

DOI: 10.5846/stxb202108302442

李力.生态创新系统功能、过程和可持续评估.生态学报, 2022, 42(12): 4784-4794.

Li L. Function, process and sustainability evaluation of eco-innovation systems. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4784-4794.

生态创新系统功能、过程和可持续评估

李 力*

中国科学院文献情报中心, 中国现代化研究中心, 北京 100190

摘要:不同国家生态创新水平有高低,生态创新系统有差异。生态创新系统是由一系列参与者通过相互作用形成的网络,目的是推动有助于生态环境和社会经济协调发展的知识和技术的生产、传播和应用。为比较不同国家生态创新系统的发展状况和可持续性,分析不同国家生态创新系统的优势和不足,提出生态创新系统两步评估法和整体分析框架。把生态创新系统的功能和过程结合起来,对生态创新系统的发展水平进行评价。重点关注系统的长期发展,即系统可持续性。基于资本的角度,包括知识、经济、人力和社会资本,建立生态创新系统可持续评估模型,考察相关资本存量、流量和风险因素。根据创新系统理论、文献回顾和国际研究比较,遴选出 30 个关键指标,构建涵盖 2 个指标矩阵的综合评价指标体系。采用主成分分析和综合评价方法,对不同国家生态创新系统的功能-过程和可持续性分别进行评价。研究表明,法国、德国、韩国、西班牙和挪威生态创新系统的功能-过程表现最强,韩国、德国、奥地利、挪威、捷克生态创新系统的可持续性表现最强。根据生态创新系统的现状和可持续性,主要生态创新国家可以分为四种类型,据此采用不同发展策略。如韩国系统现状水平和可持续性都较高,属于生态创新先进国。西班牙现状水平较高但可持续性较弱,需要加大对生态创新系统的投入。土耳其系统现状水平和可持续性都较弱,荷兰系统现状水平和可持续性较均衡。土耳其除加大资本投入外,还要加强创新系统功能的提升和创新过程的优化。研究在完善生态创新系统功能和过程一体化评价的同时,弥补当前生态创新系统可持续性研究缺乏的不足。同时,评估结果为各国生态创新系统的优化提升、相关生态创新政策的出台提供研究基础和数据支撑。

关键词:生态创新;环境创新;创新系统;创新评估;可持续性

Function, process and sustainability evaluation of eco-innovation systems

LI Li*

China Center for Modernization Research, National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The development of eco-innovation varies across different countries, as does the development of eco-innovation systems. Eco-innovation system is a network system formed by a series of participants through interaction. The purpose of eco-innovation system is to improve the production, diffusion and application of knowledge and technology conducive to coordinating ecological conservation, environmental protection and socio-economic development. To compare and analysis quantitatively the development and sustainability of eco-innovation systems in major advanced countries, as well as to describe and analysis the advantages and disadvantages in these innovation systems more precisely, this paper proposes a two-step model and an overall framework to evaluate eco-innovation systems. Firstly, the study combines function and process assessments to evaluate the development level of eco-innovation system. Secondly, the study focuses on the long-term development of the systems, namely system sustainability. A model evaluating the sustainability from the perspective of capital, which includes knowledge capital, economic capital, human capital and social capital, is exploited. The stock, flow and risk factors of these capitals are considered as well. Based on the theory of innovation system, literature review, and comparison of international research, 30 key indicators are selected, and a complicated indicator system involved two index matrices are construed. Principal component analysis and comprehensive evaluation are used to evaluate the function-

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41801214);中国科学院发展规划局战略研究专项(GHJ-ZLZX-2019-15)

收稿日期:2021-08-30; **网络出版日期:**2022-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lili2014@mail.las.ac.cn

process and sustainability of eco-innovation systems in different countries. The results show that France, Germany, South Korea, Spain and Norway exhibit strong performance in terms of eco-innovation system function and system process. The eco-innovation systems of South Korea, Germany, Austria, Norway and Czech Republic have the best sustainable performance. According to the development and sustainability of their eco-innovation systems, the countries can be classified into four groups, and different strategies can be adopted accordingly. South Korea is an eco-innovation leader, and its system has strong performance and sustainability. The system of Spain has high development but weak sustainability, and it is necessary to increase investment in eco-innovation. Turkey has weak performance and weak sustainability, while the two aspects of Netherland are relatively balanced. In addition to increasing capital investment, Turkey should also strengthen the improvement of system functions and the optimization of innovation process. The research not only improves the integrated evaluations of the function and the process of innovation systems, but also makes up for research on sustainability. Moreover, the results provide a scientific basis and data to support the improvement of eco-innovation systems and the introduction of relevant eco-innovation policies in these countries.

Key Words: eco-innovation; environmental innovation; innovation system; innovation evaluation; sustainability

根据联合国可持续发展目标,到 2030 年要实现自然资源的可持续管理和高效利用,采用可持续的消费和生产模式,使经济增长和环境退化脱钩,促进持久、包容和可持续经济增长。为此各国都在积极寻求变革之路,以协调社会经济发展与生态环境保护。生态创新是开发新产品、流程或服务的过程,这些过程可以为客户和商业提供价值,同时减少对环境的影响^[1];通过减少对环境的影响(有意和无意的)或实现对资源的更有效和负责任的使用,实现可持续发展目标^[2]。生态创新正在吸引越来越多的公司、政府和学者的关注^[3]。然而创新不是从研发到新产品的单向线性流动,而是将技术可能性与市场机会相匹配的过程,涉及多种互动和学习类型^[4]。引入创新是一项集体活动,发生在一个更广泛的系统内,这个系统通常被称为“创新系统”^[5],它是影响创新产生和采用,影响创新绩效的一组组件和因果关系^[6]。

