

DOI: 10.5846/stxb201506021108

臧正, 邹欣庆. 中国大陆省际生态-经济效率的时空格局及其驱动因素分析. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Zang Z, Zou X Q. Analysis on spatial and temporal pattern and the driving forces of ecological-economic efficiency for provinces on Chinese mainland. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

中国大陆省际生态-经济效率的时空格局及其驱动因素分析

臧 正, 邹欣庆*

南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 在参考和借鉴有关生态系统服务价值理论研究成果的基础上, 文章提出生态-经济产出效率概念及其内涵、表征方法, 结合有关统计数据计算了 2001—2013 年中国大陆 31 个省区生态-经济产出效率并就其时空分布及重心移动方向、移动距离等进行分析, 在此基础上应用探索性空间数据分析方法及偏最小二乘回归模型对其空间集聚特征和驱动因素进行实证分析。研究结果表明: 考察时段内中国大陆省际生态-经济产出效率自西向东依次提高的三级梯度分布格局趋于形成; 省区之间生态-经济产出效率具有全局空间依赖性和空间正相关特征, 显著高-高集聚和显著低-高集聚表现相对稳定、高-低集聚区的生态效率溢出效应促使显著低-低集聚区逐步消失; 人均国民生产总值、单位面积内的道路交通里程数、科研资金投入占 GDP 的比重等三因素显著驱动了中国大陆省际生态-经济产出效率溢出, 但东、中、西部地区的制约因素不尽相同。

关键词: 生态经济学; 生态效率; 实证分析; 时空格局; 驱动力

Analysis on spatial and temporal pattern and the driving forces of ecological-economic efficiency for provinces on Chinese mainland

ZANG Zheng, ZOU Xinqing*

School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Referring to the research findings of ecosystem service value, a new concept “ecological-economic output” was proposed and defined in this paper the connotation and characterization method of this concept was also given. With the statistical data, ecological-economic output efficiency of 31 provinces of Chinese mainland during 2001—2013 was calculated. The spatial-temporal distribution, gravity center transferring direction and distance were also analyzed. On this base, the spatial agglomeration trait and the driving forces were discussed through spatial data analysis method and partial least squares regression model. The results showed that in Chinese mainland, during the research period, ecological-economic output efficiency at province level showed three-level graded distribution, characterized by increasing from the west to the east. Ecological-economic output efficiency had the trait of overall spatial dependence and spatial positive correlation. Remarkable high-high agglomeration and low-high agglomeration in some regions were stable, and ecological overflow effect of high-low agglomeration made low-low agglomeration vanished eventually. GDP per capita, road lengths per unit area and proportion of scientific research funding from GDP drove the improvement of ecological-economic output efficiency of Chinese mainland. However, the restricting elements were varied from place to place.

Key Words: ecological economics; ecological efficiency; empirical analysis; spatial and temporal pattern; driving forces

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J1103408)

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zouxq@nju.edu.cn

生态效率是指人类社会获得的经济价值增量和由此导致的环境影响增量的比值^[1],因其能够将可持续发展的宏观目标与中、微观尺度的区域发展规划或企业管理有效结合在一起,使得相关研究成为生态学、经济学等学科领域日益关注的焦点问题^[2-3]。随着世界可持续发展工商联合会(WBCSD)、经济发展与合作组织(OECD)、欧洲环境署(EEA)等国际组织的推广^[4-6],各国学者在不同时空尺度内开展了一系列生态效率理论与实践应用研究;在理论方法上,由于研究目的、研究对象或研究视角不同,导致对经济价值及环境影响的度量存在差异,基于投入-产出分析的单一比值法、多指标综合评价法、数据包络分析模型等在不同空间尺度或不同行业得到了实证^[7-12],一些研究还针对传统方法存在的弊端或缺陷进行了相应改进;在实践应用中,由于广大中小企业的资金或技术限制而难以实施持续的生态效率策略^[13],因此国外大型企业得以率先开展生态效率评价并将其与企业发展战略、决策联系起来^[14-15],研究视角也不断拓宽并逐渐与温室效应、粮食安全、生物多样性保护等有关全球变化问题联系到一起,促使相关研究成为全球可持续发展研究领域的热点。

生态效率概念及其评价方法引入我国之后,在有关其理论方法、影响因素识别及区域实证等方面取得了一系列成果;在理论方法研究方面,刘晶茹等从复合生态系统视角提出了复合生态效率概念,据此构建了生态产业园的生态效率评价指标体系^[16];季丹、芮俊伟等分别应用生态足迹法针对中国大陆省区以及小尺度区域生态工业园的生态效率开展了实证研究^[17-18];潘丹等、李健等分别基于非期望产出的SBM模型与非参数距离函数模型评价了中国大陆农业生态效率和区域生态效率^[19-20]。在区域生态效率评价研究方面,张淑英等通过环境压力指标、应用Tobit模型分析了我国区域工业生态效率的影响因素,发现人均国民生产总值和地理位置具有驱动作用(正面因素)、而外向型经济结构却在一定程度上制约(负面因素)区域生态效率提高^[21];陈作成等从系统协同的视角分析了我国西部地区产业系统生态效率^[22],研究结果表明资本投入及技术进步能够促进清洁生产提高效率、市场化水平提高起负面作用,而外商直接投资对生态环境的作用则表现为“节能”而非“减排”;陈傲利用因子分析模型探讨了中国区域生态效率的差异,结果表明环保资金投入及产业结构调整对改善区域生态效率有积极影响、而以排污费为代表的环境经济政策的显著作用尚未发现^[23];在生态效率的影响因素研究方面,汪克亮等、崔玮等分别基于节能视角和减排视角展开了实证研究,发现资源配置不合理、环境管理水平低下等两方面因素是制约中国大陆地区生态效率提升的主导因素^[24],认为通过提高区域技术进步与技术效率指数有助于缩小地区生态效率的显著差异^[25];初善冰等、罗能生等、潘兴侠等分别探讨了外商直接投资、城镇化水平及产业结构对区域生态效率差异的影响,发现外商直接投资对东部地区提高生态效率的正向影响较中、西部地区显著^[26],城镇化水平的提高对东、西部地区生态效率的影响方向截然相反^[27],而产业结构不合理是导致我国中部地区生态效率低的首要因素^[28];潘兴侠从区域经-济-资源-环境复合系统的视角开展了生态效率综合评价研究工作,深入分析了我国区域生态效率差异的影响因素及其收敛特征,进而从经济发展、产业结构、人力资本、外资利用、环境政策以及科技实力等六个方面提出了提升策略^[29]。

