

DOI: 10.5846/stxb201806211356

胡熠娜, 彭建, 刘焱序, 王曼, 王仰麟. 区域生态效率研究进展. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Hu Y N, Peng J, Liu Y X, Wang M, Wang Y L. Review on regional eco-efficiency research. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

区域生态效率研究进展

胡熠娜¹, 彭建^{1,2,*}, 刘焱序³, 王曼¹, 王仰麟¹

1 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

2 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

3 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 作为指示可持续发展水平的重要指标, 区域生态效率定量表征了区域发展过程中社会经济和生态环境的协调水平, 能够为生态文明建设提供重要科学依据。在对生态效率概念内涵进行系统梳理的基础上, 重点探讨了区域生态效率研究的近今进展: 研究方法从单一比值到模型模拟、研究对象从静态评估到时空动态、研究内容从效率测度到机理认知。最后, 提出区域生态效率研究的重点方向, 即地理大数据的时空分析、多要素集成的模型研发、区域城市化的重点关注、面向可持续的区域管治等 4 个方面。

关键词: 区域生态效率; 可持续发展; 城市化; 进展与展望

Review on regional eco-efficiency research

HU Yi'na¹, PENG Jian^{1,2,*}, LIU Yanxu³, WANG Man¹, WANG Yanglin¹

1 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: As an important indicator of sustainability, eco-efficiency quantitatively describes the level of coordination between the social economy and ecological environment in regional development and, therefore, can be used as a basis for the construction of an ecological civilization. Following a systematic review of the definition and connotation of eco-efficiency, this study summarizes the recent progress in regional eco-efficiency research: in terms of research methodology, model simulations are replacing single ratios; in terms of research objective, spatio-temporal dynamics are replacing static assessment; and in terms of research content, mechanism identification is replacing efficiency measurement. Subsequently, future directions for regional eco-efficiency research are outlined, that is, spatio-temporal analysis with geographical big data, model development with multi-factor integration, a special focus on regional urbanization, and sustainable governance of regional development.

Key Words: regional eco-efficiency; sustainable development; urbanization; review and perspective

随着世界经济、人口的快速增长, 资源枯竭、环境恶化、生态失衡等一系列问题不断突显出来, 对经济的可持续增长和区域的可持续发展造成了严重威胁^[1]。如何协调经济增长、资源节约和环境保护三者之间的关系, 从而实现可持续发展, 已成为当今世界关注的热点问题, 也是人类面临的巨大挑战。作为衡量自然资源满足人类需求的效率的重要指标, 生态效率这一概念不但能够反映可持续发展理论的核心内涵, 强调社会经济

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41330747)

收稿日期: 2018-06-21; 修订日期: 2018-09-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

发展和资源环境保护的和谐统一,也能够定量刻画人类与自然的耦合程度。时至今日,生态效率已成为可持续发展理论的重要实践探索,也为区域可持续发展定量评估提供了重要方法参考。

生态效率概念由 Schaltegger 和 Sturm 于 1990 年首次提出,认为生态效率是产品或服务增加的价值与增加的环境影响的比值^[2]。随后,国外众多学者和机构对生态效率的概念进行了辨析,并将其应用到产品、企业、产业、区域等多个层面^[3-6]。自 Claude Fussler^[7]将生态效率概念引入中国以来,国内学者在生态效率的评价与应用方面开展了大量工作^[8-10]。整体而言,研究内容方面,国外学者主要关注生态效率的概念界定和模型优化,而国内学者则更多关注于对评价框架的改进。理论应用方面,国外学者主要关注产品、企业和产业等方面,区域层面的应用相对较少;而国内学者在产品、企业和产业等层面研究较少,更多关注于对区域、城市以及国家循环经济建设等大尺度的研究^[11-13]。

产品、企业和产业的生态效率评估能够实现产品生产过程中的资源投入与环境损耗最小化、经济效益最大化,从而有效提升特定行业的可持续生产水平^[14]。而在区域层面进行生态效率评估,能够客观评估区域整体的资源配置、环境质量和经济发展之间的效率关系,对于区域可持续发展意义更为重大。同时,从中、微观尺度的产品、企业、到宏观尺度的产业、区域,生态效率研究中的关注对象各有侧重。尤其是宏观尺度的区域生态效率研究,将区域内部所有产品、企业、产业等要素看作一个整体,综合评估区域内的资源-经济-环境效率,较其他层面具有显著差异。然而,已有研究大多将不同层面的生态效率混杂而谈,鲜有专门针对区域层面生态效率研究的系统梳理。基于此,本文在明晰区域生态效率概念内涵的基础上,重点总结了区域生态效率近年来的研究进展,并提出了区域生态效率研究的重点发展方向。

