6)$$

1.3 NLPCA-GSO 可持续发展评价模型构建

1.3.1 数据预处理

依据文献^[25,33]对多指标无量纲化方法的讨论,本文采用均值化方法对指标进行无量纲化,以避免出现极差法和 z-score 等处理方法可能所致的不足,包括原始数据群差异性的消除和权重过分依赖极大和极小值,并在均值化处理之前对逆向指标用倒数法采取同趋势化处理^[37]。从而,区域可持续发展水平、发展持续性和系统协调度模型的构建依次如下:

1.3.2 区域可持续发展水平模型

将区域可持续发展系统划分为社会、经济和环境三个子系统^[16,38],按照上述 NLPCA 的步骤对 n 组样本(空间角度分析时不同样本指不同区域,时间角度下则指不同年份)分别根据非线性主成分分析求出每个子系统的可持续发展水平(Sustainable development level, 记作 SDL)。再令三个子系统的得分值(记作 NLPCA-SDL)为一个 $n \times 3$ 的向量组,以 3 个列向量(即社会、经济和环境子系统 2001—2010 年的主成分得分)分别作为基底向量对向量组进行正交化及单位化处理,并对所得的 3 个 n 维列向量求和,不同基底向量正交化的列向量之和的平均值可表征区域可持续发展水平(记作 SDL_{GSO})。无论是线性还是非线性主成分分析方法计算出的 SDL 值仅对每个子系统的样本群有意义,而不适用于与其他子系统进行横向比较或加权求和^[26-28]。

为保证整个区域可持续发展系统 SDL 评价的合理性,本文在得到上述三个子系统的 SDL 基础上对其进行正交化和单位化,使得向量 SDL_{GSO} 在其他方向的映射为零,而且以 3 个列向量分别为基底向量的处理方式巩固了结果的均质性,可合理地解决各个子系统可持续发展水平上的不可比性,实现各子系统 SDL 在可持续发展系统角度的统一,其结果能表征区域 SDL 在不同样本之间的变化值(如时间序列的样本下可表征 SDL 的变化趋势)。

1.3.3 区域发展持续性模型

本文视区域发展的持续性(Sustainability of regional development, 记作 SRD)是不同样本间(如时间序列)区域可持续发展水平增长速度的变化,即增长加速度的大小,仿照物理学中的加速度计算公式 $x = v_0 t + \frac{1}{2}$

$\frac{d^2x}{dt^2}t^2$ 和平均速度的思想,其中 x, v_0, t 和 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 分别为位移、初速度、时间和加速度。构建模型如下:

$$SRD_j = \frac{d^2x}{d\Delta t^2} = \frac{2(x_i - x_1)}{\Delta t^2} - \frac{2v_0}{\Delta t}, i = 1, 2, \dots, n-1, j = 1, 2, \dots, n-2, \Delta t = 2, 3, \dots, n-2 \quad (7)$$

$$v_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{1}, i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

式中, x 指 SDL 值, x_0 设定为第一个样本的值(SDL_1), n 为样本的数量, Δt 为样本间隔数, v 代表下一个样本 SDL 值相对上一个的增速,第 i 个速度作为第 $i+1$ 个样本的初速度, n 个样本只有 $n-1$ 个平均速度,本文只需计算 v_1 并令其为全部样本的初速度。

1.3.4 区域可持续发展系统协调度

区域可持续发展协调度能反映系统内部各子系统之间协调发展水平,以及经济、社会和环境之间的关联效率,用以评判区域社会经济与环境是否协同发展^[39]。由于通过 NLPCA-GSO 耦合分析得到的各子系统的 SDL 仅适于计算可持续发展系统的 SDL,仍然不适宜横向比较,但各子系统的 SRD 是适于横向比较的,而且 SRD 值更能表征区域发展的质量,因此本文视各子系统 SRD 之间的协调水平为整个区域可持续发展系统协调度(System coordination, 记作 SC),并构建模型如下:

$$SC_j = 1 - \frac{|\overline{SRD_j} - \overline{SRD}|}{\sum_{m=1}^3 |\overline{SRD_j} - \overline{SRD}|_m^2}, j = 1, 2, \dots, n-2 \quad (9)$$