生态创新具有知识和环境双重外部性特征,对市场和政策的敏感性更高^[7],需要通过创新系统来协同推进。不同国家由于资源禀赋、技术条件、社会基础、管理体制千差万别,因此其生态创新系统存在多样性,不仅影响创新发展的方向,创新资源的配置,也会影响相关市场的形成和企业的发展,最终导致不同国家生态创新效率的高低和生态创新影响的大小。比较各国生态创新系统的差异,从理论层面上有助于加深对生态创新系统作用机制的认识,从实践层面上有助于促进生态创新系统的优化完善,为各国生态创新促进政策的有的放矢提供基础。

近年来,国际研究机构和各国学者纷纷推出各种生态创新系统科学评价体系,这些评价研究或是基于投入-产出模型^[8-11],或是基于系统功能模型^[12],把两者结合起来并付诸评价实践的研究鲜有发现。创新系统主要涉及八大功能^[13-15],每个功能都有相应的投入、产出和影响,把功能和过程结合起来,有利于更加精准地判断创新系统各部分、创新过程各环节的优势和不足。此外,创新研究的最终目标是实现创新的可持续性,一些领域已经开展创新系统可持续性(即系统推动创新的持续能力)评价,如健康医疗创新系统的可持续性评估^[16]。而很多生态创新往往投资较大、周期较长,涉及大量公共投资,对国家和地区的可持续发展影响深远。因此,生态创新系统在评估现状的同时,也亟需开发潜力评估工具,把不同因素对生态创新系统未来的影响纳入科学评估框架中,帮助决策部门提前发现创新系统的短板,及时调整创新政策。

基于上述分析,本文主要解决两个问题,一是对生态创新系统的现状水平进行评估,把生态创新系统的功能评价和过程评价结合起来;二是对生态创新系统的可持续性进行评估,着重研究创新系统资本的存量、流量和风险因素,包括知识资本、人力资本、经济资本和社会资本等。

1 生态创新系统及其评估

1.1 生态创新系统

根据《奥斯陆手册》,创新即“在业务实践、工作场所组织或外部关系中实施新的或显著改进的产品(商品

或服务)、流程、新的营销方法或新的组织方法”^[17]。生态创新源于“绿色创新”、“可持续创新”和“环境创新”,更加力求平衡经济效益和环境效益。

创新系统的研究由来已久^[18],它主要基于 Schumpeter 关于创新和企业精神的理论研究^[19—20],Rogers 的创新扩散理论^[21],以及 Nelson^[22]、Lundvall^[23]、Edquist^[24]、de la Mothe^[25]、Pavitt^[26]、Jacobsson^[27]等提出的创新系统框架。总的来说,创新系统由参与者、网络和机制组成^[27],通过参与者及其活动将创新输入转化为创新输出,影响创新的产生、采用和绩效^[6]。在此基础上形成“国家创新系统”^[22—23,28—29]、“地区创新系统”^[25,30—31]、“部门创新系统”^[32]、“公司创新系统”^[33—34]、创新生态系统^[6,35—37],还有把创新政策作为专门的政策领域进行研究^[38—42]。

生态创新系统是特定领域范围的创新系统,生态创新系统由一系列参与者,包括生态知识生产者、传播者、政府机构、企业、公众通过相互作用形成的网络系统,目的是提高有利于协调生态环境保护和社会经济发展的知识和技术的生产、传播和应用。

1.2 创新系统评价

创新系统的评价模型主要遵循投入-产出、结构-功能、三重螺旋、四重螺旋等逻辑进行构建。常见的评价指标一是按照创新的过程组织,分为投入指标、活动指标、产出指标、影响指标等,主要指标包括研发支出、专利、出版物、服务、产品、资源利用效率、生产力变化等^[11,43—48]。二是按照创新系统的功能组织,分为知识发展指标、知识传播指标、搜索向导指标、创业活动指标、市场形成指标、资源筹集指标、发展正外部性、创建合法性指标等。三是按照创新系统的参与者进行组织,分为政府指标、大学指标、产业指标和公民社会指标。四是综合多种分类方法,创建评估指标矩阵,如根据创新系统七个功能和创新过程五个方面构建的评价指标矩阵^[13],根据创新系统四重螺旋与四个维度构建的创新系统四重螺旋指标矩阵^[49]。具有代表性的国家生态创新系统评估研究有生态创新记分板^[8]、全球清洁技术创新指数^[9]、生态创新指数^[11]等(表1)。

表 1 代表性生态创新系统评价

Table 1 Representative evaluation of eco-innovation systems

研究 Study	评价范围 Scope	概念模型 Model	指标体系 Indicators	评价方法 Method	来源 Source
欧盟生态创新记分板 European eco-innovation scoreboard	28 个成员国	生态创新投入-产出-结果-影响	5 个维度 16 个指标	综合指标法	[8]
全球清洁技术创新指数 The global cleantech innovation index	40 个国家/地区	清洁技术创新投入-创新产出	2 个领域 4 个 维度 15 个 指标	综合指标法	[9]
全球绿色经济指数 The global green economy index	130 个国家和 地区	四维模型,领导力和气候变化-效率部 门-市场和投资-环境	4 个维度 19 个指标		[10]
生态创新指数 Eco-innovation index	49 个亚洲和欧 洲国家	采用生态创新能力、生态创新支持环 境、生态创新活动和生态创新成就衡量 生态创新,采用可持续发展三重底线衡 量创新可持续性	3 个层面 4 个 要素 20 个 指标	综合指标法	[11]
北欧国家能源技术创新系统 评价 Evaluation of energy technology innovation system in Nordic countries	丹麦、芬兰、 瑞典和挪威	创新系统 7 个功能,创新过程 5 个方面	分析指标:5× 7 维度,90 个 指标 评估指标: 8 个指标	指标排名法	[13]
碳捕集与封存技术创新系统 评价 Evaluation of carbon capture and storage technology innovation system	挪威、荷兰、澳 大利亚、加拿大 和美国	创新系统 7 个功能	7 个功能领 域 31 个问题	专家评分法	[50]

