

区域生态安全演化与绿色经济发展关系实证研究 ——以辽宁省为例

于成学^{1*}, 葛仁东², 李婕旦³

(1. 广东财经大学国际商学院, 广东广州 510320; 2. 大连民族大学理学院, 辽宁大连 116600;

3. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

【摘要】 本文基于DPESAR框架的生态安全指标体系, 选择辽宁省1995—2017年的面板数据, 应用SPSS17.0和EViews6.0软件, 建立生态安全演化与绿色经济发展关系的结构模型, 研究二级指标和三级指标间的相互关系, 识别其影响绿色经济发展的症结, 进而构建最优控制模型, 探讨二者之间的演化关系, 依据辽宁省“十三五”发展规划的指标要求, 模拟并预测辽宁省到2022年的生态安全与绿色经济发展关系的理想演化状态。结果显示: 敏感指标的下降会造成生态安全的恶化。但是, 通过政府的调控, 消除暴露指标 $C(k)$ 通过压力指标带来的滞后影响可以遏制生态环境的恶化。因此, 调整后的生态安全影响因子对绿色经济发展有巨大的促进作用, 从而可以为辽宁省“十三五”的绿色经济发展提供决策依据。

【关键词】 DPESAR框架; 生态安全; 绿色经济发展; 演化状态; 模型与优化

【中图分类号】 P28; Q44

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252(2020)02-0113-10

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.02.113

引言

近年来, 伴随着中国经济的高速发展, 如何在维持生态安全的基础上促进我国经济绿色发展已成为学界与业界关注的焦点。绿色经济是以市场为导向、以传统产业经济为基础、以经济与环境的和谐为目的而发展起来的一种新的经济形式, 是产业经济为适应人类环保与健康需要而产生并表现出来的一种发展状态。绿色经济的焦点是绿色, 即可持续发展, 其中以生态环境可持续尤为重要。生态安全是指生态系统的健康和完整情况, 是人类在生产、生活和健康等方面不受生态破坏与环境污染等影响的保障程度, 生态安全是生态环境可持续的高级状态。换言之, 只有生态环境是安全的, 才能确保生态环境是绿色的, 否则将与人类社会可持续发展背道而驰。因此, 在生态安全框架下考量经济绿色发展是实现经济高质量发展的突破口。

目前已有研究从不同角度对相关领域进行了探讨, 如王耕和吴伟从安全科学的“R-M”理论出发, 探索了区域生态安全渐变—突变过程, 阐释了渐变正相变过程^[1]; 吴开亚、何琼和孙世群基于主成分投影评价模型, 探讨了区域生态安全评价指标的选取和

赋权方法, 并将该模型在安徽省进行了实际的应用^[2]; 王鹏等采用P-S-R模型, 从自然、社会、经济三方面出发, 构建永州市土地生态安全评价指标体系, 运用极差法和熵权法模型, 通过加权求和对永州市2003—2012年的土地生态安全进行评价^[3]; 李晓西、刘一萌和宋涛则在社会经济可持续发展和生态资源环境可持续发展两大维度上, 构建了“人类绿色发展指数”, 测算了123个国家绿色发展指数^[4]; 王兵和刘光天采用两期权重修正罗素模型研究资源环境约束下节能减排对中国绿色全要素生产率的影响效应与机制, 分析节能减排能否实现环境和中国绿色经济的双赢^[5]。

尽管这些研究为深化生态安全的相关理论奠定了重要基础, 但关于区域生态安全演化状态与绿色经济发展关系的研究还未引起学界的重视, 特别是从生态安全动态演化视角, 探讨生态安全的不同状态与绿色经济发展之间关系的研究不多见。为此, 本文以辽宁省为研究对象, 基于DPESAR构建的生态安全状态指标体系, 选取1995—2017年的环境经济、生态安全等方面的面板数据, 建立生态安全演化与绿色经济发展关系的方程模型。通过对控制变量的调节, 得出发展绿色经济的最优理想控制模型。在全面振兴东北地

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“我国环渤海优化开发区域生态安全测评研究: 以辽宁沿海经济带为例”(71373035)。

作者简介: 于成学, (1970—), 男, 博士(后), 教授, 研究方向为生态安全评价研究、绿色发展、绿色经济、可持续发展管理, E-mail: yuchengxue@dlut.edu.cn。

区等老工业基地的实践要求下^[6],研究成果将对推动辽宁生态安全基础上的绿色经济发展起到理论指导作用和措施路径的借鉴与参考。

1 研究方法设计

1.1 指标选取与数据处理

1.1.1 指标选取与数据来源

- (1) 资源环境指标,包括资源利用和环境压力。
 - (2) 自然资源指标,包括水资源,森林资源,矿产资源和土地资源。
 - (3) 环境政策与投资,包括环境科技投资,政策工具,环境治理和国际环境合作。
- 本文除设置了一级指标和6个二级指标外,还设计了64个三级指标。

地区绿色发展指标的数据来源于1995—2018年的《辽宁省统计年鉴》《辽宁省环境公报》,辽宁省国土资源统计和其他职能部门的公报。

考虑到当前学界普遍采用的PSR^[7]、DPSIR^[8]、DPSE^[9]等生态安全评价指标体系存在具体分类模糊、应用情境具有差异性等问题,针对辽宁本地的实际情况并结合国内的相关研究^[10,11],采用范围法,即按可持续发展的主要研究方向对经济、社会、环境等方面进行分类,然后再分层拣选细分目标^[12-18]。因此,本文在原有研究的“驱动力(Driving)—压力(Presser)—暴露(Exposure)—敏感性(Sensitivity)—适应性(Adaptation)—响应(Response)(DPESAR)”的框架基础上,从资源环境指标、自然资源指标、环境政策与投资三个视角出发,共选取64个指标(详见参考文献[19]),构建了涵盖6个二级指标的DPESAR指标体系,指标界定如下:驱动力A(k)指标、压力B(k)指标、暴露C(k)指标、敏感D(k)指标、适应E(k)指标和响应F(k)指标。