式中, $m=1,2,3$ 分别代表社会、经济和环境子系统, $|SRD_j - \overline{SRD}|$ 表征每个样本中某 SRD 偏离三个子系统平均 SRD 的程度。

2 实证研究

2.1 数据来源

参考已有研究^[18-19,38,40-41], 基于科学性、可行性和针对性等综合全面考虑子系统发展状况构建环渤海区域的指标体系(见表1)。社会子系统的指标从人民生活水平(C1-C6)和社会发展水平(C7-C12)两方面选取;经济子系统的指标从经济规模(C13-C18)、经济结构(C19、C20)和经济效益(C21、C22)三方面指出;而环境子系统的指标从资源水平(C23、C24)、生态指数(C25、C26)、环境污染(C27-C29)和环境保护(C30-C34)等方面选择,多个指标综合的以上各主题或方面均是组成各子系统不可或缺的基本构架。构建的指标体系旨在尽可能地提高社会-经济-环境构成的可持续发展系统的整体性,也考虑指标间的独立性,而部分指标间存留的相关性在主成分分析的过程中可以消除。

其中大部分指标由二次计算可得,由于城乡居民相关信息统计的口径不一致所以 C2、C5、C6 和 C8 由城镇和农村居民的数据重新核算而来,以及其他二次计算,总体来说,为满足指标选取的实用性、可操作性,以及结果的真实性和可比性,尽可能实现均值、单位均值和百分率等形式表示,如以人均值、密度、所占比例、利用率和达标率等形式表征。

表1 环渤海区域可持续发展评价指标体系

Table 1 The indicators system of the social, economic and environmental subsystem in the Bohai Rim

社会子系统指标 Indicators of society system	经济子系统指标 Indicators of economy system	环境子系统指标 Indicators of environment system
C1 失业率	C13 人均 GDP(元)	C23 人均水资源/ m^3
C2 人均居住面积/ m^2	C14 经济密度/(元/ m^2)	C24 万元 GDP 能耗/tce
C3 成人识字率	C15 人均财政收入/元	C25 人均森林蓄积量/ m^3
C4 平均预期寿命	C16 人均出口额/元	C26 自然保护区占国土面积比重
C5 全社会人均可支配收入	C17 人均固定资产投资/元	C27 人均 SO_2 排放量/kg
C6 城镇居民与农民人均收入比		C28 人均 COD 排放量/kg
C7 城市化率	C18 人均消费品零售额(元)	C29 人均工业固废排放量/kg
C8 全社会恩格尔系数	C19 第一产业占 GDP 比重	C30 环境污染治理投资占 GDP 比例
C9 每万人医疗卫生床位/张	C20 第三产业占 GDP 比重	C31 工业固废综合利用率
C10 每万人口大学生数	C21 在岗职工平均工资(元)	C32 工业废水排放达标率
C11 人均邮电业务量/元	C22 全社会劳动生产率	C33 工业烟粉尘排放达标率
C12 人均公路里程数/km		C34 工业 SO_2 排放达标率

有关数据主要来源于《国家统计年鉴》(2002—2011)、《北京统计年鉴》(2002—2011)、《天津统计年鉴》(2002—2011)、《河北经济年鉴》(2002—2011)、《山东经济年鉴》(2002—2011)、《辽宁经济年鉴》(2002—2011),并由相应年份的中国环境统计年鉴和各类公报等补充,环渤海区域的数据是由分别由各省市数据按其人口数权重加权所得。

2.2 数据处理

本文选取的环渤海区域包括北京、天津、河北、山东和辽宁五个省市,因此环渤海区域可持续发展评价指标体系的原始数据源于五省市的加权求和,各种人均值以各省的人口占整个环渤海区域的比例为权重,百分率先通过各省比例还原该属性值再计算整个环渤海的比例值,以此类推。

对环渤海区域社会(SOC)、经济(ECO)和环境(ENV)子系统 2001—2010 年的原始数据进行同趋势化(倒数法)和标准化(均值法)预处理,然后经过式(1)和式(2)得到样本协方差矩阵,求得该矩阵的特征值和特征向量(可在 Spss 或者 Matlab 下运行),并由式(3)决定特征向量的正负,分别按照上述 NLPCA 的步骤运行得到各子系统的 SDL,即 SOC、ECO 和 SOC 子系统时间序列下的 10 行 3 列的 NLPCA-SDL 结果。从而在此