2 生态创新系统综合评估

2.1 模型构建

研究采用两步法对生态创新系统进行综合评估,一是对现有生态创新系统功能和过程进行评估,二是对生态创新系统的可持续性进行评估(图1)。整个分析框架既反映生态创新系统的客观现实水平,也兼顾生态创新系统的未来前景。

由于针对生态创新系统功能的数据获取困难,部分功能存在交叉重叠,研究在综合分析生态创新系统八个功能基础上,对生态创新系统功能进行整合,包括三个评估维度,分别为生态基础研究功能、生态创新引导功能和生态市场创建功能。生态基础研究功能主要针对在创新系统中发展生态新知识、新技术,在研究网络内部和跨网络的参与者或代理人之间进行知识转移。生态创新引导功能主要引导参与者选择进入某一创新系统和开发特定应用场景,促进企业家进行创新商业实验,发现并利用商机,引导政府、企业和公众做出有利于生态的战略决策和行为选择。生态市场创建功能促使生态创新的双重外部性实现内部化,摆脱路径依赖,提高创新的社会认可度,降低生态创新阻力。把这三个集成的系统功能与生态创新系统的投入、产出、影响过程进行交叉组合,形成生态创新系统功能-过程评估的3×3维矩阵。

实现创新的可持续性,需要考察各个创新系统关联的社会经济系统的状况,衡量用以维持创新系统持续运转的不同资本的存量、流量、风险因素和弹性。生态创新系统的可持续性衡量主要参考一些国际倡议所采用的方法,如经合组织(OECD)的美好生活倡议把经济资本、自然资本、人力资本、社会资本纳入可持续美好生活的评估中^[51],联合国欧洲经济委员会的可持续发展测量把经济资本、生产资本、自然资本、人力资本、社会资本纳入可持续性发展评估中^[52]。借鉴上述研究成果,本评价根据生态创新和生态创新系统的特征,把影响生态创新系统可持续发展的资本因素分为四个部分,即知识资本、经济资本、人力资本和社会资本。知识资本是支撑未来创新的基础,生态知识的积累、传播、交流的广度和力度都会对生态创新的可持续性产生影响。经济资本既包括资金投入,也包括生态创新市场前景。人力资本既包括专业研发人员,也包括相关的工程师、管理人员和熟练工人,他们的数量和质量直接影响生态创新系统的可持续发展。社会资本是促进不同群体之间合作的社会网络、规范和共享价值观,公共环境政策和公众参与是生态创新最主要的社会支持。

2.2 指标筛选

基于 ISI Web of Science,搜索关键词、标题和摘要中包括生态创新、创新系统和指标、评估的出版物,识别生态创新系统相关评估中使用的所有类型的指标。同时参考主要国际组织、国家和地区的相关研究报告、指南、手册等,构建生态创新系统候选指标数据库,作为评估的潜在使用指标。根据含义明确性、相关性、可获得性、可度量性原则,分析文献中指标采用的频次,遴选出优先评估指标。把指标按照创新过程三个方面和创新系统三大功能进行聚类,形成生态创新系统功能-过程指标矩阵(表2),按照创新系统四类资本和三个因素划分指标,形成生态创新系统可持续性评估指标矩阵(表3)。

2.3 评估方法和数据准备

本研究采用主成分分析和综合评价方法相结合,首先对评估指标进行选取,指标备选的原则是指标数据获取率超过80%,指标不能出现大量的数据空缺,同时利用主成分分析法,对原始变量信息进行浓缩。根据主成分分析结果,利用主成分 $F_1, F_2, \dots, F_m$ 作线性组合,并以每个主成分 F_i 的方差贡献率 α_i 作为权数构建综

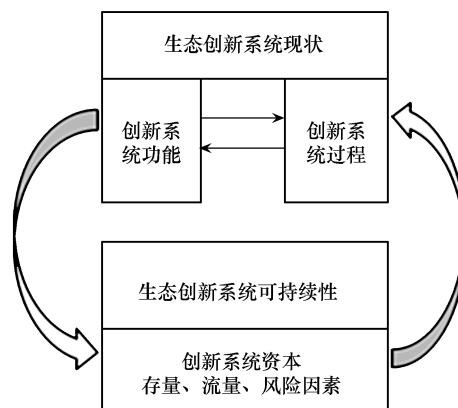


图1 基于功能-过程-可持续性的生态创新系统综合评价模型

Fig.1 Evaluation model of eco-innovation systems based on function-process-sustainability

合评价指数:

$$y = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i$$

式中, y 为评价指数, α 为各主成分的方差贡献率, F 为选取的主成分, m 为选取的主成分个数。

表 2 生态创新系统功能-过程评估指标矩阵
Table 2 Function-process evaluation index matrix of eco-innovation systems