1.1.2 建立指标体系

1.1.2.1 原始指标体系及数据归一化

设 $X=(x_{ij})_{m \times n}$, $X'=(x'_{ij})_{m \times n}$, x_{ij} 为标准化前的指标数值, x'_{ij} 为标准化后的

指标数值,其中 m 为评价年份, n 为评价指标的个数。

(1) 正向指标的标准化

正向指标是指指数值越大表明绿色发展越好的指标。正向指标的标准化公式如下。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij})} \quad (1)$$

(2) 负向指标的标准化

负向指标是指指数值越小表明绿色发展越好的指标。负向指标的标准化公式如下。

$$x'_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij})} \quad (2)$$

表1 生态安全指标体系

目标层	准则层	指标层	编号
生态安全指标体系	驱动力	人口自然增长率/%	A1
		市镇人口比重/%	A2
		人均生产总值/元	A3
		游客年增长率/%	A4
		人口密度(市辖区)/(人/km ²)	A5
		各地区国有企业施工数量/个	A6
		旅游业产值占GDP比重(旅游产值)/%	A7
		进出口总额/亿美元	A8
		沿海港口吞吐量/万t	A9
	压力	固废生产总量/万t	B1
		工业废水排放量/万t	B2
		工业废气排放量/t	B3
		每千人口卫生技术人员数/人	B4
		农用化肥施用量/折纯量	B5
		农作物总播种面积/千hm ²	B6
		旅游业从业人员人数/万人	B7
		人均土地面积/km ²	B8
		人均公共绿地面积/m ²	B9
		每千人拥有公交车辆数/每万人	B10
		每千人拥有各级学校数(普通高等学校数)/所	B11
		人均道路面积/万m ² (每万人拥有)	B12
	暴露	城市绿化面积/hm ²	C1
		大中型企业数量/户	C2
		突发环境次数/次	C3
		辽宁省国内游客量/万人次	C4
		环境污染治理投资额/万元	C5
		辽宁全省治理污染投资占全省GDP的百分比/%	C6
		交通事故发生数/起	C7
		渤海,劣于第四类海水水质标准的海域面积/km ²	C8
		年均降水pH值/M	C9

续 表

目标层	准则层	指标层	编号
生态安全 指标体系	敏感	道路交通声环境平均等效声级 /dB	D1
		降尘量 / 万 t	D2
		农民家庭耕地面积 /hm ²	D3
		工业废水排放达标率 / %	D4
		各种粮食总产量 / 万 t	D5
		农村贫困人口 / 万人	D6
		人口迁徙率 / %	D7
		城市环境空气质量达标天数比例 / %	D8
		人均水资源量 / (m ³ / 人)	D9
		人均森林面积 / (hm ² / 人)	D10
		污染物单位平均负荷 / [kg/(m ³ · d)]	D11
		城市集中式生活饮用水水源地水质总达标率 / %	D12
	适应	极端气温最高 /℃	E1
		极端气温最低 /℃	E2
		风灾次数 / 次	E3
		当年人工造林面积 /hm ²	E4
		年平均降水量 /mm	E5
		湿度 /ppmW	E6
		渤海冬季近海海面最低平均温度 /℃	E7
		渤海近海海面比去年升高 /cm	E8
		年平均日照时数 /h	E9
	响应	工业二氧化硫去除率 / %	F1
		相关法规出台数量 / 个	F2
		计划地区生产总值增长率 / %	F3
		计划固定资产投资增长率 / %	F4
		计划公共财政预算收入增长率 / %	F5
		旅游业计划总收入增长率 / %	F6
		计划社会消费品零售总额增长率 / %	F7
		计划外贸出口总额增长率 / %	F8
		计划利用外商直接投资要增长率 / %	F9
		当年计划造林面积 / 千 hm ²	F10
		计划退耕还林还草占地 / 千 hm ²	F11
		计划当年新育 / 千 hm ²	F12
		计划治理水土流失面积 / 万 km ²	F13

(3) 适中指标的标准化

适中指标是指指标越接近某一个规定的值越好的指标。适中指标的标准化公式为

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{x_{j0} - x_{ij}}{M}, & x_{ij} < x_{j0} \\ 1 - \frac{x_{ij} - x_{j0}}{M}, & x_{ij} > x_{j0} \\ 1, & x_{ij} = x_{j0} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $M = \max[x_{j0} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}, \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - x_{j0}]$, x_{j0} 为第 j 个

指标的理想值。

(4) 指标权重的确定

熵值法是一种常用的客观赋权重方法,一般认为,信息熵值越大,系统的结构越均衡,差异性越小,指标的权重就越小,反之亦然。运用熵值法计算权重主要分为 5 个步骤:

Step1: 数值标准化处理,具体见公式 (1) ~ (3)。

Step2: 比重确定

$$Y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (4)$$

Step3: 熵值计算

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln Y_{ij} \quad (5)$$

Step4: 变异系数计算

$$\gamma_j = 1 - e_j \quad (6)$$

Step5: 权重计算,记 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为权重向量

$$v_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{j=1}^n \gamma_j} \quad (7)$$

采用熵值法^[20]对 6 个二级指标进行归一化处理(表 2)。

1.1.2.2 信度检验

应用 Spss17.0 统计软件,对二级指标层所对应的三级指标进行信度分析,检验结果见表 3。

由表 3 中前 6 行可以看出,除了适应指标 E 的基于标准化项的 Cronbach's Alpha 系数是 0.241,其余二级指标的信度都在 0.7 以上;由表中最后一行看出整体检验 64 个三级指标数据 Cronbach's Alpha 系数达到了 0.8 以上,在宏观分析上达到了可靠性要求。适应指标 E 的可靠性较低是因为支配区域气候的主要因素受由全球气候变化影响,说明检验结果与实际相符,可以用于统计分析。

