

郭付友, 佟连军, 李平, 等. 效率演化视角下吉林省松花江流域产业系统环境适应性研究[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1681-1689. [Guo Fuyou, Tong Lianjun, Li Ping et al. Environmental Adaptability of Industrial System in the Songhua River Basin of Jilin Province from the Perspective of Efficiency Evolution. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1681-1689.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.10.012

# 效率演化视角下吉林省松花江流域 产业系统环境适应性研究

郭付友<sup>1</sup>, 佟连军<sup>2</sup>, 李平<sup>2,3</sup>, 张慧敏<sup>2</sup>, 张春丽<sup>2</sup>

(1. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照 276800; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;  
3. 吉林省社会科学院, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 基于效率演化视角与适应性分析范式, 综合采用投入导向生产规模报酬可变的 VRS 模型, 对吉林省松花江流域产业系统环境适应性时空分异特征与影响因素进行了研究, 结果发现松花江流域产业系统: ① 现状格局特征分析反映出吉林省松花江流域各县市尚处于规模扩张与总量增长阶段, 仍有众多县市尚未达到最优规模阶段, 在未来一段时间内, 规模集聚仍是产业或经济发展的主流; ② 时序演化特征分析反映出吉林省松花江流域产业生态化发展迟缓, 产业规模扩张仍是效率提升的关键所在, 科学技术尚未发挥出其应有作用; ③ 空间分异特征分析, 综合效率与规模效率较高的县市不断向流域中上游地区聚集, 纯技术效率主要集中于中下游地区, 综合效率的提升主要由于规模效率的增加, 纯技术效率对其作用不明显; ④ 区位条件、路径依赖效应、经济发展水平以及科学技术因素是影响吉林省松花江流域产业系统环境适应性的重要因素。

**关键词:** 产业系统; 适应性; 路径依赖; 松花江; 吉林省

**中图分类号:** K902      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2018)10-1681-09

人地关系地域系统一直是地理学关注的核心问题, 如何在地理学视角下揭示“人-地”要素相互作用机理, 实现人地关系和谐统一, 已成为未来地理学研究的关键核心问题<sup>[1-3]</sup>。产业是人地关系地域系统最重要的结合点, 更是连接经济活动与生态环境最主要界面, 在经济系统方面, 产业系统是各种生产要素的“资源转换器”, 在环境系统方面, 产业系统是各种污染物类型和规模的“控制体”<sup>[4,5]</sup>, 由此, 研究产业系统与生态环境系统的相互作用关系, 是人地关系地域系统研究的有益补充与深化。

适应性研究从理论介绍和方法选择等视角为产业系统与生态环境的耦合关系特征、时空作用机理等方面提供了一个新的研究范式, 研究产业生态系统的区域适应性, 探索其适应性过程-格

局-机理, 是地理学、经济学以及社会科学等领域研究的前沿方向和热点问题。目前对于适应性研究主要集中于以下方面: ① 适应性内涵解析。普遍认为适应性是系统应对全球环境变化而采取趋利避害的行为<sup>[6]</sup>, 是系统调整行为和系统特征<sup>[7]</sup>, 是保证系统生存、发展和演化的能力<sup>[8]</sup>, 适应的核心是趋利避害<sup>[9,10]</sup>; ② 适应性评价体系与理论模型构建。Klein 认为适应性评价包括敏感性、脆弱性以及弹性分析<sup>[11]</sup>。Tol 提出了适应性成本评估模型<sup>[12]</sup>。Lobell<sup>[13]</sup>、Misra<sup>[14]</sup>、Banerjee<sup>[15]</sup>对适应策略的原则和模型进行了解释。国内研究倾向于从要素组成对其评价分析<sup>[16,17]</sup>; ③ 适应性绩效评价研究。集中于适应性时空演变<sup>[18,19]</sup>、影响因素<sup>[20,21]</sup>等方面。总体而言, 对于适应性研究成果也较为丰富, 研究尺度涉及全国<sup>[22,23]</sup>、省<sup>[24,25]</sup>、市<sup>[26]</sup>等多个尺度。但现有研

**收稿日期:** 2017-08-28; **修订日期:** 2017-11-03

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41471110, 41771138, 41801105)、山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2018BD002)、山东省社会科学规划研究项目(18DJJJ14)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41471110, 41771138, 41801105), Natural Science Foundation of Shandong (ZR2018BD002), Social Science Planning Research Project of Shandong (18DJJJ14).]