功能 Function	投入 Input	产出 Output	影响 Impact
生态基础研究 Eco basic research	生态研发人员 生态研发支出	生态科学出版物 生态专利密度	国际生态合作发明 生态高等教育
生态创新引导 Eco innovation guidance	公共生态研发 企业生态研发人员	生态创新企业 生态产业进口	环境管理意识 可持续管理意识
生态市场创建 Eco market creation	国家环保支出 环境税征收	生态产业增加值 生态产业出口	生态产业就业 温室气体排放强度

表 3 生态创新系统可持续评估指标矩阵
Table 3 Sustainability evaluation index matrix of eco-innovation systems

资本 Capital	存量 Stock	流动 Flow	风险因素 Risk
知识资本 Knowledge capital	累计生态专利 人均环保固定资本		
经济资本 Economic capital		环保流动资金增长率 生态研发投入增长率	环境多因素生产率 产品税减补贴
人力资本 Human capital	公共事业从业人员比例	研发人员加权增长率	科技人员职业技能短缺
社会资本 Social capital	环境政策严厉指数		环境绩效

根据 OECD 环境技术专利数据库,2018 年环境技术专利数排前 30 名国家的环境专利数占全球总量的 95.9%,其中 23 个国家属于 OECD 成员国,其环境技术专利占 OECD 成员国总量的 99.1%。因此,这些国家基本囊括了全球主要的生态创新。根据数据获得情况,选择 2018 年作为功能-过程评估的基准年,采集 2018 年或最近年数据进行评估。在可持续性评估中,考虑资本作用的持续性和不同资本作用的时间差异性,指标数据采集的原则为累计类指标选择 2009—2018 年的累计数据,速率类指标选择 2009—2018 年的平均增长率数据,其他指标选择 2009 年以后的最新年数据。

由于部分国家数据不全,为避免因数据缺乏、指标不全导致的评估偏差,国家备选的原则是至少有 50%的指标可获得数据。在功能-过程评估和可持续性评估中,分别有 18 个和 13 个国家的数据覆盖率符合评估要求。

3 评估结果

3.1 功能-过程评估

剔除数据缺失严重和重复性指标,得到 10 个功能-过程评估指标的相关性矩阵(表 4)。结果表明部分变量之间存在较强的相关性(如公共生态研发与生态高等教育),有必要对原始变量信息进行浓缩。

根据系统功能-过程评价各主成分的方差贡献率和累积贡献率,有 4 个主成分的特征值大于 1,其中第一主成分方差占有所有原始变量总方差的 29.78%,前 4 个主成分的累积方差贡献率为 83.95%(表 5)。

根据主成分载荷矩阵(表 6),可以清楚看到第一主成分中生态研发支出、生态科学出版物的载荷均达到 0.728,因此,第一主成分主要代表生态创新系统的生态基础研究。第三主成分中企业生态研发人员的载荷达到 0.772,代表生态创新系统的生态创新引导。第四主成分中环境税征收的载荷达到 0.611,代表生态创新系统的生态市场创建。

表 4 相关性矩阵
Table 4 Correlation matrix

	生态研发人员	生态研发支出	生态科学出版物	生态专利密度	国际生态合作发明	生态高等教育	公共生态研发	企业生态研发人员	环境管理意识	环境税征收
生态研发人员 Eco R&D personnel	1.000	0.359	0.167	0.018	-0.108	-0.412	-0.471	0.670	0.018	0.120
生态研发支出 Eco R&D expenditure	0.359	1.000	0.609	0.754	-0.203	-0.033	-0.299	0.098	-0.160	0.036
生态科学出版物 Eco publications	0.167	0.609	1.000	0.506	-0.376	-0.247	-0.172	0.334	-0.262	-0.544
生态专利密度 Eco patent density	0.018	0.754	0.506	1.000	-0.253	-0.054	-0.347	-0.383	-0.392	0.151
国际生态合作发明 International eco cooperative invention	-0.108	-0.203	-0.376	-0.253	1.000	-0.476	-0.558	-0.091	0.202	0.211
生态高等教育 Eco higher education	-0.412	-0.033	-0.247	-0.054	-0.476	1.000	0.779	-0.358	0.236	0.098
公共生态研发 Eco public R&D	-0.471	-0.299	-0.172	-0.347	-0.558	0.779	1.000	-0.112	0.025	-0.204
企业生态研发人员 Enterprise eco R&D personnel	0.670	0.098	0.334	-0.383	-0.091	-0.358	-0.112	1.000	0.005	-0.219
环境管理意识 Environmental management awareness	0.018	-0.160	-0.262	-0.392	0.202	0.236	0.025	0.005	1.000	0.041
环境税征收 Environmentally related tax revenue	0.120	0.036	-0.544	0.151	0.211	0.098	-0.204	-0.219	0.041	1.000

表 5 总方差解释
Table 5 Interpretation of total variance

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			提取载荷平方和 Extraction sums of squared loadings		
	总计 Total	方差/% Variance	累积/% Cumulative	总计 Total	方差/% Variance	累积/% Cumulative
1	2.978	29.781	29.781	2.978	29.781	29.781
2	2.336	23.356	53.137	2.336	23.356	53.137
3	1.844	18.441	71.579	1.844	18.441	71.579
4	1.237	12.367	83.946	1.237	12.367	83.946
5	0.917	9.166	93.112			
6	0.360	3.604	96.716			
7	0.226	2.262	98.978			
8	0.079	0.792	99.770			
9	0.023	0.226	99.996			
10	0.000	0.004	100.000			