1 区域生态效率概念内涵

生态效率一词译自英文单词 eco-efficiency。其中,eco-既是生态学 ecology 的词根,又是经济学 economy 的词根,而 efficiency 则表示“效率、效益”的含义^[15]。因此,生态效率应兼顾生态和经济两个层面,从社会-自然耦合的视角来定量刻画区域发展过程中的经济 and 自然协调程度。

在 Schaltegger 和 Sturm 最初定义的基础上,1992 年世界持续发展工商业联合会(WBCSD)在向联合国环境发展大会提交的《改变航向:一个关于发展与环境的全球商业观点》报告中将生态效率界定为“通过提供具有价格优势的服务和商品,在满足人类高质量生活需求的同时,将整个生命周期中对环境的影响降到至少与地球的估计承载力一致的水平上”^[16]。这一认知揭示了生态效率兼顾社会经济发展和资源环境保护两方面,自此生态效率概念被广泛认识和接受。

随后,众多研究机构分别从满足人类需求、降低资源消耗、减少环境破坏等不同视角,提出了一系列生态效率的概念内涵(表 1)。尽管各组织机构对于生态效率的定义有所不同,但其关键词均包含了人类需求、承载力、资源、环境、可持续等方面,因此其核心内涵具有共同性,均是从投入-产出视角,以资源环境影响最小化和经济产出最大化为目标,秉持经济的发展不可以牺牲资源环境为代价的理念。

基于生态效率概念的核心内涵,可以认为区域生态效率直接面向区域这一经济-资源-环境复合系统,是对其协调可持续发展水平的度量^[25],其实质是通过区域内资源和资本的高效配置,在区域经济效率最大化的同时,使得其对资源环境影响最小,从而达到区域内部经济和环境和谐共赢,实现区域可持续发展。

2 区域生态效率研究进展

区域生态效率是对区域内部经济发展与生态环境保护之间协调程度的度量。评估区域生态效率有助于揭示区域的发展质量,从而指导区域的协调可持续发展。国外学者对于区域生态效率的研究主要围绕概念内涵展开,从不同视角对区域生态效率的定义进行解析,有效推动了区域生态效率研究的理论发展。随后,大量研究开始关注区域生态效率的定量研究(图 1),从经济产出/环境投入的单一比值方法,到 DEA 等模型方法的客观评估,区域生态效率的评估逐渐成熟和完善,为量化表征区域的发展质量和可持续水平提供了技术

支撑。同时,国内外学者逐渐从静态的生态效率研究转变为长时间序列的空间动态评价,揭示了生态效率的区域差异和演变规律。此外,部分学者开始关注影响因素和驱动机理的研究,从而为区域生态效率的提升提供理论依据。

表 1 生态效率概念内涵对比

Table 1 Comparison of connotations of eco-efficiency

组织名称 Organization	概念内涵 Connotation	视角 Viewpoint
世界可持续发展工商联合会 ^[16] World Business Council for Sustainable Development	通过提供具有价格优势的服务和商品,在满足人类高质量生活需求的同时,把整个生命周期中对环境的影响降到至少与地球的估计承载力一致的水平上	满足人类需求
经济发展合作组织 ^[17] Organization for Economic Cooperation and Development	生态资源满足人类需求的效率	满足人类需求
欧洲环境署 ^[18] European Environment Agency	以最少的自然界投入创造更多的福利	降低资源投入
联合国亚洲及太平洋经济社会委员会 ^[19] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific	提升基础的社会生产力和降低资源消耗变化的重要基本元素,生态效率的测度将会更好的提升绿色发展	降低资源投入
巴斯夫集团 ^[20] BASF Group	通过产品生产中尽量减少能源和物质的使用以及尽量减少排放以帮助客户保护资源	降低资源投入
澳大利亚环境与遗产部 ^[21] Australian Government Department of the Environment and Heritage	用更少的能源和自然资源提供更多的产品和服务	降低资源投入
国际金融组织环境投资部 ^[22] Environmental Finance Group-International Finance Corporation	通过更有效率的生产方式提高资源的可持续性	提高自然资源可持续性
联合国贸易与发展会议 ^[23] United Nations Conference on Trade and Development	增加(至少不减少)股东价值的同时,减少对环境的破坏	减少环境破坏
加拿大工业部 ^[24] Industry Canada	一种使成本最小化和价值最大化方法	低投入、高产出