表 2 中标出的不合理指标,需要对原指标体系进行修正,再利用熵值法对新指标进行求权,获得新的二级指标相对权重,并进行归一化数据处理(表 4)。

表2 指标归一化的数据结果

准则层 年份	驱动力 A (k)	压力 B (k)	暴露 C (k)	敏感 D (k)	适应 E (k)	响应 F (k)
1995	0.062 5	0.554 0	0.170 4	0.299 3	0.478 9	0.338 8
1996	0.079 8	0.550 9	0.130 4	0.478 4	0.538 5	0.426 5
1997	0.103 8	0.573 5	0.120 3	0.496 4	0.584 6	0.312 3
1998	0.159 3	0.612 6	0.145 2	0.409 1	0.569 7	0.323 6
1999	0.171 6	0.731 6	0.149 5	0.240 2	0.558 1	0.323 7
2000	0.117 9	0.722 5	0.211 5	0.251 7	0.453 7	0.300 5
2001	0.176 1	0.758 2	0.138 9	0.257 3	0.506 3	0.351 7
2002	0.249 8	0.770 8	0.160 3	0.351 8	0.599 5	0.537 4
2003	0.276 9	0.633 3	0.179 7	0.389 4	0.606 0	0.661 5
2004	0.306 6	0.621 9	0.331 3	0.493 9	0.646 2	0.520 0
2005	0.317 2	0.618 7	0.415 9	0.649 2	0.657 9	0.572 9
2006	0.378 7	0.613 4	0.465 7	0.588 3	0.635 9	0.417 3
2007	0.413 9	0.585 5	0.406 2	0.603 3	0.738 9	0.431 0
2008	0.473 5	0.577 6	0.404 7	0.624 4	0.454 9	0.465 8
2009	0.501 5	0.602 3	0.408 9	0.551 0	0.457 2	0.536 0
2010	0.594 5	0.453 8	0.595 2	0.740 1	0.478 1	0.559 7
2011	0.698 1	0.350 3	0.603 1	0.601 9	0.384 5	0.536 6
2012	0.7761	0.339 5	0.583 5	0.690 8	0.570 9	0.581 9
2013	0.828 7	0.262 7	0.615 8	0.651 2	0.683 7	0.529 7
2014	0.870 3	0.216 7	0.704 8	0.563 9	0.536 9	0.437 3
2015	0.780 1	0.158 4	0.673 2	0.526 0	0.541 5	0.333 5
2016	0.747 6	0.205 3	0.672 2	0.647 6	0.553 8	0.222 7
2017	0.821 2	0.203 9	0.6979	0.627 7	0.610 7	0.240 7

表3 信度检验结果

检验指标	Cronbach's Alpha 系数	基于标准化项的 Cronbach's Alpha 系数	项数
驱动力指标 A1 ~ A9 的可靠性检验	0.894	0.875	9
压力指标剔除 B6、B9 的可靠性检验	0.769	0.779	10
暴露指标剔除 C2、C8、C9 的可靠性检验	0.709	0.701	6
敏感指标 D 中剔除 D11 的可靠性检验	0.760	0.702	11
适应指标 E 剔除 E4、E8 的可靠性检验	0.140	0.241	7
响应指标 F 的可靠性检验	0.728	0.705	13
6 个三级指标的数据可靠性检验	0.834	0.790	64

1.2 测量模型构建

1.2.1 测量模型的建立

为了清晰地确定二级指标对三级指标的演化趋

势, 需要构建二级指标对三级指标的测量模型才能实现。

应用 Eviews6.0 软件, 对表 3 数据进行回归分析。在回归系数满足显著性水平的条件下, 尽可能地使最优度达到最大。本文首先选择驱动力 A (k) 对其所控制的三级指标 A3 (k) 的影响进行分析 (表 5)。

同时, 回归残差通过平稳性检测。同理, 也可以得到其他的测量模型。据此, 建立优度达到 80% 以上的自回归模型如下:

$$A3(k) = 1.271321A(k) - 0.153368 \quad (8)$$

$$A7(k+1) = 1.109224A(k) - 0.462559B(k) \times F(k) \quad (9)$$

$$A8(k) = 1.177841A(k) - 0.405501B(k) \times F(k) \quad (10)$$

$$A9(k) = 1.178331A(k) - 0.614137B(k) \times F(k) \quad (11)$$

$$B1(k) = 0.742291B(k)^{1/2} - 0.949691A(k) - 0.692429D(k)^{1/4} \quad (12)$$

表4 新获得二级指标的归一化结果

准则层 年份	驱动力 A (k)	压力 B (k)	暴露 C (k)	敏感 D (k)	适应 E (k)	响应 F(k)
1995	0.062 5	0.554 0	0.080 3	0.221 7	0.478 9	0.250 3
1996	0.079 8	0.550 9	0.061 9	0.398 5	0.538 5	0.329 8
1997	0.103 8	0.573 5	0.059 6	0.418 4	0.584 6	0.230 0
1998	0.159 3	0.612 6	0.084 5	0.331 1	0.569 7	0.254 9
1999	0.171 6	0.731 6	0.104 4	0.161 2	0.558 1	0.227 5
2000	0.117 9	0.722 5	0.181 1	0.183 4	0.453 7	0.256 3
2001	0.176 1	0.758 2	0.116 4	0.194 4	0.506 3	0.254 9
2002	0.249 8	0.770 8	0.122 1	0.294 7	0.599 5	0.320 0
2003	0.276 9	0.633 3	0.165 0	0.337 0	0.606 0	0.286 5
2004	0.306 6	0.621 9	0.263 8	0.419 8	0.646 2	0.277 4
2005	0.317 2	0.618 7	0.363 0	0.563 5	0.657 9	0.347 8
2006	0.378 7	0.613 4	0.428 4	0.507 5	0.635 9	0.384 7
2007	0.413 9	0.585 5	0.308 2	0.520 5	0.738 9	0.418 9
2008	0.473 5	0.577 6	0.306 8	0.546 5	0.454 9	0.448 0
2009	0.501 5	0.602 3	0.340 3	0.551 0	0.457 2	0.494 6
2010	0.594 5	0.453 8	0.560 0	0.730 7	0.478 1	0.521 3
2011	0.698 1	0.350 3	0.505 2	0.577 9	0.384 5	0.425 8
2012	0.776 1	0.339 5	0.583 5	0.665 0	0.570 9	0.458 5
2013	0.828 7	0.262 7	0.593 2	0.618 6	0.683 7	0.443 3
2014	0.870 3	0.216 7	0.621 9	0.555 1	0.536 9	0.345 1
2015	0.780 1	0.158 4	0.658 1	0.503 9	0.541 5	0.252 3
2016	0.747 6	0.205 3	0.634 5	0.620 1	0.553 8	0.127 7
2017	0.821 2	0.203 9	0.652 7	0.598 3	0.610 7	0.160 4