表 6 成分矩阵
Table 6 Component matrix

	成分 Component			
	1	2	3	4
生态研发人员 Eco R&D personnel	0.626	-0.330	0.325	0.549
生态研发支出 Eco R&D expenditure	0.728	0.391	-0.232	0.294
生态科学出版物 Eco publications	0.728	0.470	0.263	-0.260
生态专利密度 Eco patent density	0.590	0.502	-0.617	0.020
国际生态合作发明 International eco cooperative invention	-0.049	-0.796	-0.340	-0.303
生态高等教育 Eco higher education	-0.630	0.611	-0.022	0.382
公共生态研发 Eco public R&D	-0.676	0.588	0.356	0.074
企业生态研发人员 Enterprise eco R&D personnel	0.424	-0.276	0.772	0.221
环境管理意识 Environmental management awareness	-0.356	-0.302	0.153	0.340
环境税征收 Environmentally related tax revenue	-0.125	-0.289	-0.610	0.611

根据主成分系数矩阵,计算各国生态创新系统功能-过程的综合评价值。根据评估结果,18 个参评国家生态创新系统功能-过程评分较高的国家包括法国、德国、韩国、西班牙和挪威(表 7)。

表 7 不同国家生态创新系统功能-过程评估结果(2018 年)

Table 7 Results of the function and process assessment of eco-innovation systems in different countries (2018)

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>y</i>
美国 United States	0.079	-0.132	-0.237	0.046	-0.045
韩国 South Korea	1.160	0.244	-0.526	1.220	0.456
德国 Germany	0.772	0.968	-0.128	0.544	0.500
法国 France	1.237	-0.394	0.567	1.058	0.512
英国 United Kingdom	0.643	-0.008	-0.063	0.296	0.215
意大利 Italy	0.363	-0.201	-0.151	0.593	0.106
荷兰 Netherlands	0.616	-0.987	-0.209	0.940	0.031
瑞典 Sweden	0.831	-0.584	0.258	1.081	0.292
丹麦 Denmark	0.270	-0.575	-0.591	1.003	-0.039
奥地利 Austria	0.113	-0.475	-0.455	0.537	-0.095
波兰 Poland	-1.049	0.902	0.078	1.081	0.046
西班牙 Spain	0.690	-0.393	0.858	0.924	0.386
比利时 Belgium	0.473	-0.740	-0.098	0.651	0.031
芬兰 Finland	0.260	0.019	0.172	1.776	0.333
土耳其 Turkey	-0.207	-0.203	-0.257	0.503	-0.094
挪威 Norway	0.672	-0.115	0.163	1.456	0.383
捷克 Czech Republic	-1.008	-0.264	-0.369	0.956	-0.312
罗马尼亚 Romania	-1.316	0.739	0.087	0.926	-0.089

F1:第一主成分系数 1st Principal component coefficient, *F2*:第二主成分系数 2nd Principal component coefficient, *F3*:第三主成分系数 3rd Principal component coefficient, *F4*:第四主成分系数 4th Principal component coefficient, *y*:评价指数值 Evaluation index score

3.2 可持续性评估

剔除数据缺失严重和重复性指标,得到 9 个可持续评估指标的相关性矩阵(表 8)。结果表明部分变量之间存在较强的相关性(如生态研发投入增长率与产品税减补贴),有必要对原始变量信息进行浓缩。

表 8 相关性矩阵

Table 8 Correlation matrix

	累计生态专利	生态研发投入增长率	人均环保固定资本	环保流动资金增长率	环境多因素生产率	科技人员职业技能短缺	环境政策严厉指数	产品税减补贴	环境绩效
累计生态专利 Cumulative eco patents	1.000	0.244	0.252	0.421	0.366	0.272	0.435	-0.130	0.579
生态研发投入增长率 Growth rate of eco R&D investment	0.244	1.000	0.062	-0.104	0.220	0.126	0.403	0.785	-0.180
人均环保固定资本 Fixed capital for environmental protection per capita	0.252	0.062	1.000	0.458	0.389	-0.284	0.591	-0.232	0.516
环保流动资金增长率 Current and capital transfers for environmental protection	0.421	-0.104	0.458	1.000	0.115	-0.411	0.078	-0.150	0.314
环境多因素生产率 Environmental multifactor productivity	0.366	0.220	0.389	0.115	1.000	-0.228	0.293	0.016	-0.172
科技人员职业技能短缺 Shortage of professional skills	0.272	0.126	-0.284	-0.411	-0.228	1.000	0.330	0.130	0.263
环境政策严厉指数 Environmental policy stringency	0.435	0.403	0.591	0.078	0.293	0.330	1.000	0.259	0.520
产品税减补贴 Taxes less subsidies on products	-0.130	0.785	-0.232	-0.150	0.016	0.130	0.259	1.000	-0.446
环境绩效 Environmental performance	0.579	-0.180	0.516	0.314	-0.172	0.263	0.520	-0.446	1.000

根据可持续性评价各主成分的方差贡献率和累积贡献率,有 3 个主成分的特征值大于 1,其中第一主成分方差占有所有原始变量总方差的 31.79%,前 3 个主成分的累积方差贡献率为 74.99%(表 9)。

表 9 总方差解释						
Table 9 Interpretation of total variance						
成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			提取载荷平方和 Extraction sums of squared loadings		
	总计 Total	方差/% Variance	累积/% Cumulative	总计 Total	方差/% Variance	累积/% Cumulative
1	2.861	31.791	31.791	2.861	31.791	31.791
2	2.219	24.653	56.445	2.219	24.653	56.445
3	1.669	18.548	74.993	1.669	18.548	74.993
4	0.886	9.850	84.842			
5	0.843	9.367	94.209			
6	0.312	3.462	97.671			
7	0.161	1.793	99.464			
8	0.041	0.458	99.922			
9	0.007	0.078	100.000			