基础上根据 GSO 法计算,即参照式(4)—(6),将 SOC、ECO 和 SOC 的 3 个列向量各看作基底向量($\vec{a_1}$)一次,其它两个列向量则看作 $\vec{a_2}$ 和 $\vec{a_3}$,再按照 1.3 小节的步骤进行运算,进而根据式(7)—(9)得到 SRD 和 SC 结果。

3 实证研究结果与分析

3.1 环渤海区域可持续发展水平评价

根据非线性主成分分析法计算出各子系统的主成分综合得分值(NLPCA-SDL),见表 2 中第 2—4 列,再对三个子系统的 NLPCA-SDL 值进行以 3 次不同向量为基底的正交化和单位化处理得到 SDL_{GSO} (第 4—6 列),分别求和再求平均值即为区域的 SDL(第 7 列)。从第 2—4 列数值也可知社会、经济和环境子系统的结果只能表征各子系统自身在 2001—2010 年的变化状况,但横向比较则不妥也不符合实际,比如 2010 年环境子系统的 NLPCA-SRD 值甚至远远大于社会和经济子系统,2001、2003 和 2005 年也存在类似状况,因此证实了传统方法下各子系统简单的加权求和所得的 SDL(第 8 列)也不能表征真正的可持续发展系统的水平。

表 2 环渤海区域 2001—2010 年基于 NLPCA-GSO 的 SDL 值结果
Table 2 The results of SDL based on NLPCA-GSO of Bohai Rim from 2001 to 2010

样本 Sample	NLPCA-SDL			SDL _{GSO}			SDL *	SDL-传统
	SOC	ECO	ENV	SOC-基底	ECO-基底	ENV-基底		
	社会 Society	经济 Economy	环境 Environment					
2001	-0.5985	-0.4522	-0.4565	-0.4976	-0.8029	-0.7515	-0.6840	-0.5024
2002	-0.4612	-0.41	-0.4781	-0.7951	-0.7739	-0.7203	-0.7631	-0.4498
2003	-0.3645	-0.3154	-0.2536	-0.4047	-0.4234	-0.5348	-0.4543	-0.3112
2004	-0.245	-0.1845	-0.2273	-0.0233	-0.1739	0.2357	0.0128	-0.2189
2005	-0.1327	-0.0906	-0.1765	-0.0628	-0.1951	0.2679	0.0033	-0.1332
2006	0.0627	0.4021	-0.228	0.8638	-0.5898	0.755	0.343	0.079
2007	0.1664	0.0777	-0.0911	-0.3687	-0.0845	0.0824	-0.1236	0.051
2008	0.2453	0.1732	-0.1909	-0.4267	-0.253	0.2317	-0.1493	0.0759
2009	0.3008	0.2057	0.0068	-0.1716	0.0704	0.3038	0.0675	0.1711
2010	0.3538	0.2897	0.5836	0.8605	0.9494	0.5323	0.7807	0.4090

* SDL:可持续发展水平 sustainable development level.

结合表 2 和图 1 可知,2001—2010 年环渤海区域整体的可持续发展水平有明显的提高(从-0.6840 到 0.7807,主成分分析的结果出现负值是正常的,总体而言值越大系统发展水平越大,反之则越小),其中 2006—2010 年间出现缓冲阶段,2006 年下降后再于 2008 年后回升,反查原始数据得知 2006 年(“十二五”规划的起始年)相比之前社会、经济发展和环境保护的各项指标都得到了改善,而 2007 年之后并非每项指标的改善水平都保持下来,也可能源于各子系统中一些指标改善的相互限制,如环境污染治理投资的比例没有同步赶上 GDP 总量的增长,或者表征经济规模的指标与资源水平,以及表征经济效益的指标和收入公平指标间的相互限制等等。而只有科技水平和分配公平的日益进步逐渐抵消了这种相互的限制,才会使可持续发展提高到新的水平。同时,图 1 中环渤海区域可持续发展水