表5 驱动力 A (k) 对其所控制的三级指标 A3 (k) 的回归结果

变量	系数	标准差	t- 检验	概率
A (k)	1.271 321	0.047 795	26.599 68	0.000 0
C	-0.153 368	0.024 358	-6.296 369	0.000 0
R ²	0.971 175	因变量均值		0.394 165
调整后的 R ²	0.969 803	因变量标准差		0.359 425
回归方程	0.062 459	拟合优良		-2.625 683
残差平方和	0.081 923	滞后期统计量		-2.526 945
对数可能性	32.195 36	Hannan-Quinn 标准		-2.600 851
F- 统计	707.542 9	杜宾 - 沃森检验		1.072 855
概率统计	0.000 000			

$$B2(k) = 0.744\,565B(k)^{1/2} + 2.372\,268A(k)^{2/3} - 2.065\,068C(k)^2 - 0.768\,433 \quad (13)$$

$$B5(k) = 1.267\,020B(k) - 0.379\,112A(k) \quad (14)$$

$$B8(k) = -0.457\,302B(k)^3 - 1.227\,039A(k) + 1.097\,400 \quad (15)$$

$$C1(k) = 0.508\,405C(k) + 0.913\,359A(k)^2 \quad (16)$$

$$C4(k) = 0.318\,150C(k) + 1.031\,150A(k)^2 \quad (17)$$

$$D1(k) = 1.013\,354D(k)^2 + 0.825\,936A(k) + 0.512\,665B(k)^2 + 0.529\,585F(k)^{1.2} - 0.339\,622 \quad (18)$$

$$D2(k) = -1.435\,704C(k)^3 + 0.608\,169D(k)^2 + 1.312\,289A(k) \quad (19)$$

$$D4(k) = 1.756\,984D(k)^{1/10} + 2.066\,999A(k)^{0.3} + 0.964\,715B(k)^2 - 2.650\,451 \quad (20)$$

$$D9(k) = 3.023\,137D(k)^2 - 3.294\,728A(k) \times B(k)^{2/3} - 0.431\,347 \quad (21)$$

$$F3(k) = 3.030\,753F(k) - 1.264\,241A(k)^{2/3} \times B(k) \quad (22)$$

$$F4(k) = 1.292\,169F(k)^2 + 0.507\,094A(k)^3 \quad (23)$$

对式(8)~式(23)进行回归分析后,可以得到最大显著性水平和最优度(见表6)。

由于所获得数据大部分来源于国家统计局和地方等相关部门的统计数据,数据存在误差,因而调整后的最优度能够达到80%以上即为比较满意。

1.2.2 测量模型的合理性解释

在讨论测量模型时,当二级指标对三级指标产生负影响时,需找出其关键影响原因。

通过测量模型的回归结果式(8)~(23),可以看出A3(k)的影响完全由A(k)造成的,与其他二级指标不相关。A7(k+1)、A8(k)、A9(k)除了受A(k)影响

表6 回归后的最大显著性水平和最优度

被解释变量	描述最大的显著性水平概率	最优度	调整后的最优度
A3(k)	0.000 0	0.971 2	0.969 8
A7(k+1)	0.000 0	0.897 5	0.892 4
A8(k)	0.000 0	0.959 2	0.957 2
A9(k)	0.000 0	0.982 6	0.981 7
B1(k)	0.000 1	0.903 3	0.893 7
B5(k)	0.000 0	0.863 0	0.856 5
B8(k)	0.000 0	0.926 7	0.919 4
C1(k)	0.000 0	0.962 2	0.960 4
C4(k)	0.000 0	0.972 5	0.971 2
D1(k)	0.003 0	0.837 5	0.801 4
D2(k)	0.000 0	0.946 6	0.941 2
D4(k)	0.000 0	0.834 2	0.808 0
D9(k)	0.000 0	0.819 2	0.801 1
F3(k)	0.000 0	0.829 2	0.821 1
F4(k)	0.000 0	0.813 9	0.805 1

外,还受到 $B(k)$ 和 $F(k)$ 的交互负影响,这是因为旅游业产值占 GDP 比重 ($A7$) 受到旅游从业人数的影响,同时也受到环境保护的限制;同时,进出口总额、沿海港口吞吐量 ($A8, A9$) 也受到政府的投资政策及地方经济保护的影响。

$B2(k)$ 受 $B(k)$ 和 $A(k)$ 的正影响。工业废水排放量减少和固体废物产生总量减少有关,而影响速度在逐渐减少是与科学技术水平提升有关; $B2(k)$ 受到 $C(k)$ 的负影响是因为环境治理投资额增大意味着污染压力亦在增大。 $B1(k)$ 和 $B5(k)$ 与 $B(k)$ 成正向影响,与 $A(k)$ 成负向影响。固体废物产生总量减少受工业废水排放量和工业废气排放量减少的正影响,同时与人均生产总值增加和沿海港口吞吐量增加成负向关系。

$C1(k)$ 、 $C4(k)$ 都受 $A(k)^2$ 的正影响。城市绿化面积和辽宁省国内游客量增长是受人均生产总值、游客年增长率及旅游业产值所驱动,绿色产业发展速度有逐年递增趋势。

$D2(k)$ 受 $C(k)$ 的负影响。降尘量的减少与辽宁省国内游客量的增加驱动有关。 $D9(k)$ 受 $A(k)$ 与 $B(k)$ 交互的负向影响,人均水资源量与人均生产总值的增加与加速“三废”排放呈负相关。

$F3(k)$ 受 $A(k)$ 与 $B(k)$ 交互作用的负影响。因为地区生产总值增长率与近几年来 $A(k)$ 中进出口额 [含有 $B(k)$ 中旅游业的部分]、沿海港口的吞吐量增加 (伴随着辽宁省内大型企业的转型的消耗) 有关。