根据主成分载荷矩阵(表 10),可以清楚看到第一主成分中人均环保固定资产、累计生态专利、环境绩效、环境政策严厉指数的载荷分别达到 0.790、0.761、0.761 和 0.741,因此,第一主成分主要代表生态创新系统的知识资本和社会资本。第二主成分中生态研发投入增长率、产品税减补贴的载荷分别达到 0.891 和 0.877,主要代表生态创新系统的经济资本。第三主成分中科技人员职业技能短缺的载荷达到 0.843,代表生态创新系统的人力资本。

表 10 成分矩阵			
Table 10 Component matrix			
	成分 Component		
	1	2	3
累计生态专利 Cumulative eco patents	0.761	0.126	0.174
生态研发投入增长率 Growth rate of eco R&D investment	0.147	0.891	-0.194
人均环保固定资本 Fixed capital for environmental protection per capita	0.790	-0.134	-0.313
环保流动资金增长率 Current and capital transfers for environmental protection	0.547	-0.343	-0.392
环境多因素生产率 Environmental multifactor productivity	0.404	0.217	-0.569
科技人员职业技能短缺 Shortage of professional skills	0.055	0.388	0.843
环境政策严厉指数 Environmental policy stringency	0.741	0.476	0.160
产品税减补贴 Taxes less subsidies on products	-0.206	0.877	-0.188
环境绩效 Environmental performance	0.761	-0.281	0.505

根据主成分系数矩阵,计算各国生态创新系统可持续综合评价价值。根据评估结果,13 个参评国家生态创新系统可持续性较高的国家包括韩国、德国、奥地利、挪威、捷克(表 11)。

4 讨论和展望

生态创新是平衡人类社会经济发展和生态环境保护的重要工具。在有关生态创新的评估中有两点需要特别注意,一是需要注意区分生态创新水平和生态创新系统水平,前者在宏观上主要关注创新本身的数量、质量和投入-产出关系,在微观上关注具体创新的成本-效益,以及对经济社会和生态环境的影响;后者主要关注创新系统的结构、功能、过程是否完善,有哪些方面可以改进,大到一个国家,小到一个具体生态技术,都有可能形成其独特的创新系统。两者的评价结果有时会出现不一致的地方,甚至差距较大。以美国为例,2018 年美国生态创新总量(环境专利数)在 30 个国家中排名第一,生态创新密度排名第十位,但其生态创新系统功能-结构评分并不高,在 18 个参评国家中仅排第 14 位。从另一个角度看,仅用创新数量去衡量国家的生态

创新宏观水平时可能会产生偏差,需要更多地从系统的角度去考察国家的生态创新水平。

表 11 不同国家生态创新系统可持续性的综合评价(2009—2018 年)

Table 11 Results of sustainability assessment of eco-innovation systems in different countries (2009—2018)

	F_1	F_2	F_3	y
韩国 South Korea	2.82	2.02	-0.44	1.31
德国 Germany	1.96	1.42	-0.83	0.82
法国 France	1.11	1.17	-0.32	0.58
意大利 Italy	0.98	0.89	-0.24	0.49
荷兰 Netherlands	0.81	1.71	-0.60	0.57
丹麦 Denmark	0.61	0.69	-0.09	0.35
奥地利 Austria	1.20	1.14	0.19	0.70
波兰 Poland	0.70	1.64	-0.35	0.56
西班牙 Spain	0.74	0.68	-0.12	0.38
芬兰 Finland	0.54	1.43	-0.49	0.43
土耳其 Turkey	0.44	0.89	-0.45	0.27
挪威 Norway	1.04	1.53	-0.29	0.65
捷克 Czech Republic	1.24	0.97	-0.08	0.62

二是需要区分生态创新系统水平和生态创新系统可持续性,前者关注系统的现实水平,后者关注系统的发展潜力。根据生态创新系统现有的功能-过程水平和可持续性,主要生态创新国家大致可以分为四种类型(图 2)。第一种类型是生态创新系统现状水平和可持续性都较高,属于先进的生态创新国,如韩国、德国、挪威和法国。特别是韩国,近 20 年来其国家创新能力大幅提升、生态创新系统不断优化、创新投入源源不断。第二种类型是系统现状水平较高而可持续性较弱,或者可持续性较高而现状水平较低,西班牙、芬兰属于前者,需要加大对生态创新系统的投资,捷克、奥地利属于后者,需要加大系统功能的优化和创新过程的提升。第三种类型是现状水平和可持续性都较弱的国家,包括土耳其、丹麦,除了要加大对生态创新系统的资本投入外,还要加强系统功能的提升和创新过程的优化。第四种类型包括荷兰、波兰、意大利,属于现状发展和可持续性较同步的类型,需要继续保持创新系统水平和可持续性。