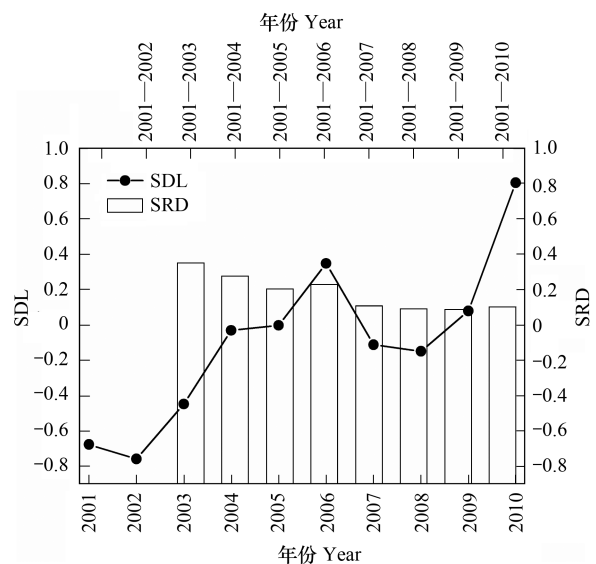


图 1 环渤海区域 2001—2010 年 SDL 和 SRD 变化图
Fig. 1 The changes of SDL and SRD during 2001—2010 in the Bohai Rim region

平的变化情况与实际情况的对比分析也能够验证了 NLPCA-GSO 模型的可行性,说明只有经过非线性和正交化的优化处理后主成分分析的结果才能准确地应用到可持续发展评价的理论和实践中。

3.2 环渤海区域发展的持续性评价

图 1 的次横纵坐标(图上方坐标)是针对 SRD 的变化趋势而言,本研究涉及的持续性是指 2003—2010 年间的每一年段的区域发展水平相对于 2001—2002 年间的变化率,以第一个年际间(2001—2002 年)的增速为初始增速,由图可知 SRD 的变化始终处于下降趋势却保持正值,说明该区域发展的持续性下降但区域发展水平仍然是保持提高的。但 2006 年之后的下降幅度逐渐平缓,即 2006 年之后该区域发展持续性的下降趋势有所缓解,这一点也可从 SDL 的绝对水平值上得到验证,也与事实相符。区域发展的持续性下降主要是由于社会保障水平提高、产业结构优化、节能环保的技术创新等方面都还有很大的空间,在未来政府应继续实行绿色经济和社会机制,加大技术创新、新能源开发等的投入力度,积极探索适合环渤海经济圈的生态文明发展模式。

由图 1 也可知,环渤海区域社会子系统的 SDL 在 2003—2010 年间是缓慢上升,经济子系统总体轻微下降,而环境子系统则大幅度下降,从而也间接地说明了图 2 中 SRD 的下降主要源于环境子系统 SRD 的变化。因此若是加快和加大生态环境保护的节奏和力度,增加环境子系统的持续性,可能是改善和调节环渤海区域发展的持续性的一剂最佳良药。

3.3 环渤海区域发展的协调性评价

图 2 形象地证实了环渤海区域可持续发展的系统协调度的变化,各子系统的持续性大小的分歧和偏差越大其协调度小,反之协调度越大,也可看出该区域发展的协调度总体上是呈上升趋势,但这种协调度的提高主要显现在 2006 年之前,是由社会子系统持续性的小幅度提高和环境子系统持续性的大幅度下降引起的,尤其是后者。2006 年之后,各子系统持续性的变化相差无几,因而造成了三个子系统间的协调性的较稳定地提高,然而,这种形式下的可持续发展系统协调性的进步是不能够在本质上提高该区域可持续发展的能力,未来应该同步加强社会、经济和环境子系统的持续性和之间的协调性,比如资源生态承载力的提高、产业结构的优化和生活水平的提高等多方面的同步实现。

3.4 定性综合评价

基于环渤海区域 2001—2010 年的可持续发展水平、持续性和系统协调性的定量地研究结果(图 2 和图 3),若将三者都定性地分为好、较好、中等、较差和差五个等级,并以 SDL 的变化程度为基准将研究时段划分为表 3 中五个阶段。总体上来看环渤海区域的可持续发展综合能力在十年中有进步的趋势,主要表现为 SDL