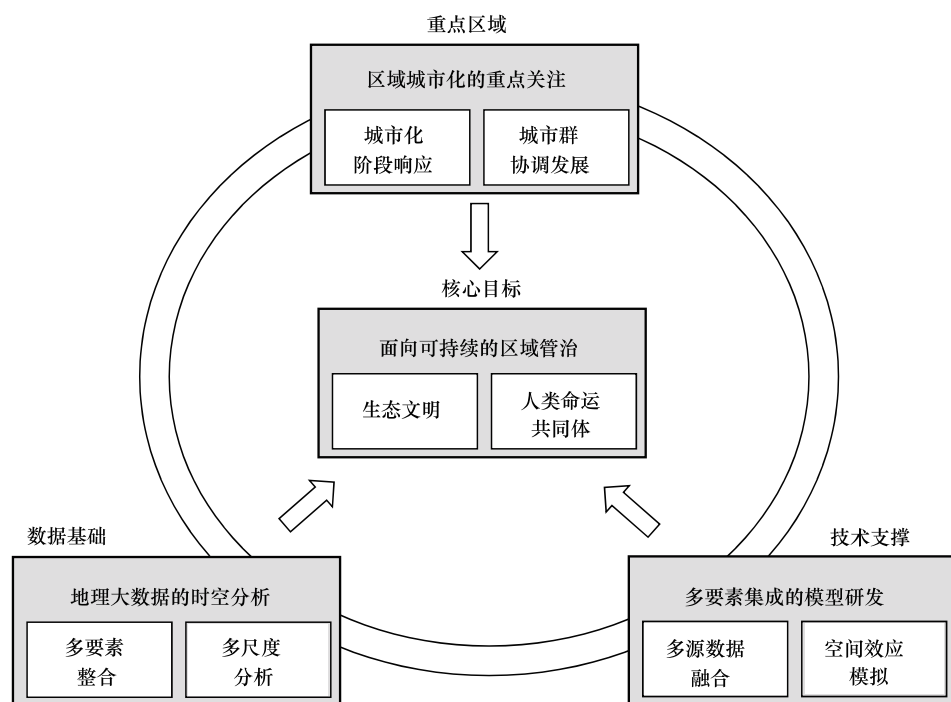


图 1 区域生态效率研究进展

Fig.1 Progress on regional eco-efficiency research

2.1 研究方法:从单一比值到模型模拟

区域生态效率的准确评价是有效提升区域可持续发展水平的重要前提。对区域生态效率评价方法的研究是生态效率研究中的热点,如何设计适当的方法使得评价更为客观合理是一大核心问题^[17]。目前,区域生态效率研究方法主要可以分为经济-环境比值法和模型法两大类。

经济-环境比值法基于 WBCSD 对生态效率的定义,从投入-产出视角出发,采用经济产出和环境负荷的比值来衡量。然而,学界目前对于经济产出和环境负荷的定量表征尚未完全统一:经济指标方面,地区 GDP 是应用最为广泛的指标^[26-27],也有学者应用绿色 GDP^[28]、工业生产总值^[29]等指标;环境负荷方面,已有研究大多从资源消耗和环境影响两个方面分别选取多个代表性指标。例如,黄和平^[30]选取能源消耗、用水、建设用地等作为资源消耗指标,COD 排放、SO₂排放和固体废弃物排放作为环境影响指标对江西省进行生态效率研究。然而,多要素的融合往往存在权重设定主观的问题。因此,部分学者将生态足迹模型、能值分析、物质流分析等方法引入生态效率研究。例如,季丹^[31]基于生态足迹方法构建了区域生态效率模型,分析了我国 30 个地区的生态效率。李名升和佟连军^[32]应用能值分析和物质流分析构建了生态效率指标,在吉林省进行了实证分析。Liu 等^[33]基于城市物质代谢原理评估了厦门市生态效率。

随着技术的革新与发展,为克服权重设定主观等问题,学者们提出了诸多模型方法。目前应用较广泛的模型主要是数据包络分析模型(Data Envelopment Analysis, DEA)。该模型由 Charnes、Cooper 和 Rhode^[34]于 1978 年提出,能够在不设定具体函数形式的情况下评价“多投入多产出”模式下决策单元间的相对有效性,不受限于特定的生产函数假设,且有效克服了权重设定的人为主观性。CCR 模型等早期的 DEA 模型中的指标体系基于投入-产出视角通常以经济增加值为产出,资源和环境负荷为投入。随着混合 DEA 模型、超效率 DEA 等一些新的模型出现,生态效率研究的准确性大大提高。这些模型虽然仍以资源消耗作为投入、经济增长作为产出,但通常将环境影响作为经济增长过程中的负面产出,而不再作为投入,从而更真实地反映实际生产过程^[35-36]。例如,Huang 等^[37]基于改进的 DEA 模型以 GDP 为期望产出,以资本、劳动力、土地和能源为资源投入,以二氧化硫、废水废气等排放作为非期望产出,定量分析了中国 2000—2010 年的生态效率演变。总的来说,区域生态效率的研究指标逐渐由单要素评价向多要素评价转变,评价方法也逐渐由主观赋权评估趋向客观模型模拟。