**作者简介:** 郭付友(1987-), 男, 山东菏泽人, 讲师, 博士, 主要从事区域地理研究。E-mail: guofy945@nenu.edu.cn

**通讯作者:** 佟连军, 研究员。E-mail: tonglj@neigae.ac.cn



或服务对于环境的干扰程度,侧重于增强产品的经济属性,将工商业的发展置于社会可持续发展大框架下演化进程之中,为工商业的可持续发展提供了有效的分析方法。适应性效率作为区域产业生态化以及经济可持续发展的度量标尺,一方面强调了产业生态系统的投入产出能力,以最小成本投入达到产业生态系统经济环境效益的帕累托最优。另一方面强调资源消耗少、环境影响小的生态效率产品,符合产业系统环境适应性转型以及可持续发展的要求。总体而言,适应性效率反映了经济规模增长与环境压力的双向演化关系,是产业系统环境适应能力的重要体现。运用适应性效率测度模型开展产业系统环境适应性的研究,将外部环境成本纳入区域产业发展系统,实现产业发展外部成本内部化,有利于客观体现与评估产业发展真实成本,符合市场条件下资源最优配置理论。

基于以上分析,论文采用数据包络分析法评估吉林省松花江流域产业系统环境适应性效率问题。数据包络分析法主要基于多项投入指标与多项产出指标,利用线性规划的方法对具有可比性的同类型单元进行有效评价的一种数量分析方法,能够有效避免权重设定时存在的主观因素,自1978年美国著名统计学家Charnes等人提出以来被广泛应用于不同行业与部门效率的测度。将DEA模型引入产业生态领域,研究吉林省松花江流域产业生态系统投入与产出的相对有效性,本文利用Deap2.1软件计算综合效率、纯技术效率和规模效率,具体计算步骤详见参考文献<sup>[29,30]</sup>。综合效率值越趋近于1,说明在技术保持相对稳定前提下评价单元能够实现的相对最大产出水平。反之则说明在给定的投入水平下实际产出与最佳前沿面存在较大的差距。综合效率值是纯技术效率值和规模效率值的乘积,纯技术效率则为最优规模水平下评价单元最大化产出下所需要最小成本,若其等于1则说明评价单元在技术层面有效,反之则说明处于投入冗余和产出不足情况。规模效率则为产出水平最大化下技术效率生产边界的投入要素和最优规模下的投入要素比值,若其等于1则说明规模处于最优状态,反之则表明评价单元需要进行帕累托改进。

### 1.3 指标选取与数据来源

产业系统环境适应性主要研究产业发展与资

源环境相互作用、相互影响的互动关系,产业发展通过资源输入与废弃物排放直接影响生态环境,生态环境的负反馈机制反作用于产业发展。由此在投入指标方面选取工业二氧化硫排放量和全社会用电量表征产业发展对生态环境的污染,以及产业发展对资源环境的消耗情况;在产出指标方面选取人均GDP和污水处理厂集中处理率表征研究区域经济发展与生态环境治理情况。

本部分主要以吉林省松花江流域县域单元为研究对象,论文所需的资源环境及经济发展数据均来源于2014~2015年《吉林统计年鉴》<sup>[31]</sup>以及2014~2015年《中国县域统计年鉴》<sup>[32]</sup>,论文研究时限为2a主要由于2013年以前的《吉林统计年鉴》并没有县域单元尺度下资源环境消耗以及生态环境影响的统计数据。

## 2 测度结果分析

### 2.1 流域产业系统环境适应性效率现状评价特征

由表1知,2013年研究区域综合效率一般,尚未达到理想状态,有47.62%的县市未超过综合效率平均值0.661。仅有蛟河市、舒兰市、长岭县、乾安县以及通榆县等县市为DEA有效,仅占研究区域23.81%,其余县市均为DEA无效,说明在给定的资源投入与环境影响下,仅有少数县市实现了产出的最大化,多数县市的实际产出与最佳前沿面之间仍有相当程度的差距。

纯技术效率有效的县市为9个,说明有42.86%的县市处于纯技术效率前沿,显著高于综合效率有效的县市(5个)。但纯技术效率平均值仅为0.775,并且纯技术效率标准差为0.284,纯技术效率最大值是最小值的3.88倍,说明吉林省松花江流域各县市纯技术效率差距较大,有较大的提升空间。规模效率有效的县市有5个,与综合效率有效的县市完全一致,并且呈现规模报酬不变的特征,说明这5个县市已经达到规模最优,对资源的有效利用率较高。虽然长春市区、永吉县以及前郭县均为纯技术效率有效,但因规模效率未能达到有效从而导致综合效率无效,因此规模效率成为影响综合效率的主要因素。有12个县市规模效率高于平均值0.855,标准差为0.199,说明各县市规模效率存在较为明显的空间差异性。

由表1知,2014年研究区域有13个县市超过综合效率平均值0.694,占流域县市61.9%,但仍有



表1 2013~2014年吉林省松花江流域各县市效率值

Table 1 The efficiency values of counties in the Songhua River Basin of Jilin Province from 2013 to 2014