$F4(k)$ 受 $A(k)^3$ 的正比影响,计划固定资产投资增长会随着人口自然增长率、城镇人口比重、人均生产

总值、投资等指标的增长而迅速增加。

因此,本文认为,在进行体制改革的过程中,需要重点测量模型中的二级指标对三级指标的负影响,消除或减小这种负影响对提升辽宁省的生态安全和发展绿色经济大有裨益。

1.3 结构方程构建

为了研究二级指标之间的相互演化关系,需要创建二级指标的结构方程来解释。本文应用 Eviews6.0 软件,对二级指标的数据进行了回归分析,在回归系数满足显著性水平的条件下,尽可能地使最优度达到最大值,首先得到非线性结构方程组如下式 (24) ~ 式 (28)。

$$A(k) = 1.109\,737C(k)^{1/2} - 0.481\,420F(k) \quad (24)$$

$$B(k) = -0.469\,607C(k) \times F(k) + 1.495\,583B(k) \times D(k)^{1/3} \quad (25)$$

$$C(k) = 0.401\,778D(k) + 0.596\,833A(k)^2 \quad (26)$$

$$D(k) = 0.279\,918A(k) + 0.973\,383B(k)^{1/3} \times D(k) \quad (27)$$

$$F(k) = -0.237\,758A(k)^2 + 0.239\,984C(k)^{1/2} + 1.118\,338D(k)^{1/2} \times F(k) \quad (28)$$

经过单整检测,可知适应指标 $E(k)$ 是平稳的,故在研究二级指标相互关系时可忽视其作用。

其次,为了建立系统的二级指标优化状态方程,应用 Eviews6.0 软件,经过反复测试,在回归系数满足显著性水平的条件下,可得到 $C(k)$ 和 $D(k)$ 的自回归结构方程如下:

$$C(k+1) = 0.864\,968C(k)^{1.5} + 0.357\,649D(k) \quad (29)$$

$$D(k+1) = 0.932\,583C(k)^{0.3} \times D(k)^{0.5} + 0.556\,664A(k)^{0.2} \times B(k)^{2/3} \times F(k) - 0.582\,002C(k+1) \times B(k) \quad (30)$$

在计算 $D(k+1)$ 时,需要 $A(k)$ 的归一化数据,则还需要建立一个 $A(k)$ 的自回归结构方程:

$$A(k+1) = 0.959\,433A(k) + 0.156\,981F(k) \quad (31)$$

据此,就可以由响应指标 $F(k)$ 计算出 $A(k)$ 的数据。式 (24) ~ 式 (31) 的回归结果如表 7 所示。

从式 (24) 可以看出 $F(k)$ 对 $A(k)$ 的影响成负向关系,说明在过去或现有的体制下,政府的决策对驱动力指标起负影响作用,因此必须进行体制改革。由式 (25) 可计算出,当 $D(k) > 0.2989$ 时,政府的决策才能通过暴露指标对压力指标起正向作用,这是因为如果政府的响应指标偏重于经济发展,会使治理污

表7 结构方程系数回归的最大显著性概率和最优度

被解释变量	A(k)	B(k)	C(k)	D(k)	F(k)	A(k+1)	C(k+1)	D(k+1)
描述最大的显著性水平概率	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
最优度	0.833 6	0.887 6	0.913 4	0.968 7	0.866 9	0.975 5	0.883 7	0.905 9
调整后的最优度	0.825 7	0.882 3	0.909 3	0.967 2	0.853 5	0.974 3	0.877 9	0.896 0

染的投资下降,必然导致“三废”排放量增大。由式(26)、式(27)可以看出增大驱动力指标的影响有利于提升暴露指标和敏感指标程度。由式(28)的计算可以看出驱动力指标 $A(k)$ 对政府的响应指标起负向作用,这是因为 $A(k)$ 中通过进出口额[含有 $B(k)$ 中旅游业的部分]、沿海港口的吞吐量增加(伴随着辽宁省内大型企业的转型的消耗)来帮助政府确定辽宁省内经济增长率是很困难的,尤其在制度改革未完成的前提下,企业资源潜力耗尽时,GDP 增长率只能降低。由 $A(k)$ 的自回归结构方程可以看出驱动力指标可以由响应指标完全控制,这是一种非正常现象,从经济学角度考虑,政府的干预只能是起辅助作用,无法完全干预生态环境的发展走势,因而容易出现政策失灵。

2 优化控制模型构建及预测

2.1 理论优化控制模型及初步预测

由于适应状态指标主要是由自然环境中的气候因素所决定,而一个地区的气候环境状况又受全球气候环境和地理区位影响。而且,在前面的测量模型分析中,本地区对适应指标的影响只占 20% 多。因此,适应指标 E 作为状态变量不是局部环境控制所能确定的,所以本文将忽略;同时,由于敏感指标 $C(k)$ 受到压力的一期滞后影响,故在建立目标函数时,将滞后项 $C(k-1)$ 放入控制向量中。依据三级指标的具体含义,确定向量函数 $x(k)=[C(k),C(k-1),D(k)]^T$ 表示的是指标体系状态变量,而 $u(k)=[A(k),B(k),F(k)]^T$ 则表示指标体系的控制变量。同时得到状态指标和控制指标的相关矩阵分别为:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0.948\ 859 & 0.819\ 449 \\ 0.948\ 859 & 1 & 0.747\ 501 \\ 0.819\ 449 & 0.747\ 501 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -0.869\ 593 & 0.262\ 762 \\ -0.869\ 593 & 1 & 0.020\ 812 \\ 0.262\ 762 & 0.020\ 812 & 1 \end{bmatrix}$$

按照一个“五年规划”,构建生态安全指标体系的目标函数为:

$$J = \max \frac{1}{2} x(5)^T Q x(5) + \sum_{k=0}^4 \frac{1}{2} [x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k)] \quad (32)$$