纵观上述文献及其他代表性研究成果可以看出:以往我国学者大多沿用了国外提出的生态效率概念,在核心思想基本一致的基础上开展了不同时空尺度的实证研究^[30-32],并在中国大陆东、中、西部地区生态效率评价中取得比较一致的认识——概而言之,多数研究成果普遍支持中国生态效率具有“东高西低,南优北劣”的观点,进而为不同地区提高生态效率、突破生态效率的梯度限制等提供了科学建议与对策;但是,由于研究视角不同^[22, 24-25]、所用评价方法不同^[17, 20]、选取的指标不同^[16, 21],导致有关研究结果存在不确定性、成果之间缺乏可比性等问题^[26-28];而从国内、外对比来看,国外研究已经日益重视生态效率与全球变暖、粮食安全、生物多样性等重大问题的密切联系,为此从学科交叉视角对传统生态效率评估模型及方法进行改良和修正,并逐步由简单的生态效率评价转向其驱动机制研究^[3],而国内相关研究在这方面尚有待深入。鉴于此,本文拟在学习和参考国内外有关生态效率研究成果的基础上,尝试提出并界定基于生态系统服务理论的生态-经济产出效率概念及其内涵、表征方法,进而应用探索性空间数据分析方法和偏最小二乘回归法对有关年度中国大陆省区生态-经济产出效率的时空关联格局及其驱动因素展开实证研究,旨在为丰富和发展有关生态效

率评价方法提供一些借鉴、为有关地区和部门制定区域生态效率提升策略等提供一些参考。

1 研究方法

1.1 生态-经济效率的综合表征方法

生态效率概念的主旨思想可概括为“环境影响最小化-经济价值最大化”,即以最小的环境代价获得最大的经济价值^[2-3]。评价生态效率的核心和难点是经济与环境维度的表征,为此本文在借鉴有关研究成果的基础上提出基于生态系统服务价值理论的生态-经济产出效率评价模型,以期从生态系统服务与经济发展成就的联系视角丰富有关生态效率研究方法。

1.1.1 基于生态系统服务价值理论的生态-经济效率评价

生态系统服务是生态系统通过生态过程向人类提供的、具有一定数量和质量生态产品和服务,通常可以用其货币化形式、即生态系统服务价值进行衡量。人类生产和生活过程中每年消耗的生态系统服务价值大部分转移、固化到当年的国民经济与社会发展成就之中,因此生态系统服务的持续供给是区域可持续发展的基础,人类通过生态系统服务消费结合劳动力、资本投入实现了从生态系统服务到经济社会收益的转化。为进一步衡量作为自然资本投入到经济生产过程中的生态系统服务与相应经济产出的定量关系,本文借鉴 Johnston、Mäler 等提出的服务-收益函数及生产函数概念及定义^[33-34],提出基于生态系统服务价值理论的区域生态-经济产出效率评价模型如下:

$$EEE = GDP/ESV \quad (1)$$

式中:GDP 为国民生产总值(万元),代表区域国民经济与社会发展成就;ESV 代表投入到国民经济与社会发展过程中的全部生态系统服务;EEE 称为生态-经济产出效率,表征区域国民经济与社会发展过程中生态系统服务到经济与社会收益的转化能力(无量纲;本文中也将其简称为生态-经济效率或生态效率),其值越大表明消费等量生态系统服务产出的经济与社会效益越大。

生态系统服务价值既包括物质产品、文化娱乐服务等直接利用价值,也包括维持生态平衡、保护环境等非直接利用价值,服务范围几乎涵盖国民生产各个部门。本文参考谢高地等提出的中国陆地生态系统服务价值评价方法^[35],应用如下模型核算生态系统服务价值:

$$ESV = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^9 P \cdot Y \cdot E_{ij} \cdot A_i / 7 \quad (2)$$

式中: P 代表原粮市场粮食平均价格(单位为万元/t), Y 代表耕地的平均粮食产量(单位为 t/hm²),两者可在一定程度上代表特定地区的物价水平及农林牧渔等第一产业生产力水平; E_{ij} 代表基于耕地的食物生产价值得出的不同种类生态系统服务价值的当量因子(无量纲, i, j 分别代表第 i 类生态系统中的第 j 种生态系统服务价值的当量因子),表征各类生态系统为人类提供产品、服务的能力; A_i 代表第 i 类生态系统对应占有的土地面积(单位为 ha),可表征区域资源禀赋(自然条件及生态系统状况等); ESV 代表区域生态系统服务价值,由食物生产等 9 种生态系统服务价值表征(其中非直接利用价值作为间接投入,替代国民经济与社会发展过程中的生态环境治理成本)、并可由 6 类生态系统供应(单位为万元,年值)。

1.1.2 相对生态效率的表征方法

以往研究成果表明,特定时期、特定区域的生态效率可能同时受到经济发展水平、产业规模与结构、生产力发展水平、科技进步及区域自然条件等的综合影响^[24-29],而由前文提出的式(1)可知本文界定的生态-经济产出效率 EEE 是具有绝对内涵的生态效率表征,为便于比较,进一步提出以其标准化值表征不同评价单元的生态-经济产出效率:假设共有 n 个待评价单元,其中第 k 个待评价单元基于其区域生态系统服务价值投入(ESV_k)获得的总经济产出为 GDP_k ,则其相对生态-经济产出效率 $REEE_k$ (下文简称相对生态效率)可表示为:

$$REEE_k = EEE_k / EEE_n \quad (3)$$

式中, EEE_n 代表所有评价单元中的同期生态-经济产出效率的最大值与最小值之差, EEE_k 代表评价单元 k 的生态-经济产出效率与最小值之差;以此为参考标准得出的相对生态-经济产出效率 $REEE_k$ (无量纲)表征其在

所有考察样本中的相对位置;其值越大,表明其生态效率相对越优, $REEE_k > 1$ 表示其优于参考标准;反之若 $REEE_k < 1$, 表明其劣于参考标准。

1.2 生态效率的空间关联格局及其驱动力分析方法

1.2.1 探索性空间数据分析方法

空间计量经济学理论认为,特定空间单元上的某种经济地理现象或其属性值与邻近单元上的同一现象或属性值是相互关联的,彼此具有空间依赖性^[36-38]。生态系统的地域差异及生态系统服务的动态性使其在为人利用过程中具有空间自相关性和溢出效应;某一地区的生态效率提高或降低,将对本地区及其他地区产生特定影响。本文据此引入探索性空间数据分析方法对不同空间单元、不同时期的生态-经济产出效率的时空关联格局进行初步分析,以便为进一步揭示驱动或制约中国大陆地区生态效率提升的影响因素奠定基础。

探索性空间数据分析方法(ESDA)是一系列空间数据分析技术与方法的集合,能够借助可视化的表达方法描述数据的空间分布特征、识别空间数据的结构及其异常值,并可据此检测某些地理现象的空间集聚效应、揭示相互之间的空间作用机制等,因此常用于空间统计研究^[39]。空间权重矩阵是空间经济计量模型的应用前提,一般可通过空间邻接规则(公共边界或公共点)、多边形原则、距离最小原则构建;考虑到省际大尺度空间限制,本文拟在对多种空间赋权方案进行比较的基础上,尝试依据距离衰减原理、通过各省区重心之间的距离确定空间权重矩阵,以期进一步提高评价结果的可靠性。分析过程应用 MapInfo10.0(绘制空间分布图)和 GeoDa095i(计算空间自相关指数,绘制空间集聚图、散点图)完成,因文章篇幅所限、相关理论基础及具体应用步骤恕不赘述,请参阅相关文献^[39-40]。