名称	综合效率		纯技术效率		规模效率		规模报酬	
	2013年	2014年	2013年	2014年	2013年	2014年	2013年	2014年
九台市	0.31	0.326	0.311	0.328	0.996	0.994	irs	irs
农安县	0.242	0.338	0.258	0.38	0.939	0.889	irs	drs
榆树市	0.376	0.346	0.479	0.476	0.784	0.726	drs	drs
德惠市	0.414	0.335	0.442	0.345	0.937	0.972	irs	irs
长春市区	0.546	0.933	1	1	0.546	0.933	drs	drs
永吉县	0.794	0.818	1	0.864	0.794	0.946	drs	irs
蛟河市	1	1	1	1	1	1	-	-
桦甸市	0.463	0.63	0.552	0.888	0.839	0.71	drs	drs
舒兰市	1	0.904	1	0.976	1	0.926	-	irs
磐石市	0.225	0.32	0.367	0.331	0.615	0.968	drs	drs
吉林市区	0.753	0.958	0.943	1	0.798	0.958	drs	drs
前郭县	0.222	0.217	1	1	0.222	0.217	drs	drs
长岭县	1	0.968	1	1	1	0.968	-	drs
乾安县	1	1	1	1	1	1	-	-
扶余市	0.988	1	1	1	0.988	1	drs	-
松原市区	0.908	0.868	0.912	0.929	0.996	0.934	drs	drs
镇赉县	0.812	0.816	0.819	0.817	0.992	0.998	irs	irs
通榆县	1	1	1	1	1	1	-	-
洮南市	0.318	0.325	0.36	0.368	0.884	0.882	irs	irs
大安市	0.85	0.736	0.913	0.761	0.931	0.968	irs	irs
白城市区	0.651	0.734	0.925	0.909	0.704	0.808	irs	irs
平均值	0.661	0.694	0.775	0.78	0.855	0.895		

注:irs:规模报酬递增;drs:规模报酬递减;-:规模报酬不变。

38.1%的县市处于平均值以下,反映流域综合效率整体与理想状态之间尚有一定差距。蛟河市、乾安县、通榆县以及扶余市均为DEA有效,仅占研究区域19.05%,其余县市均为非DEA有效。一方面反映了流域各县市综合效率存在显著的空间差异性,另一方面也说明了东北老工业基地随着资源趋于枯竭,经济发展迟缓,在现有技术得不到大幅度改进以及缺少资金政策扶持情况下,流域各县市产出效益达不到帕累托最优。

2014年纯技术效率有效的县市为8个,仅占流域县市38.1%,与2013年相比,纯技术效率有效的县市有所减少,反映了长期东北振兴战略尚未改变体制与结构性矛盾,技术效率未能得到根本性提升,并且2014年以来东北地区再次衰落,面临再振兴的发展局面。规模效率有效的县市有4个,超过规模效率平均值的县市有15个,且与纯技术效率相比,规模效率平均值显著高于纯技术效率,由

此反映出研究区域各县市尚处于规模扩张与总量增长阶段,并且仍有众多县市尚未达到最优规模阶段,在未来一段时间内,规模集聚仍是产业或经济发展的主流。

## 2.2 流域产业系统环境适应性效率时序演化特征

从效率平均值变化特征分析(表1),2013~2014年吉林省松花江流域效率值有所提升,但提升幅度不大,综合效率、纯技术效率以及规模效率增长率分别仅为4.99%、0.65%以及4.68%,由此反映出研究区域产业生态化发展迟缓,产业规模扩张仍是效率提升的关键所在,科学技术尚未发挥出应有作用。

对于综合效率而言,有11个县市有所上升,而有7个县市有所下降;对于纯技术效率而言,有6个县市有所上升,而有8个县市处于改进状态;对于规模效率而言,处于上升和下降状态的县市均为9个。以上分析反映了研究区域产业发展状态

不佳,区域发展极化现象有所增强,一方面由于在目前经济发展阶段下,研究区域仍然依赖于出口和投资的拉动作用,内生驱动作用不足。另一方面东北老工业基地长期形成的重型化产业结构,资源型产业较为发育,产业发展的“轻”与“清”型化并不突出,导致了产业生态化发展举步维艰。

根据边际报酬递减规律,通过要素投入驱动经济增长的潜力是有限的,而研究区域资源不断趋于枯竭,也会直接影响产业高级化与生态化发展。同时生态经济若缺少规模支撑,也会直接影响资源利用效率与废物资源化。由此可见,提升研究区域技术水平,增强产业发展的核心竞争力,进而提高研究区域技术效率与规模效率是吉林省松花江流域产业系统环境适应性调整的关键所在。