2.2 研究对象:从静态评估到时空动态

从时空尺度来看,已有研究主要基于静态和动态的视角,在不同时空尺度上进行区域生态效率研究,从而探究不同区域的空间差异性和长时序演变规律。相较而言,早期的研究多为静态评价,主要基于经济-环境比值法和 DEA 等模型评价结果,从空间维度上进行细部差异分析。例如,王波和方春洪^[38]基于因子分析评价了我国各省 2007 年的生态效率,并按东、中、西三大经济带进行比较分析。

然而,区域生态效率的静态评价只能解释区域内部的差异性,无法反映区域生态效率的演变机制,更难以有效指导区域的协调可持续发展。鉴于此,国内外学者开始应用超效率 DEA、 σ 收敛系数、Malmquist 指数等^[39-40],将空间和时间两个维度结合起来,对生态效率变化趋势进行动态研究。例如,Huang 等^[41]基于 2003—2013 年生态效率指数的变化将 191 个中国城市划分为不同群体,发现东部城市整体保持了较高的生态效率,而内陆城市、非环境重点保护城市、资源城市等 3 个群体的生态效率则趋向于一个低水平的稳定状态;Nežinský^[42]基于非参数 DEA 模型评估了 2000—2010 年欧洲国家的生态效率,并利用松弛测度模型发现研究时段内欧洲国家的生态效率呈现一种收敛态势;郑德凤等^[27]对 2000—2015 年中国大陆生态效率进行测度分析,利用灰色动态模型对 2025 年和 2035 的格局进行了预测。总体而言,长时序的区域生态效率测度能够反映其演变规律,从而有助于根据其演变态势提出提升对策建议。

不过, σ 收敛系数、Malmquist 指数等传统的数量统计模型均建立在区域空间实体不存在任何空间关联的假设前提之下^[43]。事实上,生态效率在区域之间存在的扩散和极化效应,可以缩小或扩大生态效率的区域差异。因此,一些学者尝试利用莫兰指数(Moran's I)等方法探究区域生态效率的空间联系。例如,任宇飞和方

创琳^[44]在对京津冀地区生态效率进行测度的基础上,通过全局莫兰指数发现 2006—2014 年京津冀地区县域单元生态效率存在空间正向集聚趋势,且邻域单元生态效率的差距有所缩减;胡彪和付业腾^[45]运用空间自相关分析了中国省域生态效率全局及局域的空间差异,指出中国生态效率相近的区域在空间上表现出波动的集聚现象。这些研究均一定程度上反映了区域生态效率的空间地理关联,直接指向了对于区域生态效率空间分异及其演化驱动机制的探讨。

2.3 研究内容:从效率测度到机理认知

区域生态效率研究早期主要集中在概念的辨析、测度方法的优化和计算模型的构建等内容。对于区域生态效率评价结果的分析尚停留在简单的数值分析,缺少对区域生态效率影响因素的探究,更没能揭示不同区域生态效率差异的形成机理。随着区域生态效率研究的发展,越来越多的学者开始从关注数值评估结果转向对生态效率格局变化的驱动机理研究。例如,李在军等^[46]借助空间计量经济模型对中国区域生态效率的影响因素进行分析,发现城市化水平及经济水平的提高有助于提升区域生态效率,而第二、三产业比重的增加则属于负向驱动因素。潘兴侠等^[47]运用空间统计和空间误差模型对我国省域生态效率水平的空间关联机制及其影响因素进行了定量分析,发现利用外资、人力资源、产业结构对生态效率具有显著正向影响,而环境污染治理投资和排污收费制度对区域生态效率的影响并不显著;Huang 等^[37]发现同种要素对于不同区域的贡献有所差异,例如科技对于中国东、中、西和东北地区的生态效率增长贡献率分别为 56.87%、58.21%、18.27%、62.19%。总的来说,区域发展规模和模式、资本和环境投入是当前区域生态效率驱动机理分析的核心关注因素。