1.2.2 偏最小二乘回归分析方法

区域自然地理条件无疑会导致生态系统服务供给具有空间异质性,而经济与社会发展的本底条件、甚至人类个体或群体的心理与文化因素等也在不同程度上影响区域生态系统服务消费总量及消耗强度,因此区域生态效率可能同时受到多重自然-人文因素影响;自然因素导致生态系统服务与经济产出关系具有一定的非线性特征,而人文因素如文化背景、科技进步、市场机制因素等可能导致生态效率与区域经济和社会发展存在更加复杂的耦合关系。因此,在初步分析区域生态效率的时空关联及其溢出或收敛特征的基础上,进一步探讨不同时空尺度生态效率的驱动或制约因素就显得极具理论与实践价值。

偏最小二乘回归法(PLS)是基于传统最小二乘法(OLS)改进的新型多元统计分析方法,可对系统信息进行有效分解和筛选,因此适用于多自变量对因变量的回归建模,特别是变量之间存在多重共线性时其可靠性更高^[41]。本文基于区域生态效率与经济社会发展水平及产业结构、产业规模等具有高度相关性的考虑,引入 PLS 模型对驱动或制约中国大陆不同地区生态-经济产出效率空间关联格局的影响因素进行分析:分别以东、中、西部省区的相对生态-经济产出效率 $REEE$ 为自变量,同时参考相关生态效率研究文献所采用的部分评价指标的基础上^[24-29],最终选择经过标准化处理的人均国民生产总值(X01)、外商直接投资额(X02)、进出口总额(X03)、城镇人口比例(X04)、技术市场成交额占 GDP 比重(X05)、单位国土面积内的道路交通里程数(X06)、环境保护与治理资金投入额(X07)、大中专学生人数占地区人口比重(X08)、环境技术效率全局参比(X09)及科技研发投入占 GDP 比重(X10)等 10 个指标为条件变量,从地区经济发展水平(X01)、外资投入(X02)及产业规模(X03)、技术进步(X05、X10)及环境效率因素(X07、X09)、区域本底条件(X04、X06)及文化背景(X08)等几个方面进行回归分析;分析过程通过 SIMCA-P_11.5 软件实现,具体操作步骤请参阅相关文献^[41]。

2 结果分析

2.1 数据来源及有关说明

考虑到数据的可得性以及文章的篇幅所限,本文暂以中国大陆 31 个省区为研究对象就其 2001—2013 年生态效率的时空演变格局及其驱动因素进行实证分析,有关数据来源及说明如表 1 所示:各省区历年人均国

民生产总值、外商直接投资额等影响因素指标 X01—X10 及粮食单产依据国家统计局网站提供的有关数据计算、整理得出;原粮市场价格分别以国家发展和改革委员会网站公布的 2012 年相关省区粮食最低收购价格及原粮市场谷物平均价为基础,结合有关年度物价指数折算得出当年价;土地利用面积以中国统计年鉴公布的 2005—2008 年数据为基础,结合中国国家资源环境遥感宏观调查与动态研究所、中国国土资源统计年鉴(光盘版)等提供的增减变动数据计算整理得出;由于统计数据缺失,研究内容暂未包括香港和澳门特别行政区以及台湾省、南海诸岛等。

表 1 数据来源及说明
Table 1 Data sources and related instructions

数据名称 Data name	单位 Unit	数据来源 Data source	处理说明 Notes
原粮市场平均价格 The average market price of raw grain	万元/t	国家发展和改革委员会网站公告 中国统计年鉴(2002—2014)	粮食主产区以有关年度粮食最低收购价格为基础 ^[42-44] 、其他省区以原粮市场谷物平均价格为基础 ^[45] ,结合历年物价指数(CPI)折算得出 ^[46]
平均粮食单产 The average per unit area yield of grain	t/hm ²	中国统计年鉴(2002—2014)	当年实际值 ^[46] 。
土地面积 Land area	ha	中国统计年鉴(2006—2009) 中国国土资源年鉴、统计年报	以中国统计年鉴公布的 2005—2008 年数据为基础 ^[46] ,结合 2001—2004 年及 2009—2013 年度增减变动数据计算得出 ^[47]
国内生产总值 GDP	万元	中国统计年鉴(2002—2014)	以 2000 年为基期的不变价 ^[46]

东部地区(省区)包括北京、天津、河北、辽宁、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南等 11 省区;中部地区(省区)包括吉林、黑龙江、山西、河南、湖北、湖南、安徽、江西等 8 省区;西部地区(省区)包括内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海、西藏、重庆、四川、贵州、云南、广西等 12 省区。内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁等 4 省区为玉米主产区, P 值以玉米最低收购价格为准;河北、江苏、安徽、山东、河南、湖北等 6 省区为小麦主产区, P 值以小麦最低收购价格为准;江西、湖南、广西、四川 4 省(区)为中晚稻主产区, P 值以中晚稻最低收购价格为准;其他 17 省区 P 值以原粮市场的玉米、小麦、稻米价格的均值为准

2.2 省际生态-经济产出效率的时空演变趋势分析

依据式(1)—(2)及有关数据计算 2001—2013 年中国大陆 31 个省区的生态-经济产出效率及其重心位置、重心移动方向与距离等,结果如图 1(按照三个梯度聚类显示;鉴于研究时段内空间分布格局的演变趋势具有较高连续性,故仅列出了 4 个代表年度)、表 2 所示。

2.2.1 省际生态-经济产出效率的时空分布格局分析

从图 1a 可看出:2001 年大陆东部的北京、天津、河北、辽宁、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东及海南等 11 省区(以下称东部省区)中,除了北京、天津、上海 3 个直辖市的生态-经济产出效率 EEE 高于 10(梯度 I)之外,东部其他 8 省区及黑龙江、吉林、山西、河南、安徽、湖北、湖南、江西等 8 个省区(以下称中部省区)的 EEE 值整体上(除黑龙江之外)处于(1, 10]区间(梯度 II);内蒙古等其余 12 省区(以下称西部省区)的 EEE 值则基本(重庆除外)处于(0, 1]区间(梯度 III)。整体来看,这一时期中国大陆省区的生态-经济产出效率以“胡焕庸线(黑河—腾冲)”为界、呈现比较显著的“东部和中部地区较高(不含东北、西南两翼),西部地区较低”的空间分布格局。