式(32)的约束方程由式(29)、式(30)和式(31)确定为:

$$A(k+1) = 0.959\ 433 A(k) + 0.156\ 981 F(k) \quad (33)$$

$$C(k+1) = 0.864\ 968 C(k)^{1.5} + 0.357\ 649 D(k) \quad (34)$$

$$D(k+1) = 0.932\ 583 C(k)^{0.3} \times D(k)^{0.5} + 0.556\ 664 A(k)^{0.2} \times B(k)^{2/3} \times F(k) - 0.582\ 002 C(k+1) \times B(k) \quad (35)$$

且满足正则性条件:

$$0 \leq A(k), B(k), C(k), D(k), E(k), F(k) \leq 1$$

考虑到 Q, R 都是正定矩阵, $\|x(k)\|_2$ 、 $\|u(k)\|_2$ 越大,目标函数取值就越大。于是可以得到优化结论:在理论模型中控制向量给出的前提下,研究目标函数是否能够取得最大值及如何取得最大值在于状态变量 $x(k)=[C(k),C(k-1),D(k)]^T$ 的增长趋势。本文依据国家及辽宁省相关“十三五”规划的有关规定得到未来 5 年的控制变量数据,即 $u(k)=[A(k),B(k),F(k)]^T$,再由状态方程预测未来五年状态的变化趋势,确定能否达到理想结果。

按照国家“十三五”相关规划的要求和相关行业要求,三废每年需降低 20%,农药化肥施用量按每年 20% 的标准降低,旅游人数从业增加标准应该每年增加 15% 以上,本文取 20%。获得 2018—2023 年的主要压力指标增长数据(表 8)。

表8 压力 $B(k)$ 指标未来 6 年的期望数据

指标	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
固废生产总量 / 万 t	0.574 6	0.689 5	0.827 4	0.992 8	1.191 4	1.429 7
工业废水排放量 / 万 t	0.742 9	0.891 5	1.069 8	1.283 7	1.540 5	1.848 6
工业废气排放量 / t	0.971 9	1.166 3	1.399 6	1.679 5	2.015 4	2.418 4
农用化肥施用量(折纯量) / t	0.075 9	0.091 1	0.109 3	0.131 2	0.157 4	0.188 9
旅游业从业人员人数 / 万人	0.170 0	0.204 0	0.244 7	0.293 7	0.352 4	0.422 9

按照压力指标 $B(k)$ 的计算, 在假设其他三级指标不变的情况下, 得到 2018—2023 年的控制指标 $B(k)$ 的数据如表 9。

表 9 控制指标 $B(k)$ 的预测结果

指标	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
$B(k)$	0.244 7	0.293 6	0.352 3	0.422 8	0.507 4	0.608 8

按照国家“十三五”相关规划的要求, 工业二氧化硫去除率可以按照每年 20% 速度递增, 地区生产总值增长率按照国家最低标准 6% 处理。固定资产投资增长率按照 20% 计, 其他响应控制数据都是按照国家“十三五”相关规划数据并结合辽宁省前几年的数据给出, 得到“十三五”时期 $F(k)$ 的计划指标 (表 10)。

表 10 “十三五”时期 $F(k)$ 的计划指标 (单位: %)

指标名称	代码	标准化数据值
工业二氧化硫去除率	F1	0.728 0
计划地区生产总值增长率	F3	6.500 0
计划固定资产投资增长率	F4	20.000 0
计划公共财政预算收入增长率	F5	6.500 0
旅游业计划总收入增长率	F6	11.180 0
计划社会消费品零售总额增长率	F7	15.000 0
计划外贸出口总额增长率	F8	15.000 0
计划利用外商直接投资增长率	F9	15.000 0

基于表 9, 按照指标体系归一化数据, 综合表 3 中响应指标的权重, 得出 $F(k)$ 的控制指标数据为:

$$F(k) = 0.2530, k=2018, \dots, 2023$$

以 2015 年、2016 年、2017 年的数据为初始数据, 应用 MATLAB 进行模拟仿真, 得出图 1 的状态变化曲线, 结果显示很不令人满意。指标 $D(k)$ 一直处于在下降状态, 这说明现有的体制必须改变, 不然生态安全会进一步恶化, 直接影响绿色经济发展。

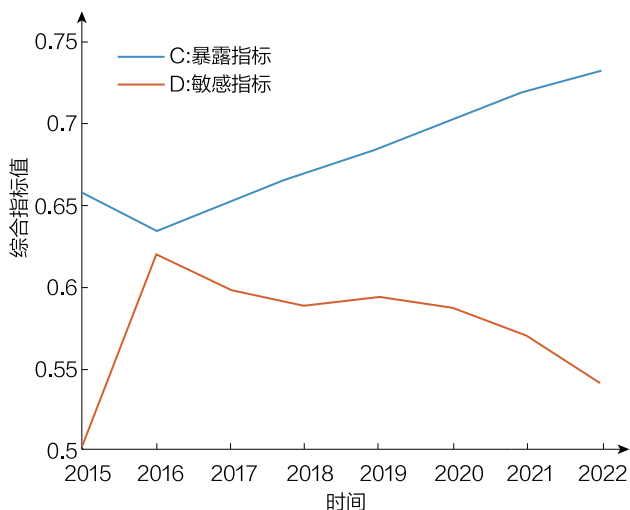


图 1 “十三五”规划不改变体制的预测

由 $D(k)$ 的状态方程可以看出, 下降的原因有一项 $-0.582\,002C(k-1)B(k)$, 即当年的压力指标和前一年的暴露指标交互会产生副作用, 如果能够通过制度的改革, 消除暴露指标 $C(k)$ 的滞后影响, 可以使副作用的系数 0.582002 调整为 0.1 之下, 就可以得到图 2 较好的结果, 这说明该系数对暴露指标和敏感指标都很敏感。当然, 我们还可以进一步采用其他措施使 $D(k)$ 的趋势进一步提升。