随着驱动机理研究的不断深入,学者们发现既有研究尽管能够在整个时间段内揭示区域生态效率的影响因素及其作用机理,但没能剥离不同城市化阶段的差异。为了更有效地指导区域可持续发展,城市化关键阈值的识别成为当前研究的热点。例如,李佳佳和罗能生^[48]发现 2003—2013 年中国 281 个地级市城市规模对生态效率的影响呈现 N 型曲线的特征,生态效率随城市规模的扩张先上升后下降再上升,对应的两大城市规模阈值分别为 54.48、337.22 万人。

3 区域生态效率研究展望

区域生态效率是认识区域经济发展与生态环境协调度、衡量区域发展质量的有效指标,能够为区域可持续发展水平的提升路径提供科学支撑。自生态效率概念提出以来,国内外学者以可持续发展为宗旨,不断深化生态效率的概念内涵与模型方法,取得了大量科学成果。然而,区域生态效率研究仍然存在诸多问题,主要表现为缺少区域内部精细化评估、阶段性规律及其影响因素的探究不足,研究结果的实际指示意义缺乏梳理,因此已有区域生态效率研究仍难以有效指导不同发展阶段区域可持续发展的时空差异化管理。

在全球快速城市化的大背景下,生态文明已成为基本国策,建设美丽中国和构建人类命运共同体是中国可持续发展的重大目标,城市化面临着转型挑战。同时,随着科技的进步,大数据和新技术的发展为区域生态效率的研究提供了新的思路和模式。新时代的区域生态效率研究面临新的机遇与挑战,需要在数据方法、研究内容和成果应用等方面进一步创新和拓展^[49],为实现生态文明战略做出科学贡献(图 2)。

3.1 地理大数据的时空分析

已有的区域生态效率研究中使用的社会经济发展指标主要依托统计数据,因此大多在行政区域尺度上展开^[50-51]。然而,省、市等行政尺度上的研究无法清晰体现区域内部的空间异质性,且难以衡量空间关联、溢出效应等对评价结果的影响。另一方面,传统统计数据往往以年、月为间隔进行统计,时间连续性较差,严重制约了区域生态效率的动态监测。

随着 GIS 和遥感技术的发展,海量的遥感监测和实时的统计数据为区域生态效率研究在多尺度上的动态空间化表达提供了重要依托。基于地理空间大数据,经济和环境数据趋向于更加多元化和准确化,能够更全方位地表现区域内部经济和生态状况以及区域间社会经济联系,从而大大提升区域生态效率研究的准确性。

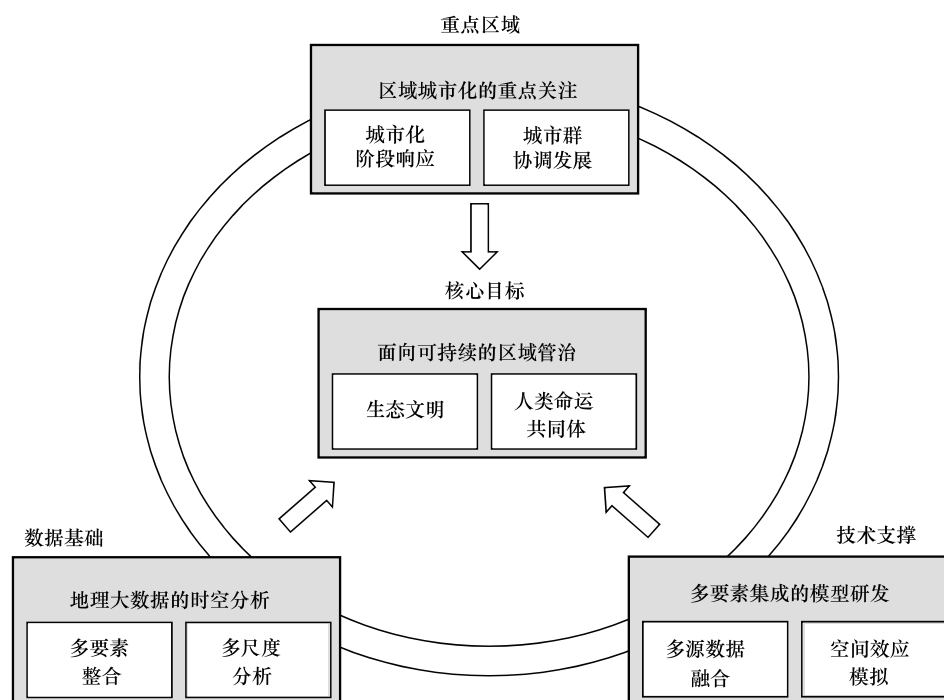


图2 区域生态效率重点研究方向

Fig.2 Key research directions on regional eco-efficiency

同时,区域生态效率不再是一个单一数值,而是一个更为细致的空间化表达。因此,基于这种多尺度的区域生态效率表征,从空间异质性视角探究复杂的空间关联模式和不同的影响机理,将是未来区域生态效率研究的重要内容。