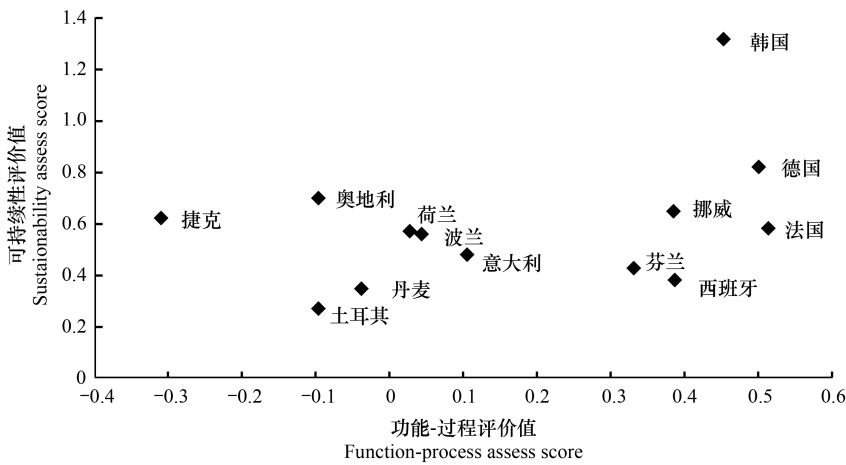


图 2 生态创新系统评估结果

Fig.2 Results of eco-innovation system assessment

本文的生态创新系统评估框架有三个特征:(1)它侧重于创新系统的功能、过程和发展潜力,而不是简单的资源配置和成本-效益分析,对生态创新系统的功能、结构和资本储备进行全方位评价;(2)它把创新系统

的当前水平和未来发展潜力综合起来进行评价,未来可以扩展分析创新系统功能、过程与系统可持续性的关系,从资本的角度挖掘影响系统功能和过程的因素;(3)它兼顾考虑产业部门和公共部门在生态创新系统的作用,同时着眼生态创新系统的硬件和软件。

当前,对生态创新系统的评估和分析仍受理论研究不充分、社区创新调查不完善、生态创新相关数据可获得性差等的极大限制。未来,一方面要加大对生态创新系统结构、功能、过程和可持续性问题的分析和评估,包括不同系统结构功能和不同创新资本的相互作用,以及对生态创新总体效果的影响,增加创新功能、创新资本对生态创新系统综合表现影响的时间序列分析。另一方面要加大对生态创新系统相关指标的研究和数据采集,充分利用大数据和创新社区调查数据,完善生态创新数据库建设。此外,在国家比较和评估的基础上,增加对不同地区、不同行业 and 不同部门生态创新系统的评估和比较研究。

参考文献 (References):

- [1] Fussler C, James P. Driving Eco-innovation: a Breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability. London: Pitman Publishing, 1996.
- [2] Eco innovation Observatory (EIO). Europe in Rransition: Paving the Way to a Green Economy through Eco-innovation. Paris: European Commission, 2012.
- [3] 廖中举, 张曼婷. 基于 web of science 分析的生态创新研究进展. 生态学报, 2020, 40(9): 3144-3153.
- [4] Freeman C, Soete L. The Economics of Industrial Innovation. London: Routledge, 2012.
- [5] Hekkert M P, Negro S O, Heimeriks G, Harmsen R. Technological innovation system analysis: a manual for analysts. Utrecht University, 2011 (November): 16-20.
- [6] Granstrand O, Holgersson M. Innovation ecosystems: a conceptual review and a new definition. Technovation, 2020, 90/91: 102098.
- [7] 董颖, 石磊. 生态创新的内涵、分类体系与研究进展. 生态学报, 2010, 30(9): 2465-2474.
- [8] Al-Ajlani H, Cvijanović V, Es-Sadkix N, Müller V. EU Eco-Innovation Index 2021: Policy Brief. Brussels: European Commission, 2021. [2022-01-03]. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/sites/default/files/eco-innovation_policy_brief_2021.pdf
- [9] Cleantech Group and GEF. The Global Cleantech Innovation Index 2017: Global Cleantech Innovation Programme (GCIP) Country Innovation Profiles. 2017. [2021-08-15]. https://www.unido.org/sites/default/files/files/2017-11/GCII_GCIP_report_2017.pdf
- [10] Dual Citizen LLC. The Global Green Economy Index: GGEI 2016: Measuring National Performance in the Green Economy, 5th ed. 2016. [2021-08-15]. <https://dualcitizeninc.com/GGEI-2016.pdf>
- [11] Jo J H, Roh T, Kim S, Youn Y C, Park M, Han K, Jang E. Eco-innovation for sustainability: evidence from 49 countries in Asia and Europe. Sustainability, 2015, 7(12): 16820-16835.
- [12] van Alphen K, Hekkert M P, Turkenburg W C. Accelerating the deployment of carbon capture and storage technologies by strengthening the innovation system. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2010, 4(2): 396-409.
- [13] Miremadi I, Saboohi Y, Jacobsson S. Assessing the performance of energy innovation systems: Towards an established set of indicators. Energy Research & Social Science, 2018, 40: 159-176.
- [14] Bergek A, Jacobsson S, Carlsson B, Lindmark S, Rickne A. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: a scheme of analysis. Research Policy, 2008, 37(3): 407-429.
- [15] Hekkert M P, Suurs R A A, Negro S O, Kuhlmann S, Smits R E H M. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74(4): 413-432.
- [16] Crespo-Gonzalez C, Benrimoj S I, Scerri M, Garcia-Cardenas V. Sustainability of innovations in healthcare: a systematic review and conceptual framework for professional pharmacy services. Research in Social and Administrative Pharmacy, 2020, 16(10): 1331-1343.
- [17] OECD Working Party of National Experts on Scientific and Technology Indicators. The Measurement of Scientific and Technological Activities: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. 3rd ed. Paris: OECD Publishing, 2005.
- [18] Niosi J, Saviotti P, Bellon B, Crow M. National systems of innovation: in search of a workable concept. Technology in Society, 1993, 15(2): 207-227.
- [19] Schumpeter J A. Capitalism, Socialism, and Democracy. New York: Harper and Row, 1942.
- [20] Schumpeter J A. Comments on a plan for the study of entrepreneurship//Swedberg R eds. The Economics and Sociology of Capitalism. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- [21] Rogers E. Diffusion of Innovation. New York: Free Press, 1962.
- [22] Nelson R R (Ed.). National Innovation Systems: A Comparative Analysis. New York and London: Oxford University Press, 1993.