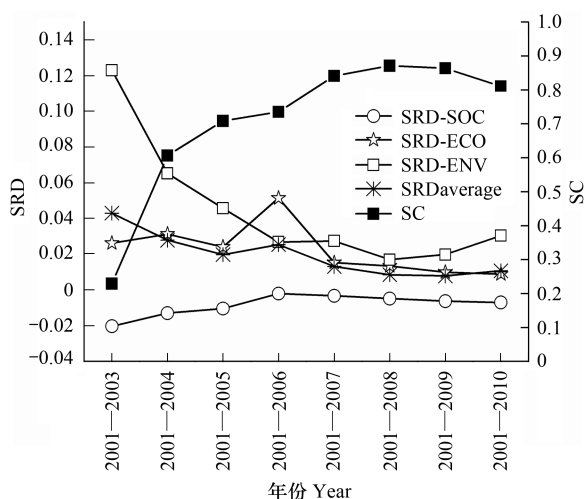


图 2 环渤海区域各子系统 SRD、平均 SRD 和 SC 变化图
Fig. 2 The change of SRD in subsystems, average value of SRD and SC

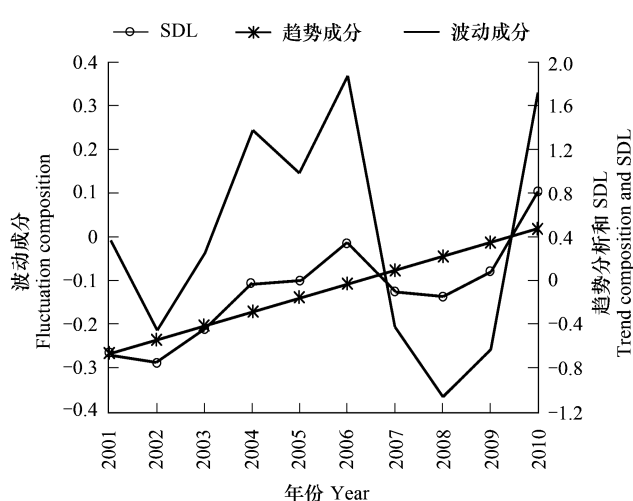


图 3 环渤海区域可持续发展系统变化曲线滤波分析
Fig. 3 Filtering analysis of change curve of sustainable development system in Bohai Rim region

和 SC 的提高,但 SC 的有所提高本质上是由于环境子系统的 SRD 的下降引起的(图 3),说明环境子系统水平的优化是该区域当前最亟待解决的问题,若是大力敲响生态环境保护的节奏在未来可能会转变成促进社会经济发展和促进整个环渤海区域实现可持续发展的最有利因素。表 3 也可清晰地反映相应阶段的可持续发展的截面状况,能针对性地找到各时段的具体症状。

结合上述可持续发展的水平、持续性和协调性的分析结果,环境子系统的可持续性制约环渤海区域可持续发展的瓶颈因子,因此说明传统的经济增长至上理念的发展模式带来了资源环境危机,从而制约了区域可持续发展的实现,而环境子系统指标集中呈现的水资源和大气污染指标应是本地区的制约因子,它们本质上是由重工业化的过度(尤其河北和山东)、产能过度扩张和空间的过度集中(产业趋同和不良竞争)等引起的。

3.5 环渤海区域可持续发展水平曲线的滤波分析

时间序列一般包含长期趋势和循环趋势,为了深入分析环渤海区域可持续发展系统变化的表现,对可持续发展水平(SDL)的时间序列进行趋势要素和循环要素分解,采用常用的经济变量长期趋势分解方法 HP 滤波分析法,将可持续发展系统的变化可分解为趋势成分和

表 3 环渤海区域 2001—2010 年可持续发展综合能力

Table 3 Sustainable development comprehensive capability of Bohai Rim region from 2001 to 2010

阶段 Phase	SDL *	SRD	SC
[2001,2003]	差	较好	差
[2004,2005]	较差	中等	较差
(2005,2006]	中等	中等	较差
[2007,2009]	较好	较差	较好
(2009,2010]	好	较差	中等