3.2 多要素集成的模型研发

评价方法的发展和完善是区域生态效率研究发展的重要支撑。从经济-环境指标的比值评价,到生态足迹、能值分析等一系列模型的引入,再到 DEA 等模型的发展,极大地提升了区域生态效率研究的客观性^[52]。基于地理大数据的内在要求,区域生态效率的研究方法也需进一步深化。一方面,如何有效融合海量的多源数据,尤其是空间化的环境要素和基于统计的经济数据之间的融合,为模型的研发提出了挑战^[53];另一方面,区域生态效率往往在多时空尺度展开,如何构建能够适应不同尺度、不同区域特征的可重复性较高的模型算法也是一大难点。同时,社会系统是一个开放的系统,其经济活动不但对其内部环境具有影响,也会对其外部环境产生影响,如何利用模型模拟这种空间溢出效应,也是亟待解决的问题之一。

在今后的区域生态效率研究中,有必要考虑社会经济统计数据的合理空间化以及多要素多尺度的有效融合。同时,应对社会-自然耦合系统中的经济发展与环境影响的复杂关系,借助人工智能等先进数据分析手段模拟区域内、外部环境对区域经济活动的响应机制,从而准确评估区域经济发展对生态环境的影响,也将是区域生态效应研究的重要方法创新。

3.3 区域城市化的重点关注

全球城市化进程加快,城市区域承载了地球上超过 50%的人口和 80%的经济增长^[54],城市地区已成为实现人类可持续发展目标的关键区域^[48]。然而,高速城市化进程在推动经济发展的同时,也带来了空气污染、水质恶化、土壤退化等一系列生态环境问题,严重制约了城市地域的可持续发展^[55-56]。如何在实现经济发展的同时最大程度上保护好生态环境,即提高城市地区的生态效率,已成为新型城镇化和生态文明建设面临的一个重要问题^[57]。城市发展与生态效率演变之间的内在机制,也是当前区域生态效率研究的重点方向。因此,实时监测城市发展不同阶段的生态效率状况,了解不同城市扩张规模、不同城市发展模式和城市化不同阶

段的生态效率响应,对于科学指导城市的可持续发展具有重要意义。

随着经济、资源等要素在全球或区域城市网络中的流动作用,城市逐渐从孤立的点状城市转向相互紧密联系的面状城市区域^[58]。城市群已成为推进中国新型城镇化的重要空间主体,也是国家政策制定的热点区域^[59]。然而,城市群内部发展极不平衡,甚至出现两极化的状况,核心城市与边缘城市间的发展极不协调。针对这一问题,可通过分析城市群内部经济、资源等要素的空间联系,探究经济发展与环境影响的耦合关系,构建城市群内部的生态效率核算和预测模型,提出提升城市群整体发展质量的对策建议,为推动特大城市群地区的可持续发展、实现国家新型城镇化战略目标做出科学贡献。

3.4 面向可持续的区域管治

可持续发展是新时代的主题,也是人类面临的重大挑战^[60]。在当今全球化的大背景下,我国提出构建人类命运共同体的重大构想,加快生态文明体制改革,建设美丽中国。在这种时代使命下,我们需要走一条人与自然和谐共生的现代化道路。区域生态效率研究的核心就是对区域经济社会与生态环境和谐发展水平的探究,因此区域生态效率提升是可持续发展最为有效的实践之一。

进一步的研究应始终面向可持续发展目标,将区域生态效率研究从效率测度、影响因素识别、驱动机制探究逐步深化到区域生态效率的提升路径,使区域生态效率研究成为区域管治的有效依托。同时,根据不同区域的经济发展差异和生态环境本底特征,高效配置区域内外的资源和资本,从而进行具有本底特色的、科学的差异化区域管治,为生态文明战略的实施和人类命运共同体的建设提供决策依据。

4 结语

区域生态效率是衡量区域发展质量的重要指标之一,能够为区域可持续发展和生态文明战略的实现提供重要的科学依据。目前,区域生态效率的概念界定已较为统一,即从经济产出和资源消耗、环境影响等层面衡量区域发展的协调程度。随着区域生态效率理论的成熟与完善,其研究方法也逐渐从经济投入/环境影响的简单比值评估发展为更为客观的模型模拟。同时,生态效率研究不再停留在静态的单一区域层面,而是转向时空动态评估,影响因素及其驱动机理的研究也逐渐受到重视。