图 1b 显示 2005 年东部非直辖市省区中江苏率先进入生态效率第一集团(梯度 I),西部的陕西、四川、贵州及广西 4 地则升至梯度 II 集团。此后(2009 年,图 1c),山东、浙江、广东以及中部的河南等 4 省区也提升至梯度 I;由于黑龙江的加入,这一时期中部地区仍有 7 地 EEE 值处在(1, 10]区间;而随着云南、宁夏两地加入梯度 II 集团,处于梯度 III 的西部省区在这一时期已减少至 5 个。综合上述结果来看,这一时段内中国大陆的生态-经济产出效率较 2001 年有所提升,在整体保持“东中部地区高-西部地区低”的特征的同时,东北及西南两翼的省际生态效率持续提升,由西向东渐次提高的三级梯度分布格局初具雏形。

从图 1d 可以看出:与 2005、2009 年相比,2013 年中国大陆东、中部省区的 EEE 值继续提升,河北与辽宁

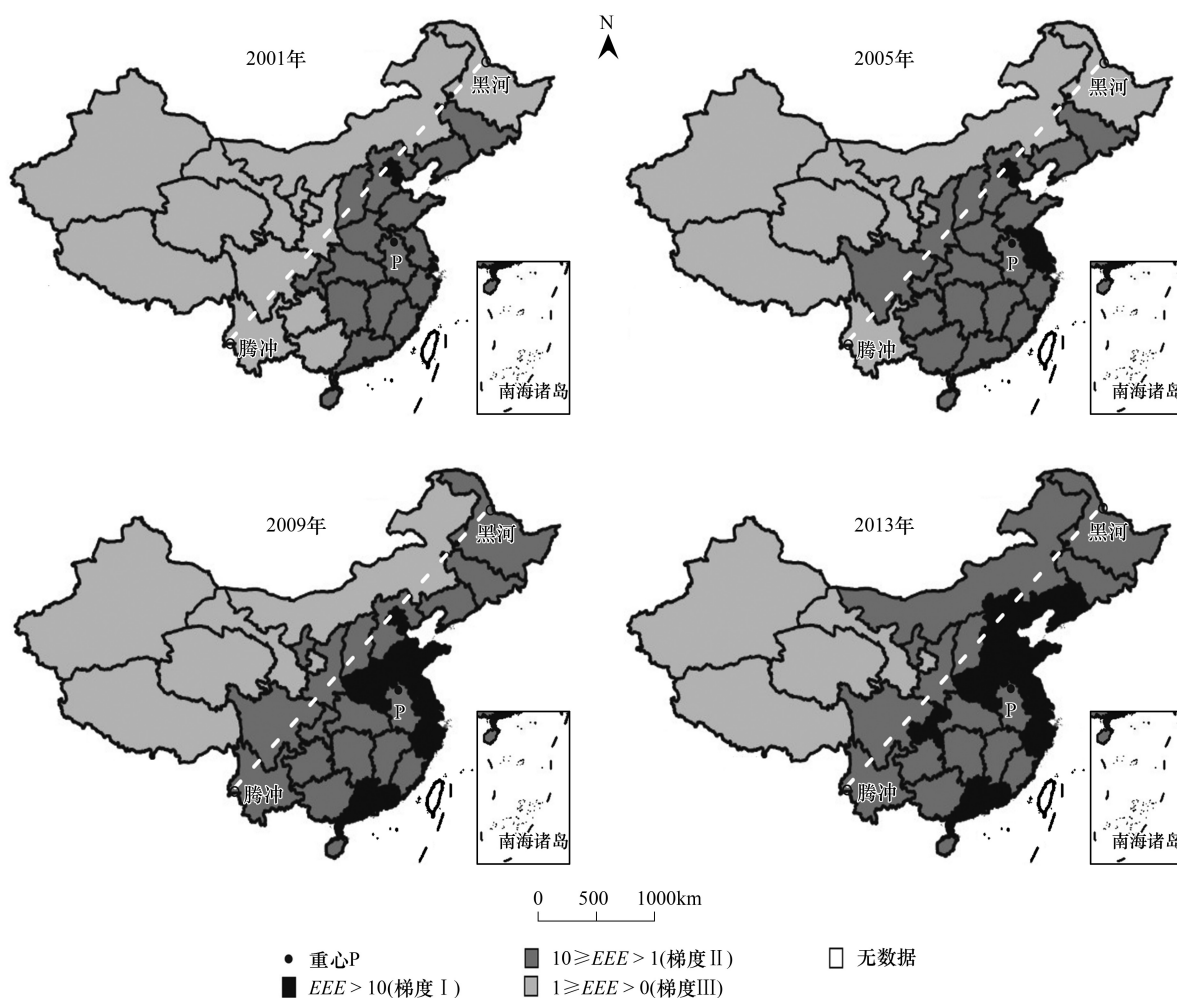


图1 中国大陆省区生态-经济产出效率的时空分布格局(2001—2013年)

Fig.1 Temporal and spatial distribution patterns of eco-economic output efficiency in Chinese mainland

两地进入梯度 I 集团、内蒙古也向上提升一级,促使梯度 II 的范围整体越过“胡焕庸线”,自西向东逐级提升的三级梯度格局基本形成。值得关注的是,这一时期西部的甘肃、青海、新疆、西藏等 4 省区(以下简称“甘肃等西部 4 省区”)生态效率仍未得到有效提升,导致其在整个研究时段内均处于梯度 III 集团。

2.2.2 省际生态-经济产出效率的重心转移路径分析

从表 2 可以看出:研究时段内中国大陆省区生态-经济产出效率 EEE 的重心始终处在东经 116.42° — 116.71° 、北纬 34.35° — 34.54° ($E116^{\circ}25'$ — $E116^{\circ}43'$, $E34^{\circ}21'$ — $E34^{\circ}32'$) 范围之内(图 1a—d,位于安徽省境内)。这一结果表明研究时段内中国大陆省区的生态-经济产出效率重心位置比较稳定、整体移动速度相对缓慢(年均约 3km),与图 1 所隐含的三个梯度格局演变趋势相吻合——研究时段内中国大陆生态效率整体提升,结果趋于均衡。进一步对比表 2 与图 1 可以看出:2001—2006 年中国大陆生态效率重心向北或东北方向移动、整体移动距离仅为 12.05km,2007—2013 年向西或西北方向移动、移动距离为 24.92km;而图 1 显示研究时段内中国大陆省区生态-经济产出效率格局的演变特征存在局部差异:中部省区及甘肃等西部 4 省区提升速度缓慢,东部省区及西部其它 8 省区提升速度相对较快。上述结果表明在东部省区生态效率提升空间逐渐缩小的条件下,未来进一步提高中国大陆生态效率的潜力主要在中、西部尤其是甘肃等西部 4 省区之间,因此进一步分析不同省区生态效率的局部空间关联、进而识别不同梯度内区域生态效率提升的驱动或制约因素,就显得尤为必要。