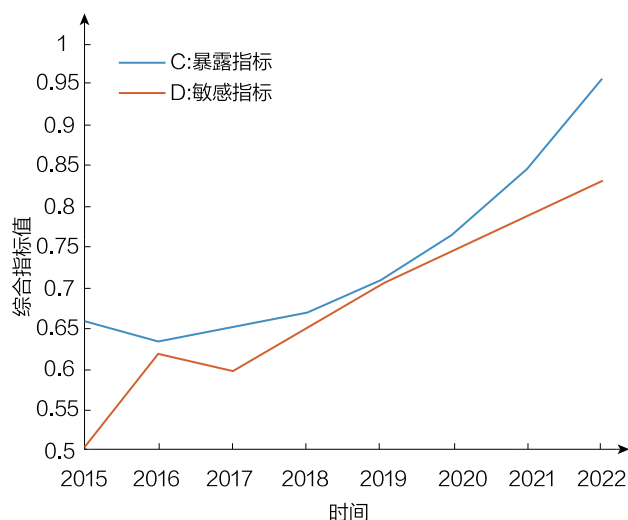


图 2 单一调整暴露指标的滞后与压力指标的交互作用预测

2.2 状态方程的修正及理想优化

为了达到预期的结果, 需要对状态方程进行修正并进行理想优化。在经济发展过程中, 相关指标的内在机理及相互的制约规律在短期内不会发生大的变化, 这也是科学技术发展的必然规律。而且在“十三五”规划中坚持的绿色经济平稳过渡理念也要求企业和政府要渐进式进行改革, 同时, 对暴露指标 $C(k)$ 和敏感指标 $D(k)$ 的提升需要满足一致性要求的条件。因此, “十三五”规划做出的改革, 在本部分中只是在不同程度上减少或消除在生态安全状态演化过程中的负影响。产业结构的改革只是在不同产业占比上的调整, 科学技术及创新变革不大。再依据式 (29) ~ (31), 得到包含对应调整因子的状态方程如下:

$$A(k+1) = 0.980\,504A(k) + \alpha_1 F(k) \quad (36)$$

$$C(k+1) = 0.898\,542C(k) + \alpha_2 D(k) \quad (37)$$

$$D(k+1) = \alpha_3 C(k)^{0.3} \times D(k) + \alpha_4 A(k) \times B(k)^{1.5} \times F(k)^2 + \alpha_5 C(k+1) \times B(k) + 0.212\,647 \quad (38)$$

基于此, 本文希望通过改变调整因子 $\alpha_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$

的值,使得暴露指标 $C(k)$ 和敏感指标 $D(k)$ 都得到稳定提升,接近历史最好水平,则可以推动绿色经济发展。

由优化结论可知,状态曲线 $x(k)=[C(k), C(k-1), D(k)]^T$ 上升越快,最优控制目标值越大。由于求解式(32),式(36)~(38)的理论控制优化模型比较困难,本文转而分析各自影响因子 $\alpha_i (i=1,2,3,4,5)$ 的变化所带来的状态过程的演化,通过仿真模拟可以得到如下结果:

影响因子 α_1 的增减不改变状态过程的演化趋势,但是一致地提升或降低 $C(k)$ 和 $D(k)$ 曲线;影响因子 α_2 的增加急速提升暴露指标 $C(k)$ 曲线和急速下降敏感指标 $D(k)$ 曲线,两条曲线变陡;反之,影响因子 α_2 的减少导致 $C(k)$ 曲线的下降,敏感指标 $D(k)$ 曲线上升,两条曲线的距离变小,曲线的形状趋于直线;影响因子 α_3 的增加将导致两条曲线都在增加,但是随着 α_3 的增加, $D(k)$ 曲线增加速度较快,但是随着 α_3 的减少, $C(k)$ 曲线下降速度较快。影响因子 α_4 的增(减)将同时导致两条曲线都在增(减),但是 $D(k)$ 变化的速度较快,因子比较敏感。影响因子 α_5 的增加(减少)将导致 $C(k)$ 曲线和 $D(k)$ 曲线下降(上升),同时 $D(k)$ 变化的速度较快,因子的敏感程度很大。

依据上面影响因子 $\alpha_i (i=1,2,3,4,5)$ 的变化的性质,经过仿真模拟,选择了一组较好的影响因子值:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.3 \\ \alpha_2 &= 0.357\ 649 \\ \alpha_3 &= 0.9 \\ \alpha_4 &= 0.9 \\ \alpha_5 &= -0.048\end{aligned}$$

得到如图3的理想仿真状态演化结果。

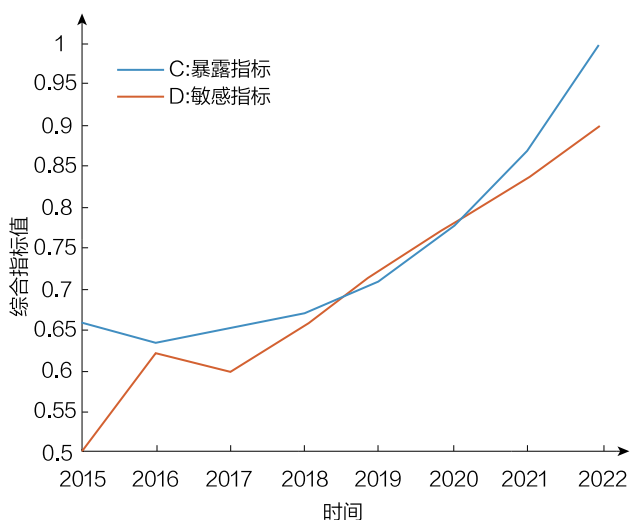


图3 状态方程调整后的一个理想预测结果

要保证预期目标的实现,影响因子 α_1 的值在原来的基础上增加了约 90%,需要政府决策机构加强执行力;影响因子 α_2 的值在原来的基础上增加了约 7%,需要企业和社区共同努力减少污染造成的影响。影响因子 α_3 的值几乎保持不变。影响因子 α_4 的值在原来的基础上增加了约 62%,需要政府部门进一步开拓旅游资源,增加旅游业的产值,同时,降低固体废弃物产生总量和农业化肥的施用量。影响因子 α_5 的值在原来的基础上也降低了约 90%,需要消除暴露指标 $C(k)$ 通过压力指标带来的滞后影响来实现。综上,可以有效解决生态安全指标与绿色经济发展问题。