- [23] Lundvall B A (Ed.). National Systems of Innovation; Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning. London: Pinter, 1992.
- [24] Edquist C. Systems of innovation approaches: their emergence and characteristics//Edquist C eds. Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations. London and New York: Routledge, 1997.
- [25] de la Mothe J, Paquet G. Local and regional systems of innovation. Boston, MA: Springer US, 1998.
- [26] Pavitt K. Technology, Management and Systems of Innovation. Northampton: Elgar, 1999.
- [27] Jacobsson S, Bergek A. Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. Industrial and Corporate Change, 2004, 13(5): 815-849
- [28] Freeman C. Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan. London: Pinter, 1987.
- [29] Freeman C. Japan: A new national innovation systems//Giovanni Dosi, Christopher Freeman, Richard Nelson, Gerald Silverberg, Luc Soete eds. Technical Change and Economic Theory. London and New York: Pinter, 1988.
- [30] Cooke P, Gomez Uranga M, Etxebarria G. Regional innovation systems: Institutional and organisational dimensions. Research Policy, 1997, 26(4/5): 475-491.
- [31] Cooke P, Heidenreich M, Braczyk H-J (Eds.). Regional Innovation Systems: The Role of Governance in a Globalized World. 2nd ed. London and New York: Routledge, 2004.
- [32] Breschi Stefano, Malerba Franco. Sectoral innovation systems: technological regimes, Schumpeterian dynamics, and spatial boundaries//Edquist, Charles eds. Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations. London and New York: Routledge, 1997.
- [33] Granstrand O. Corporate Innovation Systems: a Comparative Study of Multi-technology Corporations in Japan, Sweden and the USA. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2000. [2021-8-15]. <http://www.lem.sssup.it/Dynacom/D21.html>
- [34] 彭雪蓉, 刘洋, 赵立龙. 企业生态创新的研究脉络、内涵澄清与测量. 生态学报, 2014, 34(22): 6440-6449.
- [35] Moore J F. Predators and prey: a new ecology of competition. Harvard Business Review, 1999, 71(3): 75-86.
- [36] Adner R. Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. Harvard Business Review, 2006, 84(4): 98-107;148.
- [37] 上海市科学学研究所. 促进上海创新生态系统发展的研究. 上海: 上海科学技术出版社, 2015.
- [38] Edquist C, Edler J, Vonortas N, Zabala-Iturriagoitia J. Public Procurement for Innovation. Cheltenham and Northampton: Edward Elgar Publishing, 2015.
- [39] Edquist C. Design of innovation policy through diagnostic analysis: identification of systemic problems (or failures). Industrial and Corporate Change, 2011, 20(6): 1725-1753.
- [40] Mowery D C, Nelson R R, Martin B R. Technology policy and global warming: Why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work). Research Policy, 2010, 39(8): 1011-1023.
- [41] Nelson R R. Building effective "innovation systems" versus dealing with "market failures" as ways of thinking about technology policy//Foray D eds. The New Economics of Technology Policy. Cheltenham: Edward Elgar, 2009
- [42] Chaminade C, Edquist C. From theory to practice: the use of the systems of innovation approach in innovation policy//Hage J, Meeus M eds. Innovation, Science, and Institutional Change. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [43] Dodgson M, Hinze S. Indicators used to measure the innovation process: defects and possible remedies. Research Evaluation, 2000, 9(2): 101-114.
- [44] Coad A, Rao R. Firm growth and R&D expenditure. Economics of Innovation and New Technology, 2010, 19(2): 127-145.
- [45] Leiponen A, Helfat C E. Innovation objectives, knowledge sources, and the benefits of breadth. Strategic Management Journal, 2010, 31(2): 224-236.
- [46] Artz K W, Norman P M, Hatfield D E, Cardinal L B. A longitudinal study of the impact of R&D, patents, and product innovation on firm performance. Journal of Product Innovation Management, 2010, 27(5): 725-740.
- [47] Cheng C C, Shiu E C. Validation of a proposed instrument for measuring eco-innovation: an implementation perspective. Technovation, 2012, 32(6): 329-344.
- [48] 张雪梅, 叶贝贝. 行业异质性视角下我国工业生态创新效率评价. 生态学报, 2019, 39(14): 5198-5207.
- [49] Carayannis E G, Grigoroudis E, Goletsis Y. A multilevel and multistage efficiency evaluation of innovation systems: a multiobjective DEA approach. Expert Systems With Applications, 2016, 62: 63-80.
- [50] van Alphen K, Hekkert M P, Turkenburg W C. Comparing the development and deployment of carbon capture and storage technologies in Norway, the Netherlands, Australia, Canada and the United States-An innovation system perspective. Energy Procedia, 2009, 1(1): 4591-4599.
- [51] OECD. How's Life 2020: Measuring Well-Being. Paris: OECD Publishing, 2020.
- [52] United Nations Economic Commission for Europe. Measuring Sustainable Development. New York and Geneva: United Nations, 2009.