### 2.3 流域产业系统环境适应性效率空间分异特征

为了揭示研究区域各县市效率的空间分异格局特征,利用2013年和2014年流域各县市综合效率、纯技术效率以及规模效率,在ArcGIS10.1中对流域各县市效率进行空间可视化处理,将全流域县市分为4个等级,并绘制空间等级分布图(图2)。

由图2可知,综合效率较高的县市不断向流域中上游地区聚集,尤其是长吉市区及其周围区域,说明这些地区经济具有一定的基础,产业生态化得到了相当程度的发展。一方面由于这些县市交通区位优势明显,长春市作为吉林省省会城市,位

于东北地区几何中心,水陆空立体交通较为发达;吉林市作为吉林省第二大城市,也是东北重要的交通枢纽城市。另一方面这些县市工业经济起步发展较早,在资源需求、市场竞争、技术革新以及人才吸引等方面比其他区域优势明显,产业生态化发展的多元驱动现象明显,生态经济发展的阻力较小。

流域纯技术效率主要集中于中下游地区,尤其是松原地区的前郭尔罗斯蒙古族自治县、乾安县、长岭县以及扶余市,主要由于2006年以来松原市加大了对产业调控力度,充分发挥农业资源以及旅游资源的优势,大力发展第三产业,并且第二产业不断向精细化方向发展,生物化工、农畜产品深加工以及旅游等产业不断兴起并快速发展,产业生态化水平得到了有效提高。中上游地区纯技术效率的波动性有所增加。而流域规模效率较高的县市不断向中上游地区聚集,由此也反映了中上游地区综合效率的提升主要是由于规模效率的增加,纯技术效率对其作用不明显。

## 3 产业系统环境适应性效率影响因素分析

### 3.1 区位条件因素

区位是指一个地区所处的地理位置与交通信

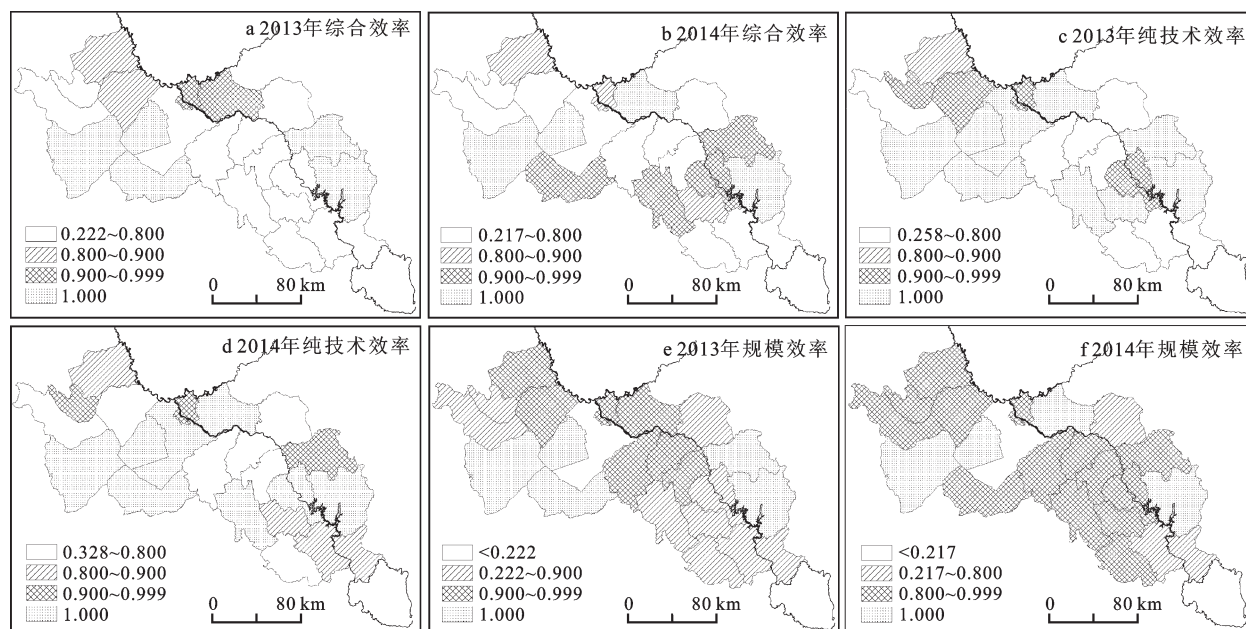


图2 2013和2014年研究区域各县市综合效率、纯技术效率与规模效率空间分异

Fig.2 The spatial division of comprehensive efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency of counties in study area in 2013 and 2014