2.3 省际生态-经济产出效率的空间集聚效应分析

2.3.1 省际生态-经济产出效率的全局空间自相关分析

通过全局空间自相关指数可以识别省区之间生态-经济产出效率的相似程度,有助于从整体上支撑前述中国大陆生态效率时序演变趋势的判断。应用 GeoDa095i 软件得到不同时期 EEE 值的全局空间自相关指数 Moran' I (莫兰指数) 及其显著性水平 (P 值, 采用蒙特卡罗模拟检验) 如表 3 所示 (为进一步提高评价结果的稳健性, 通过 4 种空间权重方案计算)。

表 2 中国大陆省区生态-经济产出效率的重心位置及其移动方向、移动距离 (2001—2013 年)

Table 2 Center of gravity and its moving direction and distance of eco-economic output efficiency in Chinese mainland				
年份 Year	经度 Longitude	纬度 Latitude	方向 Direction	距离 Distance
2001	116.69°	34.35°	—	—
2002	116.69°	34.40°	北	5.14 km
2003	116.71°	34.42°	东北	7.63 km
2004	116.71°	34.43°	北	9.11 km
2005	116.71°	34.44°	北	10.28 km
2006	116.68°	34.45°	东北	11.49 km
2007	116.65°	34.45°	西	12.05 km
2008	116.61°	34.49°	西北	17.95 km
2009	116.6°	34.50°	西北	19.71 km
2010	116.56°	34.50°	西	22.17 km
2011	116.54°	34.51°	西北	24.64 km
2012	116.44°	34.54°	西北	34.77 km
2013	116.42°	34.54°	西	36.97 km

表 3 中国大陆省区生态-经济产出效率的全局空间自相关指数及其显著性检验值

Table 3 Global indicators of spatial autocorrelation and its significance test value of eco-economic output efficiency in Chinese mainland								
年份 Year	方案 Program I		方案 Program II		方案 Program III		方案 Program IV	
	Moran' I	P 值	Moran' I	P 值	Moran' I	P 值	Moran' I	P 值
2001	0.459	0.001	0.437	0.002	0.263	0.001	0.143	0.017
2002	0.452	0.002	0.431	0.004	0.255	0.007	0.137	0.018
2003	0.459	0.002	0.438	0.002	0.261	0.007	0.137	0.019
2004	0.462	0.001	0.441	0.001	0.266	0.008	0.139	0.021
2005	0.474	0.002	0.452	0.001	0.282	0.008	0.145	0.016
2006	0.473	0.001	0.451	0.001	0.279	0.003	0.142	0.021
2007	0.467	0.001	0.445	0.001	0.273	0.008	0.141	0.016
2008	0.489	0.001	0.466	0.002	0.288	0.008	0.147	0.011
2009	0.493	0.001	0.471	0.002	0.288	0.006	0.146	0.018
2010	0.503	0.002	0.481	0.003	0.291	0.004	0.148	0.016
2011	0.517	0.002	0.497	0.001	0.299	0.008	0.153	0.014
2012	0.516	0.003	0.495	0.001	0.294	0.006	0.147	0.022
2013	0.515	0.001	0.494	0.002	0.29	0.009	0.143	0.019
均值	0.483	0.002	0.461	0.002	0.279	0.006	0.144	0.018

方案 I—IV (Program I—IV) 分别代表依据公共边原则 (Rook Contiguity)、公共边或公共点原则 (Queen Contiguity)、多边形原则 (K-Nearest Distance)、距离最小原则 (Threshold Distance) 确定的空间权重方案

从表 3 可以看出, 依据 4 种空间赋权方案得出的中国大陆省区生态-经济产出效率的全局莫兰指数 Moran' I 在整个研究时段内均为正值并且显著水平均在 5% 以上, 表明大陆省区的生态-经济产出效率在考察期内整体具备空间正相关特征, 即生态效率高的省区或生态效率低的省区各自呈现空间集聚特征 (高-高集聚或低-低集聚)。此外, 依据 4 种赋权方案得出的 Moran' I 均值显示: 研究时段内中国大陆省区生态-经济产出

效率空间正相关水平的高低次序为方案 I > 方案 II > 方案 III > 方案 IV; 全局莫兰指数整体介于 0.1—0.5 之间并保持相对稳定, 表明这种高-高集聚或低-低集聚的趋势年际变化相对不大。据此, 可进一步分析个别省区或局部地区生态-经济产出效率提高或降低对其他省区乃至中国大陆整体产生了何种影响, 从而为检验省区之间生态-经济产出效率是否存在溢出效应并为驱动因素识别提供依据。为了提高评价结果的可靠性, 下文依据方案 IV 进行局部空间自相关 (LISA) 分析。

2.3.2 省际生态-经济产出效率的局部空间自相关分析

以经过标准化处理的各个省区有关年度的生态-经济产出效率 (本文中, 即为 *REEE* 值) 为横轴 (X_{2001} 、 X_{2005} 、 X_{2009} 、 X_{2013})、以其空间滞后值 (即由权重方案 IV 决定的与该省区相邻的所有省区 *REEE* 平均值, $W_{X_{2001}}$ 、 $W_{X_{2005}}$ 、 $W_{X_{2009}}$ 、 $W_{X_{2013}}$) 为纵轴构建莫兰散点图, 可以更加清晰地描绘每个省区与周边省区生态-经济产出效率的空间集聚或离散趋势 (第一、第二、第三、第四象限分别对应高-高集聚、低-高集聚、低-低集聚、高-低集聚)。因全局莫兰指数 (表 3) 仅能体现省际生态效率的整体水平差异及其分布特征的稳定性, 所以还需进一步通过局部 Moran 指数分析显著相似省区的空间自相关程度。为此, 应用 GeoDa095i 得出各年度中国大陆 31 个省区在 2001、2005、2009、2013 年四个时期生态-经济产出效率的散点图及其高于 5% 显著性水平的 LISA 集聚图如图 2 所示。

图 2a—d 显示的是在 5% 和 1% 两个显著水平上中国大陆省区生态效率的 LISA 集聚图和散点图。从图 2 右边的散点图可以看出在 2001、2005、2009、2013 年四个时期, 中国大陆生态-经济产出效率的空间负相关省区个数 (第二、四象限) 始终处于 11—14 个之间, 这些省区之间生态-经济产出效率具有比较显著的异质性特征并且数量相对稳定; 空间正相关的省区个数则介于 17—20 之间、高-高集聚的“热点”省区数量 (第一象限) 少于同期低-低集聚的“盲点”省区数量 (第四象限), 并且各时期分属于这两种集聚特征的省区数量也比较稳定。图 2 左边的集聚图显示: 2001 与 2005 年两时期北京、天津、河北、河南、山东、江苏、上海等 7 个省区呈现高-高集聚特征, 2009 年河北从该区域消失; 2001 年青海及四川两省区构成显著的低-低集聚区, 2005 年重庆和广西两地加入其中, 2009 年四川退出, 这三个时期低-低集聚省区尚比较显著 (5%), 2013 年该集团则在整个中国大陆消失; 吉林、山西、湖北、安徽等 4 地构成了 2001 年中国大陆生态-经济产出效率的显著低-高集聚区, 2005 年辽宁加入, 2009 年河北由高-高集聚区转入, 2013 年内蒙古和宁夏两地的加入使得该集团省区个数增至 8 个。此外, 依据权重方案 IV, 新疆因地域面积大所致“邻居较少 (在既定距离阈值上属于“无邻居”省区)”, 因此未予评价; 由于整个研究时段内高-低集聚省区显著水平低 (Not Significant), 在此也不予分析和讨论。