3 结论

本文基于 DPESAR 指标框架,结合辽宁省生态安全和绿色经济发展现状,建立生态安全与绿色经济演化关系的状态方程模型。通过对控制变量的调节,探索不同状态方程的演化并使状态指标的发展趋于良好,同时给出了辽宁省发展绿色经济的最优控制模型,主要研究结论如下:

第一,由结构模型可知,驱动力指标 $A(k)$ 对政府的响应指标起着负向作用,这是由于政府、社会、企业之间利益不协调造成了政府计划制定与实施过程中容易出现脱节。因此,辽宁省各级政府部门在寻求省内经济绿色高质量发展过程中必然要制定相关政策措施,但必须以生态安全下的绿色、和谐与可持续作为约束阈值,厘清政府、社会、企业在经济绿色发展过程中所要扮演的角色和承担的责任,提高政策实施效率和科学性。

第二,由优化控制模型可以看出,在国家“十三五”相关规划的要求下,敏感指标的下降会造成生态安全的恶化;但是,通过政府的努力、科学的计划及贯彻力度的加强,可以遏制生态环境的恶化,也可以使生态环境达到历史最好水平,进而促进辽宁省经济的高质量绿色发展。

第三,通过研究生态安全演化状态,可以直接或间接地获得其对绿色经济发展的关键因素,通过结构模型构建及预测,可以获得具体调控指标和调控范围,为辽宁省生态安全和绿色经济发展提供理论依据,同时也可以为我国其他地区的生态安全与绿色经济发展提供借鉴与参考。

本文的局限是对数据进行了可靠性分析,只做了信度检验,未做效度检验,因本文是做宏观分析,涉及不到对测量工具和手段进行效度检验。在求权中只用了熵值法,未使用主成分分析法,从主观上会产生

一定的偏差,但对研究结论不会产生太大影响。在优化控制上,因篇幅有限,仅使用了简单的仿真,可能会存在一点儿误差,只找到近似的应对策略,在未来的研究中可以考虑应用神经网络具体解决控制问题。

参考文献

- [1] 王耕, 吴伟. 区域生态安全演变机制与过程分析 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 16-21.
- [2] 吴开亚, 何琼, 孙世群. 区域生态安全的主成分投影评价模型及应用 [J]. 中国管理科学, 2004, 12(1): 106-109.
- [3] 王鹏, 吴海斌, 凡非得, 等. 区域土地生态安全演化研究——以永州市为例 [J]. 衡阳师范学院学报, 2015, 36(3): 83-89.
- [4] 李晓西, 刘一萌, 宋涛. 人类绿色发展指数的测算 [J]. 中国社会科学, 2014(6): 69-95, 207-208.
- [5] 王兵, 刘光天. 节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率视角 [J]. 中国工业经济, 2015(5): 57-69.
- [6] 周丰滨, 刘文革, 梁琦. 东北老工业基地产业自生竞争力研究 [J]. 中国工业经济, 2004(7): 63-69.
- [7] YE H, MA Y, DONG L M. Land ecological security assessment for bai autonomous prefecture of dali based using PSR model—with data in 2009 as case[J]. Energy procedia, 2011, 5: 2172-2177.
- [8] BORJA Á, GALPARSORO I, SOLAUN O, et al. The European water framework directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2006, 66(1-2): 84-96.
- [9] ZUO W, ZHOU H Z, ZHU X H, et al. Integrated evaluation of ecological security at different scales using remote sensing: a case study of Zhongxian county, the Three Gorges Area, China[J]. Pedosphere, 2005, 15(4): 456-464.
- [10] 庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24 (第 A1 期): 340-344.
- [11] 王耕, 王彦双, 王嘉丽. 辽宁双台河口湿地生态安全评价 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37(4): 45-52.
- [12] 刘纪远, 邓祥征, 刘卫东, 等. 中国西部绿色发展概念框架 [J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 1-7.
- [13] 李琳, 刘莹. 中三角城市群与长三角城市群绿色效率的动态评估与比较 [J]. 江西财经大学学报, 2015(3): 3-12.
- [14] 吕福新. 绿色发展的基本关系及模式——浙商和遂昌的实践 [J]. 管理世界, 2013(11): 166-169.
- [15] 堵秀凤, 张剑, 张宏民. 数学建模 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [16] 刘锋, 银利, 张星. 半参数回归模型在空气质量指数分析和预测中的应用 [J]. 数学理论与应用, 2013, 33(4): 94-98.
- [17] 何晓群. 多元统计分析 [M]. 第 4 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- [18] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [19] 葛仁东, 于成学, 徐毅, 等. 基于 DPESAR 框架的辽宁省绿色发展实证研究 [J]. 大连民族大学学报, 2017, 19(1): 48-54.
- [20] 孟凡生, 李美莹. 我国能源消费影响因素评价研究——基于突变级数法和改进熵值法的分析 [J]. 系统工程, 2012, 30(8): 10-15.

The Empirical Study of Developing Relationship Between Regional Ecological Security Evolution and Green Economy—Taking the Case of Liaoning

YU Chengxue^{1*}, GE Rendong², LI Jiedan³

(1.School of International Business, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China; 2. School of Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 3. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the framework of DPESAR indicator system, the structural model for studying the developing relationship between ecological security evolution and green economy is established, by using SPSS 17.0 and EvIEWS 6.0 software with the panel data of Liaoning Province from 1995 to 2017, to analyze the relationship between the second class indicators and the third class indicators, identify the issues which have impact on the green economy development; and then construct the optimal controlling model to identify its relationship. According to the needs of Liaoning in the 13th Five-Year period, the local ideal evolution status of the ecological security and green economy development until 2022 is simulated and predicted. The result shows that the decline of sensitive indicators will lead to deterioration of ecological security. However, through government regulation, the elimination of exposure index C(k) can curb the deterioration of the ecological environment through the delayed impact of pressure index. So the adjusted impacted indicators of ecological security can make a great promotion to green economy development, which can be used for the guidance of green economy development in Liaoning Province.

Keywords: DPESAR framework; ecological security; green economic development; evolution status; model and optimization