息条件<sup>[33]</sup>,直接影响区域产业发展与空间布局。地理位置与交通信息条件优越的区域,易于形成以加工工业为主的中轻型产业结构,同时区域之间经济联系比资源密集型地域密切,大部门系统内部的生产联系比部门间的生产联系密切。长春位于东北亚经济圈几何中心、重要的交通枢纽,东北地区“丰”字形城市空间发展格局的重要节点。研究区域上游长吉地区已经形成了汽车、石油化工、冶金建材、农产品加工、光电子、装备制造、新材料以及生物医药等八大新型产业,并且处于由规模扩张向内涵提升,由要素驱动向投资驱动与创新驱动方向发展,促进长吉地区由加工区向制造区、创造区乃至服务区方向的转变。而白城市深居内陆,交通不便,且地处西部“三化”严重地区,由此决定了产业发展规模弱小,难以形成集聚经济与规模经济,产业生态系统发育程度相对不足,区域发展可能走向“孤立发展”与“被边缘化”的深渊。由此可见,区位发展条件的差异直接带来经济发展模式、产业发展类型以及经济地域发展阶段的不同,直接影响区域产业系统环境适应性效率的演化发展。

### 3.2 路径依赖效应因素

路径依赖是指人类社会在技术演进或制度变迁过程中,一旦进入某种路径就可能对这种路径产生依赖<sup>[34]</sup>,强调了系统正负反馈的时间“滞后”作用因素。吉林省松花江流域最初作为国家重工业优先发展地区,重型化以及资源型产业的进入与不断强化,一定程度上主导了研究区域产业生态系统的形成演化。由于重型化产业发展速度与效益不断增加,吸引各种生产要素与生产部门不断汇聚,在循环累积与收益递增机制作用下导致产业结构重型化自我增强,形成了以资源型产业以及传统重型工业为主导的产业生态系统,非资源型产业以及轻工业发展弱小,为产业生态系统提供维护与服务的共生系统发育迟缓,因重型工业的规模扩张与总量增长,整个产业生态系统趋于稳定发展时期。由于长时期的重型化产业发展战略盛行,吉林省松花江流域产业生态系统普遍陷入畸形结构的锁定状态,这种模式的路径依赖已经成为流域产业系统环境适应性优化改善的阻碍制约因素,需要引入外部变量与外生效应,实现产业生态系统结构重组与功能优化。

### 3.3 经济发展水平因素

新中国成立之后研究区域经济迎来了快速发

展时期,以重工业为主体奠定了上游地区重型化产业结构体系,并且上游地区与中下游地区经济发展呈现空间分异态势。20世纪90年代初期以来,在东北现象作用下虽然长吉区域经济发展出现了短暂回落,但其仍是影响流域经济发展的绝对力量。2003年以来东北振兴战略的提出促使研究区域经济发展呈现快速发展态势与百花齐放格局特征。2003~2014年间长春市、吉林市、松原市以及白城市GDP年均增长率分别高达13.41%、15.05%、20.05%以及18.10%,下游地区松原市与白城市经济发展显著快于上游地区,上游经济发展的扩散效应开始增强,上下游地区经济发展的空间分异现象一定程度上将会缩小。另外经济发展的规模扩张与集聚增长促进规模效应与集聚效应作用的发挥,并不断改善生产技术与治污排污设施建设和完善。同时经济发展水平的不断提高,促使了生活水平的不断提升,人们快速增长的物质需求也会促进工业生产规模的扩大、生产工业技术的提升以及生产效率的提高,在满足日益增长的物质文化需求之后,居民对环境质量的要求也会越来越高,由此促进了产业系统环境适应性效率优化提升。

### 3.4 科学技术因素

科技进步不仅可以创建高效的产业和产业部门,而且还可以采用新的工业技术装备改造原有产业,不断促进产业结构优化升级。另外科技进步不仅可以促进企业清洁生产,延伸产业链,促进资源利用效率,而且还可以末端治理污染,减少对环境的污染与破坏<sup>[35]</sup>。吉林省松花江流域中上游地区长春市和吉林市科技条件优越,有吉林大学、东北师范大学、中科院光机所、中科院应化所、中科院东北地理所以及北华大学与东北电力大学等众多的高校与科研院所,为社会经济发展与产业结构转型升级提供了重要的驱动力。2001~2014年长春市万人科学技术人员数与从事科学研究与技术服务人员数分别是松原市和白城市的10.23倍与11.63倍,长吉二市是松白二市的6.95倍。从年均增长率分析,吉林市、长春市、松原市、白城市以及吉林省松花江流域分别为7.12%、12.62%、0.87%、0.49%以及7.02%,由此可见,吉林省松花江流域上游地区科技资源条件优越,远远高于中下游松原市和白城市,科技条件的区域差异性导致产业系统环境适应性的空间分异性,而整个流域科技条件