SC: 系统协调度 System coordination; SRD: 区域发展的持续性 Sustainability of regional development; SDL: 可持续发展水平 Sustainable development level。

波动成分的时间序列,波动成分也称之为可持续发展变化表现的缺口即实际变化指数与潜在变化指数的差额^[42],它既可以反映环渤海区域可持续发展系统的变化趋势,也可以反映周期波动的变化轨迹。因此,由图 3 可看,2001—2010 年,环渤海区域的可持续发展系统的发展水平缺口小于 0 的年份有 5 个,但这并未 SDL 曲线的潜在变化指数的平稳上升趋势,其由-0.68 增长到 0.44,说明环渤海区域近十年综合的可持续发展水平确实不断提升。但是,研究期间的波动成分的缺口总和接近于 0(图 3 波动成分曲线),说明可持续发展实际变化指数与潜在变化指数相差不大,而 2005 年之后的波动程度越来越大,且增大幅度明显,说明虽然整个区域的可持续发展水平变化率提升了但可持续发展系统越来越不稳定,可能是由高经济增长、高能源消耗、高污染排放的根本矛盾引起的,这些加剧了资源、能源和生态承载能力的紧张程度。同时,也警示了在关注可持续发展水平变化的前提下,也应该剖析可持续发展系统变化的稳定性。因此,环渤海区域未来应重点降低环渤海区域可持续发展系统的敏感性,即其对内外变化的响应程度,包括能源强度和水、气、固废的排放强度等。也应该提高系统适应外界变化而进行的自我调整能力,包括系统内资源的多样性及利用形式的多样性,由各种经济效益和经济结构优化带来的恢复力,以及科技创新能力指标等构架而成的支撑力。

4 结论与讨论

4.1 结论

综上,基于 NLPCA-GSO 耦合方法极大地优化和完善了区域可持续发展水平的评价,并且在此基础上尝试构建的区域发展持续性和可持续发展系统协调度模型也丰富了区域可持续发展的定量和评价理论方法。区域可持续发展系统是一个多目标系统,对其评价既要考虑运行过程,又要考虑最终结果。实证研究表明 2001—2010 年环渤海区域可持续发展水平是波动上升的,然而如果浅显的调查研究其可持续发展水平是远远不够的,只有结合区域发展水平的持续性变化和可持续发展系统间的协调性才能更好地揭示可持续发展综合能力的本质,与此同时,可持续发展系统变化的波动性是验证可持续发展系统稳定性的关键因素。研究结果也说明了当前形势下,尽管科技水平的进步能带来资源能源利用水平和环境废物处理能力的提高,但仍然远远不能抵消当前发展模式造成的生态环境危机,因此亟需从根本上解决问题,同时也证实了只有可持续发

展水平、持续性和系统协调性这三驾马车齐头并进的时候区域可持续发展才能真正实现。

4.2 讨论

4.2.1 模型和方法

(1)同趋势化和标准化方法的选择:常用的同趋势化方法有负向法、倒数法及与适度值差值的倒数变换法等,文献^[37]证明了负向法对于逆向指标一般无效,当指标中没有出现 0 值时倒数法较适用而出现 0 时比较适于运用与适度值差值的倒数变换法,本文选取的指标中没有出现 0 值,而且各个逆向指标倒数的实际意义也需要一一确认,因此同趋势化方法的选取是有针对性的。常用的数据标准化方法包括 Z-score 法、极值法、归一化法和均值法,但文献^[25]认为 Z-score 法会消除各指标变异程度上的差异,因而经标准化后的数据不能准确反映原始数据所包含的信息,导致综合评价的结果的不准确,而极差法和归一化法的优点是能使最后的计算结果处于 0—1 之间,但它们选取的极大和极小值对指标的权重会产生很大影响。也有文献^[33]证明了均值法不会消除指标的变异差异,所以当指标值都是客观数值时一般应该用均值化方法对指标进行无量纲化,而当指标值是主观分数时,则用标准化方法可能会更佳^[25]。