随着“大数据”、“人工智能”等新兴技术的发展,从全球到地方多尺度长时间序列的区域生态效率研究,将为不同区域发展水平的评估提供科学基础;借助人工智能等先进数据分析手段处理多源的海量地理空间数据及社会经济统计数据,是区域生态效率研究的技术导向;在全球高速城市化的大背景上,关注特大城市群地区,探究不同城市化规模、城市化模式和不同城市化阶段的生态效率,对于新型城镇化建设具有重要意义;面向全球和区域的可持续发展目标,测度不同区域的发展质量,厘清不同区域的影响机理,将为区域的差异化管治和特定发展路径的制定提供重要的决策依据。

参考文献 (References):

- [1] Peng J, Zhao S Q, Liu Y X, Tian L. Identifying the urban-rural fringe using wavelet transform and kernel density estimation: a case study in Beijing City, China. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 83: 286-302.
- [2] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität. *Die Unternehmung*, 1990, 44(4): 273-290.
- [3] Dahlstrom K, Ekins P. Eco-efficiency trends in the UK steel and aluminum industries: differences between resource efficiency and resource productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 171-188.
- [4] Hellweg S, Doka G, Finnveden G, Hungerbühler K. Assessing the eco-efficiency of end-of-pipe technologies with the environmental cost efficiency indicator. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(4): 189-203.
- [5] Koskela M. Measuring eco-efficiency in the Finnish forest industry using public data. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 98: 316-327.
- [6] Laso J, García-Herrero I, Margallo M, Vázquez-Rowe I, Fullana P, Bala A, Gazulla C, Irabien Á, Aldaco R. Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: an eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 428-437.
- [7] Fussler C. 工业生态效率的发展. *产业与环境(中文版)*, 1995, 17(4): 71-74.

- [8] 程翠云, 任景明, 王如松. 我国农业生态效率的时空差异. 生态学报, 2014, 34(1): 142-148.
- [9] 韩瑞玲, 佟连军, 宋亚楠. 基于生态效率的辽宁省循环经济分析. 生态学报, 2011, 31(16): 4732-4740.
- [10] 郑慧, 贾珊, 赵昕. 新型城镇化背景下中国区域生态效率分析. 资源科学, 2017, 39(7): 1314-1325.
- [11] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. 生态学报, 2007, 27(8): 3124-3131.
- [12] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 169-175.
- [13] 罗能生, 李佳佳, 罗富政. 中国城镇化进程与区域生态效率关系的实证研究. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 53-60.
- [14] 关伟, 许淑婷. 中国能源生态效率的空间格局与空间效应. 地理学报, 2015, 70(6): 980-992.
- [15] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. 生态学报, 2006, 26(11): 3898-3906.
- [16] Stephan Schmidheiny with the Business Council for Sustainable Development. Changing course: A global business perspective on development and the environment. Cambridge, Mass: MIT Press, 1992.
- [17] Organisation for Economic Co-operation and Development. Eco-efficiency. OECD, 1998, 7-11.
- [18] European Environmental Agency. Making sustainability accountable: Eco-efficiency, resource productivity and innovation. OOEPEC, 1999.
- [19] ESCAP U N. Eco-efficiency Indicators: Measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment. Greening of Economic Growth Series, UN Publication, 2009.
- [20] Saling P, Kicherer A, Dittrich-Krämer B, Wittlinger R, Zombik W, Schmidt I, Schrott W, Schmidt S. Eco-efficiency analysis by BASF: the method. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4): 203-218.
- [21] Australian Government: Department of the Environment and Energy. <http://www.deh.gov.au/> [2018-09-03].
- [22] International Finance Corporation. <http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/Content/CleanerProduction> [2018-09-03].
- [23] United Nations Conference on Trade and Development. Integrating environmental and financial performance at the enterprise level: A methodology for standardizing eco-efficiency indicators. United Nations Publication, 2003, 29-30.
- [24] Industry Canada. Eco-efficiency: Good business sense. 2002. [https://www.ic.gc.ca/eic/site/017.nsf/vwapj/DPROct2004E.pdf/\\$file/DPROct2004E.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/017.nsf/vwapj/DPROct2004E.pdf/$file/DPROct2004E.pdf) [2018-09-03].
- [25] 潘兴侠. 我国区域生态效率评价、影响因素及收敛性研究. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [26] Xing Z C, Wang J G, Zhang J. Expansion of environmental impact assessment for eco-efficiency evaluation of China's economic sectors: An economic input-output based frontier approach. Science of the Total Environment, 2018, 635: 284-293.
- [27] 郑德凤, 郝帅, 孙才志, 吕乐婷. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测. 地理研究, 2018, 37(5): 1034-1046.
- [28] 黄和平, 胡晴, 乔学忠. 基于绿色 GDP 和生态足迹的江西省生态效率动态变化研究. 生态学报, 2018, 38(15): 5473-5484.
- [29] 任宇飞, 方创琳, 蔺雪芹. 中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价. 地理学报, 2017, 72(11): 2047-2063.
- [30] 黄和平. 基于生态效率的江西省循环经济发展模式. 生态学报, 2015, 35(9): 2894-2901.
- [31] 季丹. 中国区域生态效率评价——基于生态足迹方法. 当代经济管理, 2013, 35(2): 57-62.
- [32] 李名升, 佟连军. 基于能值和物质流的吉林省生态效率研究. 生态学报, 2009, 29(11): 6239-6247.
- [33] Liu Y, Wang W, Li X Q, Zhang G Q. Eco-efficiency of urban material metabolism: a case study in Xiamen, China. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2010, 17(2): 142-148.
- [34] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [35] Dyckhoff H, Allen K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA). European Journal of Operational Research, 2001, 132(2): 312-325.
- [36] 朴胜任, 李健. 基于超效率 DEA 模型的中国区域环境效率时空差异研究. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 1-6.
- [37] Huang J H, Yang X G, Cheng G, Wang S Y. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China. Journal of Cleaner Production, 2014, 67: 228-238.
- [38] 王波, 方春洪. 基于因子分析的区域经济生态效率研究——以 2007 年省际间面板数据为例. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 158-162.
- [39] Gómez-Calvet R, Conesa D, Gómez-Calvet A R, Tortosa-Ausina E. On the dynamics of eco-efficiency performance in the European Union. Computers & Operations Research, 2016, 66: 336-350.
- [40] 任胜钢, 张如波, 袁宝龙. 长江经济带工业生态效率评价及区域差异研究. 生态学报, 2018, 38(15): 5485-5497.
- [41] Huang J H, Hua Y. Eco-efficiency convergence and green urban growth in China. International Regional Science Review, 2018, <https://doi.org/10.1177/0160017618790032>.
- [42] Nežinský E. Is there a convergence in eco-efficiency in the EU? //Proceedings of the 25th International Business Information Management Association Conference—Innovation Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth. Amsterdam, Netherlands:

- International Business Information Management Association, 2015; 3328-3337.
- [43] Camarero M, Castillo J, Picazo-Tadeo A J, Tamarit C. Eco-efficiency and convergence in OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 55(1): 87-106.
- [44] 任宇飞, 方创琳. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 87-98.
- [45] 胡彪, 付业腾. 中国生态效率测度与空间差异实证——基于 SBM 模型与空间自相关性的分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 6-12.
- [46] 李在军, 姚云霞, 马志飞, 胡美娟, 吴启焰. 中国生态效率的空间格局与影响机制分析. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 4208-4217.
- [47] 潘兴侠, 何宜庆, 胡晓峰. 区域生态效率评价及其空间计量分析. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(5): 640-647.
- [48] 李佳佳, 罗能生. 城市规模对生态效率的影响及区域差异分析. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(2): 129-136.
- [49] Huppes G. Why we need better eco-efficiency analysis. From technological optimism to realism. *Technikfolgenabschätzung - Theorie Und Praxis*, 2007, 3(16): 38-45.
- [50] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 徐文赞. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 47-54.
- [51] 刘军, 马勇, 问鼎, 童昀, 任洁. 2000-2014 年中国区域生态效率测度及其时空差异. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 498-508.
- [52] 杨斌. 2000-2006 年中国区域生态效率研究——基于 DEA 方法的实证分析. *经济地理*, 2009, 29(7): 1197-1202.
- [53] Wursthorn S, Poganietz W R, Schebek L. Economic-environmental monitoring indicators for European countries: a disaggregated sector-based approach for monitoring eco-efficiency. *Ecological Economics*, 2011, 70(3): 487-496.
- [54] Liu Z F, He C Y, Zhou Y Y, Wu J G. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 2014, 29(5): 763-771.
- [55] He C Y, Liu Z F, Tian J, Ma Q. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: A multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [56] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. *地理学报*, 2005, 60(2): 237-247.
- [57] 金贵, 吴锋, 李兆华, 郭柏枢, 赵晓东. 快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析. *生态学报*, 2017, 37(23): 8048-8057.
- [58] Fang C L, Yu D L. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [59] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- [60] 邬建国, 郭晓川, 杨劼, 钱贵霞, 牛建明, 梁存柱, 张庆, 李昂. 什么是可持续性科学? *应用生态学报*, 2014, 25(1): 1-11.