的稳步提升又促进了流域产业系统环境适应性的不断提高。

## 4 结论与讨论

1) 从适应性效率现状格局特征分析,流域综合效率与理想状态之间尚有一定差距,说明在给定的资源投入与环境影响下,仅有少数县市实现了产出的最大化,多数县市的实际产出与最佳前沿面之间仍有相当程度的差距,在现有技术得不到大幅度改进情况下,流域各县市产出效益达不到帕累托最优。规模效率平均值显著高于纯技术效率反映出研究区域尚处于规模扩张与总量增长阶段,仍有众多县市尚未达到最优规模阶段,在未来一段时间内,规模集聚仍是产业或经济发展的主流。

2) 从适应性效率时序演化特征分析,综合效率、纯技术效率以及规模效率增长率分别仅为4.99%、0.65%以及4.68%,反映出东北地区尚未解决产业发展的体制与结构性矛盾,研究区域产业生态化发展迟缓,产业规模扩张仍是效率提升的重要驱动力,科学技术尚未发挥出应有作用。由此可见,提升研究区域技术水平,增强产业发展的核心竞争力,提高研究区域技术效率与规模效率是吉林省松花江流域产业系统环境适应性效率提升的关键所在。

3) 从适应性效率空间分异特征分析,综合效率较高的县市不断向流域中上游地区聚集,流域纯技术效率主要集中于中下游地区,而流域规模效率较高的县市不断向中上游地区聚集。由此反映出研究区域中上游地区综合效率的提升主要是由于规模效率的增加,纯技术效率对其作用不明显。

4) 区位条件、路径依赖效应、经济发展水平以及科学技术因素是影响产业系统环境适应性的重要因素,区位条件因素通过影响经济发展模式、产业发展类型以及经济地域发展阶段发挥作用,路径依赖效应导致产业系统环境适应性具有显著的继承性特征,经济发展水平通过集散效应发挥、生产工艺改进以及精神文化需求等发挥作用,科技进步因素通过高效产业部门构建、新工艺技术运用、产业链不断延伸、污染物防治与治理等发挥作用。

流域产业系统环境适应性研究就是要改变传统的产业系统与生态环境系统之间简单的物质能量传递流动的线性关系,最终目的是建立产业系

统与环境系统协调发展、和谐共生的流域产业生态系统。但由于流域资源禀赋差异、流域发展阶段不同以及流域产业分工各异等造成了流域产业系统环境适应性分异现象显著。加强流域产业分工转移与增强区域联系,同时打破区域锁定效应与增强要素区际流动也是改变流域产业系统环境适应性效率俱乐部收敛特征的重要举措。本文学术贡献主要在于突破了以往单纯依赖于要素属性分析,采用效率演化视角下科学揭示了适应性发展状态及预测其以后发展趋势,对适应性研究进行了有益补充。迫于数据所限研究时限仅为2 a,未来需要长时限历时态分析。同时流域产业系统环境适应性时序演化是多种因素综合作用的结果,对其分析时需要综合考虑多方面因素制约与数据支撑。针对上述问题,有待以后进行深入探讨。

## 参考文献(References):

- [1] 吴传钧.论地理学的研究核心——人地关系地域系统[J].经济地理, 1991, 11(3): 1-6.[Wu Chuanjun. The core of geography: man-earth areal system. Economic Geography, 1991, 11(3): 1-6.]
- [2] 樊杰.“人地关系地域系统”学术思想与经济地理学[J].经济地理, 2008, 28(3): 177-183.[Fan Jie. Scientific thought of man-earth areal system and economic geography. Economic Geography, 2008, 28(3): 177-183.]
- [3] 陆大道,郭来喜.地理学的研究核心: 人地关系地域系统[J].地理学报, 1998, 53(2): 97-105.[Lu Dadao, Guo Laixi. The research core of geography: man-earth areal system. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(2): 97-105.]
- [4] 任建兰,张淑敏,周鹏.山东省产业结构生态评价与循环经济模式构建思路[J].地理科学, 2004, 24(6): 648-653.[Ren Jianlan, Zhang Shumin, Zhou Peng. An ecological appraisal of industrial structure and a thoughtfulness of designing models of circle economy in Shandong province. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(6): 648-653.]
- [5] 刘文新,张平宇,马延吉.资源型城市产业结构演变的环境效应研究——以鞍山市为例[J].干旱区资源与环境, 2007, 26(2): 18-21. [Liu Wenxin, Zhang Pingyu, Ma Yanji. Environmental effects of industrial structure evolution of resource-based city: A case study of Anshan city. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 26(2): 18-21.]
- [6] Schipper E L F. Conceptual history of adaptation to climate change under the UNFCCC[J]. Review of European Community and International Environmental Law, 2006, 15(1): 82-92.
- [7] Brooks N, Adger W N, Kelly P M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation[J]. Global Environmental Change, 2005, 15: 151-163.