2.4 省际生态-经济产出效率溢出效应的驱动因素分析

对比图 2、图 1 所得结果可知: 在甘肃等西部 4 省区生态-经济产出效率低且提升速度缓慢、中部 8 省区效率较高但提升空间整体缩小的情况下, 东部省区及西部其他 8 省区生态效率得到了有效提升, 尤其是西部其他 8 省区生态效率的持续提升, 促使研究时段内呈显著低-低集聚特征的省区从中国大陆整体消失, 表明这些省区生态效率具有溢出效应。

为了进一步识别促使上述溢出效应产生的驱动因素, 分别以中国大陆东部省区、中部省区、西部省区的相对生态效率 *REEE* 为因变量、以经过标准化处理和共线性诊断的相应年度生态效率影响指标 X_{01} — X_{10} 为自变量构建偏最小二乘回归模型。应用 SIMCA-P 11.5 软件分析得到东、中、西部 3 地区 PLS 模型的主成分个数分别为 2、1、3 个, Q_h^2 值分别为 0.7128、0.8406、0.9774, R^2Y 值分别为 0.8636、0.8836、0.9082——表明经过首次主成分提取的 3 个模型交叉有效性 (Q_h^2 值) 及其对因变量的解释能力 (R^2Y 值) 较高^[41], 各地区 PLS 模型的拟合效果较好 (误差小于 0.5 并且不存在特异点)。据此得出各模型的标准回归系数及自变量投影重要性 (VIP 值), 结果分别如图 3 所示。

从图 3 所示的中国大陆东、中、西部省区相对生态效率的 PLS 模型回归系数 (经归一化处理的标准回归系数) 可以看出: 对各地区相对生态-经济产出效率起正向作用的自变量个数介于 7—8 个之间, 起负向作用的

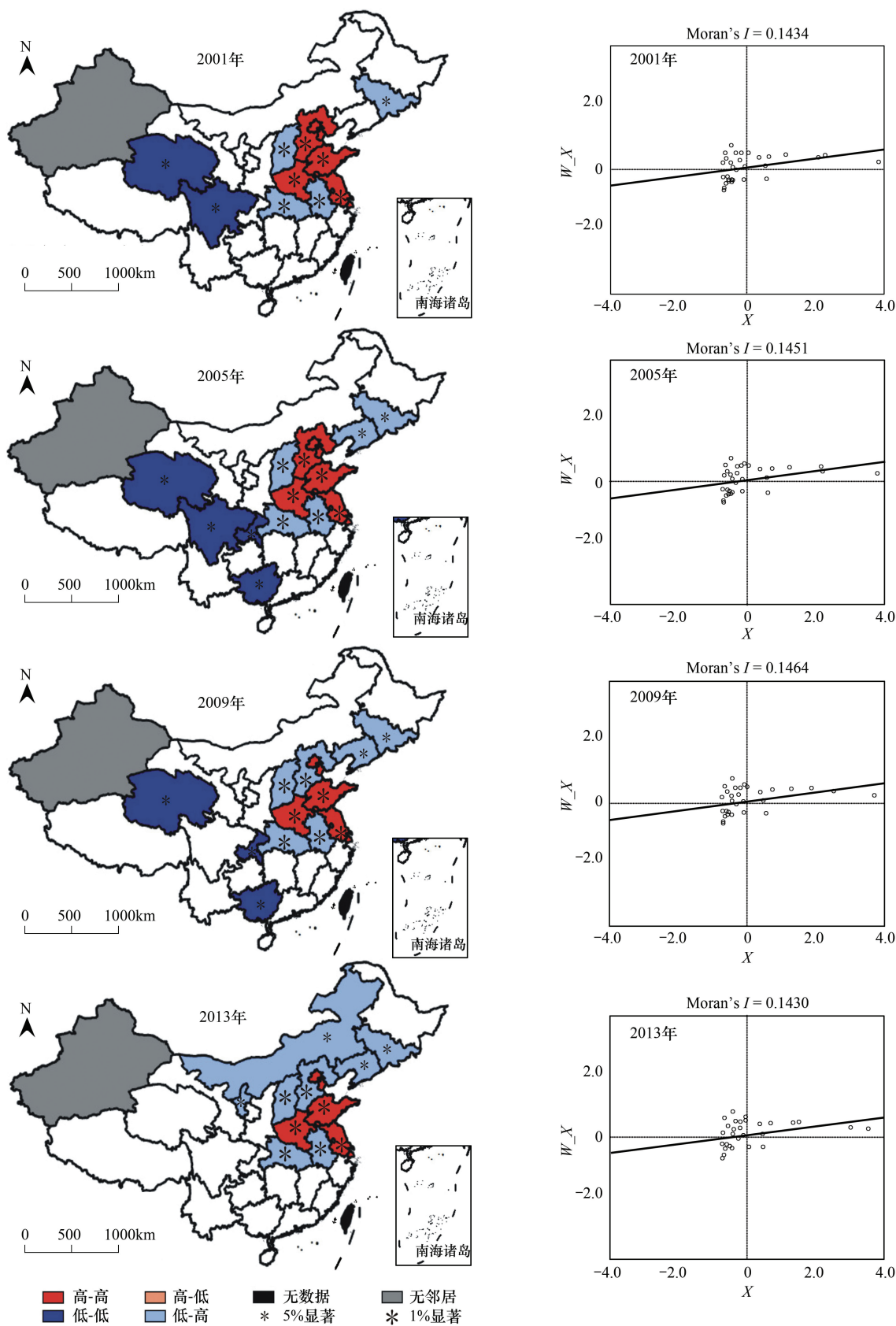


图2 中国大陆省区生态效率的散点图及 LISA 集聚图

Fig.2 The scattered point map and LISA concentration map of ecological efficiency of the provinces in Chinese mainland