(2)Gram-Schmidt 正交化的引入:此种方法是线性代数中常用方法,运算过程简洁明了,可操作性强,尝试引入可持续发展水平评价中可以弥补主成分分析评价只适于一次性评价的这种不足。但若正交化时选择的基底向量不同则导致结果不同,因此本文以各向量分别为基底向量做正交化和单位化,以及对每组正交化和单位化之后的向量求和后再求平均值来达到预期目的,由此改进后的区域 SDL 即可表征区域可持续发展系统纵向的可持续发展水平的变化趋势。

(3)SRD 模型和 SC 模型:本文构建的 SRD 模型是基于 SDL 的增长速度的变化而生,由于各子系统的 SDL 纵向变化趋势在子系统内部是符合实际的,因此可得到各子系统发展的持续性,也为子系统间的协调性评价奠定了基础。但是模型的不足在于若样本数为 n 时 SDL 的增长速度有 $n-1$ 个,因此 SRD 和 SC 只存在 $n-2$ 个。且本文的 SC 模型是针对各子系统持续性的变化趋势而言的。

4.2.2 局限性和未来方向

区域可持续发展的分析与评价是一个探索性很强的研究学科和方向,属于生态学、环境学和地理学等学科的交叉领域,尚处亟待发展阶段。本文以环渤海区域为例,基于传统主成分分析法评价区域可持续发展的理论和方法,但受主客观因素的影响,仍存在一些不足之处,如经济、环境系统涉及资料庞大,但由于现行社会经济统计体系的限制,数据的可得性造成了部分指标无法表现,需要在后续研究加以补充、完善,而且,本实证中尚未涉及区域内部各省区的比较及空间差异方面的研究,这也是下一步工作内容。本实证研究侧重在可持续发展综合系统和子系统层面上的定量分析,而区域可持续发展的实现和环境管理和规划的施行需要精和准的具体指标来引导,因此明确的指标层角度与可持续发展系统间的定量研究期待通过融入景观生态学和环境经济学的思想来实现。

参考文献 (References):

- [1] Singh R K, Murty H R, Gupta S K, Dikshit A K. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 2012, 15(1): 281-299.
- [2] Kates R W, Clark W C, Corell R, Hall J M, Jaeger C C, Lowe I, McCarthy J J, Schellnhuber H J, Bolin B, Dickson N M, Faucheux S, Gallop G C, Grubler A, Huntley B, Jäger J, Jodha N S, Kaspersen R E, Mabogunje A, Matson P, Mooney H, Moore B III, O'Riordan T, Svedlin U. *Environment and development: sustainability science*. Science, 2001, 292(5517): 641-642.
- [3] McMichael A J, Butler C D, Folke C. New visions for addressing sustainability. *Science*, 2003, 302(5652): 1919-1920.
- [4] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉. 可持续发展评价指标体系研究综述. *环境科学与技术*, 2010, 33(3): 99-105.
- [5] Eugenio F B, Carlos O R, Enrique C T. Green accounting and sustainability of the Peruvian metal mining sector. *Resources Policy*, 2010, 35(3): 156-167.
- [6] Pillarsetti J R. The World Bank's "genuine savings" measure and sustainability. *Ecological Economics*, 2005, 55(4): 599-609.
- [7] Bravo G. The human sustainable development index: New calculations and a first critical analysis. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 145-150.
- [8] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, Erb K H, Haberl H, Krausmann F. Calculating national and global ecological footprint time series:

- resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 271-278.
- [9] Baral A, Bakshi B R. Emergy analysis using US economic input-output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol. *Ecological Modelling*, 2010, 221(15): 1807-1818.
- [10] 赵卉卉, 王远, 谷学明, 王义琛, 周婧, 孙友胜. 基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例. *生态学报*, 2012, 32(7): 2025-2032.
- [11] Ronchi E, Federico A, Musmeci F. A system oriented integrated indicator for sustainable development in Italy. *Ecological Indicators*, 2002, 2(1): 197-210.
- [12] Prato T. A fuzzy logic approach for evaluating ecosystem sustainability. *Ecological Modelling*, 2005, 187(2/3): 361-368.
- [13] Jin W, Xu L Y, Yang Z F. Modeling a policy making framework for urban sustainability: incorporating system dynamics into the Ecological Footprint. *Ecological Economics*, 2009, 68(12): 2938-2949.
- [14] Zhang B, Bi J, Fan Z Y, Yuan Z W, Ge J J. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 2008, 68(1/2): 306-316.
- [15] 李祚冰, 汪嘉杨, 熊建秋, 徐婷婷. 可持续发展评价模型与应用. 北京: 科学出版社, 2007: 68-75.
- [16] 檀菲菲, 张萌, 李浩然, 陆兆华. 基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价. *生态学报*, 2014, 34(11): 3090-3098.
- [17] Krajnc D, Glavič P. A model for integrated assessment of sustainable development. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 43(2): 189-208.
- [18] Yu L J, Hou X Y, Gao M, Shi P. Assessment of coastal zone sustainable development: A case study of Yantai, China. *Ecological Indicators*, 2010, 10(6): 1218-1225.
- [19] Tan F F, Lu Z H. Study on the interaction and relation of society, economy and environment based on PCA - VAR model: As a case study of the Bohai Rim region, China. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 31-40.
- [20] Douka H, Papadopoulos A, Savakis N, Tsoutsos T, Psarras J. Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 1949-1957.
- [21] Hosseini H M, Kaneko S. Dynamic sustainability assessment of countries at the macro level: A principal component analysis. *Ecological Indicators*, 2011, 11(3): 811-823.
- [22] 周嘉, 臧淑英. 哈尔滨市可持续发展系统评价. *经济地理*, 2009, 29(3): 494-498.
- [23] Zhou J, Xiao H F, Shang J C, Zhang X L. Assessment of sustainable development system in Suihua City, China. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(4): 304-310.
- [24] 杨银峰, 石培基. 甘肃省城市可持续发展系统协调发展评价研究. *经济地理*, 2011, 31(1): 66-71.
- [25] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择. *浙江统计*, 2003, (4): 24-25.
- [26] 孙刘平, 钱吴永. 基于主成分分析法的综合评价方法的改进. *数学的实践与认识*, 2009, (18): 15-20.
- [27] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [28] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价. *管理工程学报*, 2002, 16(1): 39-43.
- [29] 邹卫星, 周立群. 区域经济一体化进程剖析: 长三角、珠三角与环渤海. *改革*, 2010, (10): 86-93.
- [30] 高迎, 张红云. 主曲线在复杂指纹图像特征提取中的应用. *计算机应用与软件*, 2013, 30(9): 12-15.
- [31] 张九龙, 邓筱楠, 张志禹. 概率核主成分分析及其应用. *计算机工程与应用*, 2011, 47(4): 165-167.
- [32] 徐永智, 华惠川. 对主成分分析三点不足的改进. *科技管理研究*, 2009, (6): 128-130.
- [33] 叶双峰. 关于主成分分析做综合评价的改进. *数理统计与管理*, 2001, 20(2): 52-55.
- [34] 曲双红, 李华, 李刚. 基于主成分分析的几种常用改进方法. *统计与决策*, 2011, (5): 155-156.
- [35] Aitchison J, Egozcue J J. Compositional data analysis: Where are we and where should we be heading? *Mathematical Geology*, 2005, 37(7): 829-850.
- [36] Giraud L, Langou J, Rozloznik M. The loss of orthogonality in the Gram-Schmidt orthogonalization process. *Computers & Mathematics with Applications*, 2005, 50(7): 1069-1075.
- [37] 陈军才. 主成分与因子分析中指标同趋势化方法探讨. *统计与信息论坛*, 2005, 20(2): 19-23.
- [38] Zhang M, Tan F F, Lu Z H. Resource-based cities (RBC): a road to sustainability. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2014, 21(5): 1-6.
- [39] 曾珍香. 可持续发展协调性分析. *系统工程理论与实践*, 2001, (3): 18-21.
- [40] Salvati L, Carlucci M. A composite index of sustainable development at the local scale: Italy as a case study. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 162-171.
- [41] Wang S J, Ma H T, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment—A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 171-183.
- [42] 高铁梅, 王金明, 梁云芳, 刘玉红. 计量经济学分析方法与建模. *Eviews 应用及实例(第二版)*. 北京: 清华大学出版社, 2009.