- [8] 方修琦,殷培红.弹性、脆弱性和适应——IHDP三个核心概念综述[J].地理科学进展, 2007, 26(5): 11-22.[ Fang Xiuqi, Yin Peihong. Review on the three key concepts of resilience, vulnerability and adaptation in the research of global environmental change. Progress in Geography, 2007, 26(5): 11-22.]
- [9] 陈宜瑜.对开展全球变化区域适应研究的几点看法[J].地球科学进展, 2004, 19(4): 495-459.[Chen Yiyu. Some opinions on the study of regional adaptation to global change. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 495-459.]
- [10] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006, 16: 282-292.
- [11] Klein R J T, Nicholls R J. Assessment of coastal vulnerability to climate change[J]. Ambio, 1999, 28(2): 182-187.
- [12] Tol R S J, Fankhauser S, Smith J B. The scope for adaptation to climate change: what can we learn from the impact literature [J]. Global Environmental Change, 1998, 8(2): 109-123.
- [13] Lobell D B, Howden S M, Smith D R et al. A meta-analysis of yield under climate change and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(4): 287 - 291.
- [14] Misra A K. Climate change impact, mitigation and adaptation strategies for agricultural and water resources, in Ganga Plain (India) [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2013, 18(5): 673-689.
- [15] Banerjee R R. Farmers' perception of climate change, impact and adaptation strategies: A case study of four villages in the semi-arid regions of India[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2829-2845.
- [16] 仇方道,佟连军,姜萌.东北地区矿业城市产业生态系统适应性评价[J].地理研究,2011,30(3): 243-255.[Qiu Fangdao, Tong Lianjun, Jiang Meng. Adaptability assessment of industrial ecological system of mining cities in Northeast China. Geographical Research, 2011, 30(3): 243-255.]
- [17] 郭付友,佟连军,魏强,等.吉林省松花江流域产业系统环境适应性时空分异与影响因素[J].地理学报, 2016,71(3): 459-470. [Guo Fuyou, Tong Lianjun, Wei Qiang et al. Spatio-temporal difference and influencing factors of environmental adaptability assessment of industrial system in the Songhua River Basin of Jilin Province. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 459-470.]
- [18] 徐成龙,庄贵阳.供给侧改革驱动中国工业绿色发展的动力结构及时空效应[J].地理科学, 2018, 38(6): 849-858. [Xu Chenglong, Zhuang Guiyang. Dynamic structure and spatio-temporal effect of supply-side reform on industrial green development in China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 849-858.]
- [19] 李博,张志强,苏飞,等.环渤海地区海洋产业生态系统适应性时空演变及影响因素[J].地理科学, 2017, 37(5):701-708.[Li Bo, Zhang Zhiqiang, Su Fei et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of marine industrial ecosystem adaptability in the Bohai Sea region. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5):701-708.]
- [20] 任嘉敏,马延吉.东北老工业基地绿色发展评价及障碍因素分析[J].地理科学,2018,38(7):1042-1050. [Ren Jiamin, Ma Yanji. Green development level and the obstacle factors of old industrial base in Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7):1042-1050.]
- [21] 李博,史钊源,韩增林,等.环渤海地区人海经济系统环境适应性时空差异及影响因素[J].地理学报,2018,73(6):1121-1132. [Li Bo, Shi Zhaoyuan, Han Zenglin et al. Spatio-temporal difference and influencing factors of environmental adaptability measurement of human-sea economic system in Bohai Rim region. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(6):1121-1132.]
- [22] 吴绍洪,尹云鹤,赵慧霞,等.生态系统对气候变化适应的辨识[J].气候变化研究进展,2005,1(3):115-118.[Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zhao Huixia et al. Recognition of ecosystem response to climate change impact. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(3): 115-118.]
- [23] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等.气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适应[J].气候变化研究进展,2006,2(2):51-56.[Lin Erda, Xu Yinlong, Jiang Jinhe et al. National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(2): 51-56.]
- [24] 叶瑜,方修琦,葛全胜,等.从动乱与水旱灾害的关系看清代山东气候变化的区域社会响应与适应[J].地理科学,2004,24(6): 680-686.[Ye Yu, Fang Xiuqi, Ge Quansheng et al. Response and adaptation to climate change indicate by the relationship between revolt and drought-flood in Shandong province during middle and late Qing Dynasty. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(6): 680-686.]
- [25] 方修琦,王媛,朱晓禧.气候变暖的适应行为与黑龙江省夏季低温冷害的变化[J].地理研究,2005,24(5):664-672.[Fang Xiuqi, Wang Yuan, Zhu Xiaoxi. Change of cool summer hazard under an adaptation behavior to the climate warming in Heilongjiang Province, Northeast China. Geographical Research, 2005, 24 (5): 664-672.]
- [26] 仇方道,金娜,袁荷,等.徐州都市圈产业结构转型城镇空间响应的时空异质性[J].地理科学, 2017, 37(10): 1459-1468.[Qiu Fangdao, Jin Na, Yuan He et al. Spatio-temporal difference of influencing factors and strength of urban space response to the transition of industrial structure in Xuzhou metropolitan area. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(10):1459-1468.]
- [27] 邓宏兵.长江流域空间经济系统的特征研究[J].长江流域资源与环境,2000,9(3):277-282. [Deng Hongbin. Study on the features of the space economic system of Yangtze Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(3):277-282.]
- [28] 杨丽花,佟连军.吉林省松花江流域工业污染物的结构特征[J].中国科学院研究生院学报,2012,29(3):346-351.[Yang Lihua, Tong Lianjun. Study of structural features of industrial pollutants in the Songhua River Basin in Jilin Province. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29 (3): 346-351.]
- [29] 郑德凤,郝帅,孙才志.基于DEA-ESDA的农业生态效率评价及时空分异研究[J].地理科学, 2018, 38(3): 419-427.[Zheng



- Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi. Evaluation of agricultural ecological efficiency and its spatial-temporal differentiation based on DEA-ESDA. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 419-427.]
- [30] 王兆峰,徐赛.不同交通方式对旅游效率的影响与评价—以张家界为例[J].*地理科学*, 2018, 38(7): 1148-1155.[Wang Zhao-feng, Xu Sai. Influence and evaluation of different traffic modes on tourism efficiency: Taking Zhangjiajie as an example. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7):1148-1155.]
- [31] 吉林统计局.吉林统计年鉴(2014~2015)[M].北京:中国统计出版社,2014-2015.[Jilin Statistical Bureau. *Jilin Statistical Yearbook(2014~2015)*. Beijing: China Statistics Press, 2014-2015.]
- [32] 国家统计局.中国县域统计年鉴(2014~2015)[M].北京:中国统计出版社,2014-2015.[National Statistical Bureau of China. *China county statistical yearbook (2014-2015)*. Beijing: China Statistics Press, 2014-2015.]
- [33] 李小建.经济地理学[M].北京:高等教育出版社,2011.[Li Xiaojian. *Economic geography*. Beijing: Higher Education Press, 2011.]
- [34] 尹贻梅,刘志高,刘卫东.路径依赖理论及其对地方经济发展隐喻[J].*地理研究*,2012,31(5):782-791.[Yin Yimei, Liu Zhigao, Liu Weidong. Path-dependence and its implication for regional development. *Geographical Research*, 2012,31(5):782-791.]
- [35] 郭付友,佟连军,魏强,等.松花江流域(吉林省段)产业系统生态效率时空分异与影响因素[J].*地理研究*,2016,35(8):1483-1494.[Guo Fuyou, Tong Lianjun, Wei Qiang et al. Spatial-temporal differentiation and influencing factors of industrial system eco-efficiency in the Songhua River Basin of Jilin province. *Geographical Research*, 2016, 35(8):1483-1494.]

## Environmental Adaptability of Industrial System in the Songhua River Basin of Jilin Province from the Perspective of Efficiency Evolution

Guo Fuyou<sup>1</sup>, Tong Lianjun<sup>2</sup>, Li Ping<sup>2,3</sup>, Zhang Huimin<sup>2</sup>, Zhang Chunli<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276800, Shandong, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China; 3. Academy of Jilin Social Science, Changchun 130033, Jilin, China)

**Abstract:** Based on the efficiency evolution perspective and the adaptive analysis paradigm, the article adopted a VRS model with input oriented and production capacity variable to analyze the environmental adaptive evolution characteristics and the influencing factors of industrial system in the Songhua River Basin of Jilin Province. The results indicate that: 1) From status pattern analysis, the study area was still in the expansion and growth stage, and there were still many counties have not yet reached the optimal scale stage, so agglomeration was still the mainstream development mode of industry and economic in the future; 2) From temporal evolution analysis, the development of industrial ecology in the Songhua River Basin of Jilin Province was slow, and the industrial scale expansion was the key to the promotion of efficiency. The role of science and technology was not significant; 3) From spatial differentiation analysis, the main cities with high comprehensive efficiency and scale efficiency were constantly gathering in the upstream and midstream areas, while the main cities with pure technical efficiency were distributed in the downstream area, therefore, the improvement of comprehensive efficiency was mainly due to the increase of scale efficiency rather than pure technical efficiency; 4) The factors influencing the environmental adaptability of industrial system of the Songhua River Basin in Jilin Province included location conditions, path dependence effects, economic development levels and scientific technology.

**Key words:** industry system; adaptability; path dependence; the Songhua River; Jilin Province