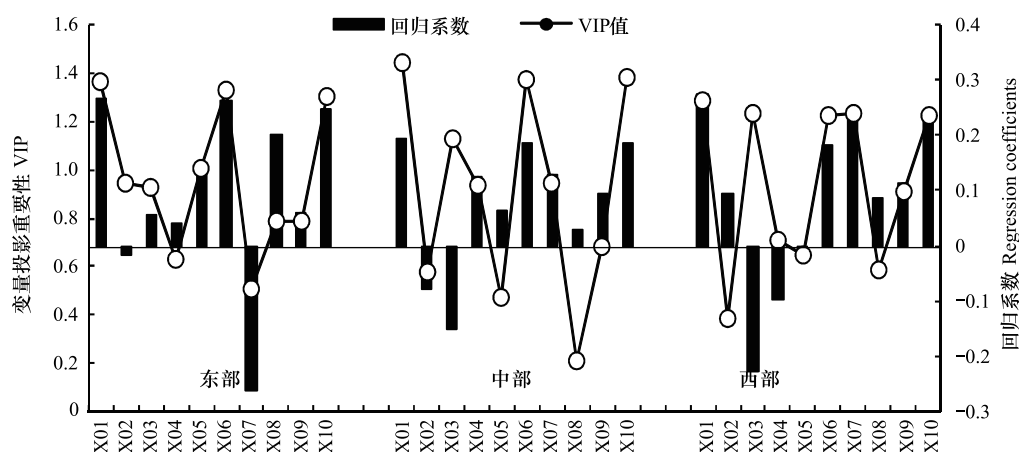


图3 各地区 PLS 模型的标准回归系数及自变量投影重要性

Fig.3 The standard regression coefficient and the independent variable of the projection importance of PLS model

自变量个数为 2—3 个;各地区的指标 X01、X06、X10 的 VIP 值均大于 1,表明人均国民生产总值、单位面积内的道路交通里程以及科研投入占 GDP 的比重等 3 个指标对提高各地区生态-经济产出效率均有重要促进作用,提升这些指标可以显著驱动区域生态效率向周边地区溢出(回归系数为正值),从而带动相邻地区生态效率的提高,因此研究时段内生态效率的低-低集聚区范围逐渐缩小以至消失(图 2)。

除上述共同特征外,图 3 显示部分指标对东、中、西部地区的作用差异也比较明显:东部地区技术市场成交额占 GDP 的比重(X05)显著驱动了区域相对生态效率提高,体现了技术效率因素对该地区的重要作用;而外商直接投资额占 GDP 的比重(X02)及环保资金投入(X07)却对该地区生态效率提升起负作用(回归系数为负值),表明外商直接投资(FDI)可能已经使“污染物避难所”假说在中国东部地区成立^[48],环保资金的大量投入使得经济发展对此类投入产生依赖,反而不利于区域生态效率提升。除了指标 X02 之外,进出口总额(X03)也在一定程度上制约了中部地区相对生态效率的提高,表明以资源消耗为主体的外贸产业结构及 FDI 对该地区生态效率的负面贡献均相对较高,未来应当大力发展先进制造业以逐渐消除结构性污染^[28]。与东部地区相对的是,FDI 和环保资金投入驱动西部地区相对生态效率提高的作用显著,其中后者尤为显著,体现了西部经济发展、生态环境改善对资金的高度依赖,究其原因可能与东、西部地区所处的经济发展阶段差异有关;而除了指标 X03 之外,城镇人口比重(X04)对西部地区相对生态效率的提高亦起负向作用,表明该地区尚处于环境库兹涅茨曲线的上升期、即城市化水平的提高使得区域生态效率相对下降^[27]。

回顾图 1—3 所得结果可以看出:各地区经济社会背景不同、发展阶段各异,因此驱动和制约区域生态效率提高的因素不同,导致研究时段内中国大陆省区生态-经济产出效率呈现由东向西依次降低的三级梯度特征;近年来东部地区生态效率提升缓慢,但其溢出效应已经带动了中西部省区尤其是重庆等西部 8 省区的生态效率持续提升;未来,进一步提升中国大陆地区生态效率的潜力在“胡焕庸线”西北部的省区,但有关地区不宜盲目照搬东、中部的发展经验,应当依据区域自然地理条件及其所处的特定发展阶段,制定因地制宜、因时制宜的生态效率提升策略,以期循序渐进地解决区域人口、资源、环境与发展的矛盾问题。

3 结论与讨论

生态效率是学界聚焦的热点问题,探讨不同时空尺度的生态效率格局、演变趋势及驱动力具有理论意义和现实意义。本文在参考和借鉴有关生态系统服务价值理论研究成果的基础上提出了生态-经济产出效率概念内涵及其表征方法,评价过程中兼顾了经济发展与资源消耗、环境损失代价,因此相对于以往侧重污染物分析的生态效率研究更全面;为了提高评价结果的可靠性,本文引入重心模型分析了 2001—2013 年中国大陆 31 个省区生态-经济产出效率的重心移动方向及其移动距离、通过 4 种空间赋权方法分析了评价单元的全局

空间依赖性,据此分析其时序演变趋势、空间分布格局及其驱动因素,初步得到几点结论如下:

(1)研究时段内中国大陆省际生态-经济产出效率整体提升,自西向东依次提高的三级梯度分布格局基本形成,但中部 8 省区及甘肃、新疆、青海、西藏等西部 4 省区生态效率提升速度相对缓慢,东部省区及西部其它 8 省区提升速度较快。

(2)研究时段内中国大陆省区生态-经济产出效率具有全局空间依赖性和空间正相关特征,而局部分异特征同时存在——显著高-高集聚和显著低-高集聚表现相对稳定,高-低集聚区的生态效率溢出效应促使显著低-低集聚区范围逐渐缩小以至消失。

(3)人均国民生产总值、单位国土面积内的道路交通里程数、科研资金投入占 GDP 的比重等 3 个因素显著驱动了中国大陆省区生态-经济产出效率整体提升;制约各地区生态效率溢出或提升的主要因素不尽相同,东、中、西部地区依次为外商直接投资额和环境保护与治理资金投入额、外商直接投资额和进出口总额、进出口总额和城镇人口比例。

本文以谢高地等提出的中国陆地生态系统服务价值当量因子表为基础计算得出大陆 31 个省区历年生态系统服务价值,与以往的影子工程法、机会成本法等相比,计算过程中分别依据有关省区历年粮食单产、原粮市场价格等参数进行客观核算,可在一定程度上避免不确定性,所得结果与前人同类研究成果比较接近^[49-50],进一步表明该方法具有一定的推广应用价值。需要指出的是:本文将各类土地利用类型统一划分为耕地等 6 类生态系统,实际上并不能涵盖所有生态系统类型;而将不同省区同一生态系统类型的当量因子取等值的处理方法也可能忽略局地生态系统生物量的空间异质性^[51-52],可能由此导致生态-经济产出效率的评价结果与客观事实略有出入,后续研究将持续关注生态系统服务价值评价方法的改进与修正问题。此外,因本文所界定的生态效率内涵、应用的研究方法与以往研究存在差异,加之研究视角、选取的评价指标不同,可能导致得出的生态效率影响因素与以往研究不尽相同——但是这一结果愈加体现了区域生态效率影响因素众多、影响机制复杂的特征,进一步表明应用不同方法、基于不同时空尺度开展多角度生态效率评价研究的必要性。

参考文献 (References):

- [1] Schaltegger S, Burritt R. Contemporary Environmental Accounting: Issues, Concept and Practice. Sheffield: Greenleaf Publishing, 2000.
- [2] 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.
- [3] 尹科, 王如松, 周传斌, 梁菁. 国内外生态效率核算方法及其应用研究述评. 生态学报, 2012, 32(11): 3595-3605.
- [4] WBCSD. Eco-efficiency Leadership for Improved Economic and Environmental Performance. Geneva: WBCSD, 1996.
- [5] Organization for Economic Cooperation and Development. Eco-Efficiency. Paris: OECD, 1998.
- [6] MOLL S, GEE D. Making sustainability accountable; Eco-efficiency, resource productivity and innovation. Proceedings of a Workshop on the Fifth Anniversary of the European Environment Agency (EEA), Copenhagen, 1998: 1-37.
- [7] Nieminen E, Linke M, Tobler M, Beke B V. EU COST Action 628: life cycle assessment (LCA) of textile products, eco-efficiency and definition of best available technology (BAT) of textile processing. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(13-14): 1259-1270.
- [8] Figge F, Hahn T. Sustainable value added—measuring corporate contributions to sustainability beyond eco-efficiency. Ecological Economics, 2004, 48(2): 173-187.
- [9] Kristina D, Paul E. 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.
- [10] Van Caneghem J, Block C, Cramm P, Mortier R, Vandecasteele C. Improving eco-efficiency in the steel industry: the Arcelormittal Gent case. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 807-814.
- [11] Korhonen P J, Luptacik M. Eco-efficiency analysis of power plants: an extension of data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2004, 154(2): 437-446.
- [12] Dyckhoff H, Allen K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 132(2): 312-325.
- [13] Van Middelaar C E, Berentsen P B M, Dolman M A, de Boer I J M. Eco-efficiency in the production chain of Dutch semi-hard cheese. Livestock

- Science, 2011, 139(1/2): 91-99.
- [14] Erkkö S, Melanen M, Mickwitz P. Eco-efficiency in the Finnish EMAS reports—a buzz word? *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(8): 799-813.
- [15] Aoe T. Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(15): 1406-1414.
- [16] 刘晶茹, 吕彬, 张娜, 石焱. 生态产业园的复合生态效率及评价指标体系. *生态学报*, 2014, 34(1): 136-141.
- [17] 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.
- [18] 芮俊伟, 周贝贝, 钱谊, 孙靖. 生态工业园区生态效率评估方法研究及应用. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(4): 466-470.
- [19] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析. *生态学报*, 2013, 33(12): 3837-3845.
- [20] 李健, 邓传霞, 张松涛. 基于非参数距离函数法的区域生态效率评价及动态分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 19-23.
- [21] 张淑英, 李德山, 刘媛媛. 区域工业生态效率评价及其影响因素研究. *统计与决策*, 2013, (3): 61-64.
- [22] 陈作成, 龚新蜀. 西部地区产业系统生态效率测评与影响因素分析. *中国科技论坛*, 2013, (10): 49-55.
- [23] 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000-2006 年省际数据为例. *中国管理科学*, 2008, 16(S1): 566-570.
- [24] 汪克亮, 孟祥瑞, 程云鹤. 技术的异质性、节能减排与地区生态效率——基于 2004—2012 年中国省际面板数据的实证分析. *山西财经大学学报*, 2015, 37(2): 69-80.
- [25] 崔玮, 苗建军, 杨晶. 考虑碳排放的城市非农用地生态效率的实证研究. *系统工程*, 2012, 30(12): 10-18.
- [26] 初善冰, 黄安平. 外商直接投资对区域生态效率的影响——基于中国省际面板数据的检验. *国际贸易问题*, 2012, (11): 128-144.
- [27] 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.
- [28] 潘兴侠, 何宜庆. 中部六省生态效率评价及其与产业结构的时空关联分析. *统计与决策*, 2015, (3): 127-130.
- [29] 潘兴侠. 我国区域生态效率评价、影响因素及收敛性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [30] 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.
- [31] 杨凯, 王要武, 薛维锐. 区域梯度发展模式下我国工业生态效率区域差异与对策. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(12): 3095-3101.
- [32] 王恩旭, 武春友. 基于超效率 DEA 模型的中国省际生态效率时空差异研究. *管理学报*, 2011, 8(3): 443-450.
- [33] Johnston R J, Russell M. An operational structure for clarity in ecosystem service values. *Ecological Economics*, 2011, 70(12): 2243-2249.
- [34] Mäler K G, Aniyar S, Jansson Å. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9501-9506.
- [35] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [36] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46: 234-240.
- [37] Goodchild M F. The validity and usefulness of laws in geographic information science and geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 300-303.
- [38] 杨华, 李小文, 施宏, 赵开广, 韩丽娟. SARS 沿交通线的“飞点”传播模型. *遥感学报*, 2003, 7(4): 251-255.
- [39] 李国平, 王春杨. 我国省域创新产出的空间特征和时空演化——基于探索性空间数据分析的实证. *地理研究*, 2012, 31(1): 95-106.
- [40] 万鲁河, 王绍巍, 陈晓红. 基于 GeoDA 的哈大齐工业走廊 GDP 空间关联性. *地理研究*, 2011, 30(6): 977-984.
- [41] 于松青, 林盛. 基于偏最小二乘回归的山东省电力需求预测分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(2): 14-20.
- [42] 中华人民共和国中央人民政府. 粮食局等部门部署 2012 年玉米和大豆临时收储工作. [2015-07-01]. http://www.gov.cn/gzdt/2012-11/21/content_2271750.htm.
- [43] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 关于印发 2012 年小麦最低收购价执行预案的通知. [2015-07-01]. http://www.gov.cn/zwggk/2012-05/24/content_2143976.htm.
- [44] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 关于印发 2012 年中晚稻最低收购价执行预案的通知. [2015-07-01]. http://www.gov.cn/gzdt/2012-09/04/content_2216235.htm.
- [45] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 7 月国内市场粮食价格. 国家发改委网站, [2015-07-01]. http://www.gov.cn/zfjg/content_726858.htm.
- [46] 中国国家统计局. 2002—2011 年中国统计年鉴. 国家统计局网站, [2015-07-01]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>.
- [47] 中华人民共和国国土资源部. 中国国土资源统计年鉴. 北京: 地质出版社, 2012.
- [48] 苏桔芳, 廖迎, 李颖. 是什么导致了“污染天堂”: 贸易还是 FDI? ——来自中国省级面板数据的证据. *经济评论*, 2011, (3): 97-104, 116-116.
- [49] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. *科学通报*, 2000, 45(1): 17-22.
- [50] 郑德凤, 臧正, 赵良仕, 孙才志. 中国省际资源环境成本及生态负荷强度的时空演变分析. *地理科学*, 2014, 34(6): 672-680.
- [51] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. *资源科学*, 2001, 23(6): 5-9.
- [52] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.