

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

郭付友^{1,2}, 佟连军², 魏 强³, 张慧敏², 仇方道⁴, 佟伟铭^{2,5}

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;
3. 河北大学经济学院, 保定 071002; 4. 江苏师范大学城市与环境学院, 徐州 221116;
5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于敏感性、稳定性和响应等适应性要素构建了产业系统环境适应性评价指标体系以及评价模型, 并对吉林省松花江流域产业系统环境适应性演变特征以及影响因素进行分析。结果发现: ① 产业系统的发展深受内外因素双重扰动作用, 重型化的产业发展现实导致了产业系统运行状况不佳, 而工业化的大力发展对环境的干扰不断增强; ② 不同的适应性要素以及适应性子系统均表现出迥然各异的区域性演变特征, 产业系统与环境系统以及产业系统适应力与环境系统适应力均具有非线性变化关系特征。环境系统适应力的提升对于产业系统环境适应性的优化改善均具有更为重要作用; ③ 产业系统环境适应性总体表现出由流域自上而下依次降低到中心—外围特征逐渐形成的过程, 说明了流域产业系统环境适应性并非一定完全呈现流域的特征, 流域内中心性城市功能的发挥也可以影响并且改变其演化发展趋势; ④ 产业结构、科学技术、经济发展水平以及政府调控能力是流域产业系统环境适应性的影响因素。

关键词: 适应性; 产业; 环境系统; 松花江; 吉林省

DOI: 10.11821/dlxb201603009

1 引言

改革开放以来, 中国经济呈现迅猛发展态势, 年均GDP增长率长期稳定在10%左右。但经济的发展严重依赖资源以及其他生产要素的高投入、高消耗, 传统的“资源—产品—废物”单向流动的产业线性发展模式仍占据主流地位, 产业规模的快速扩张以及经济总量的规模增长尤为盛行, 引起了资源能源的供给短缺、生态环境的持续恶化, 于是对产业系统与生态环境的良性共生、协同共赢关系的研究显得尤为必要。

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^[1], 一经提出便受到广泛关注。国外对其研究始于20世纪90年代全球环境变化适应性问题的提出^[2], 目前主要集中于适应性内涵释义^[3-5]、相关概念辨析^[6-7]、适应性指标选取^[8]与框架建构^[9-10]、评价方法的选择^[11]、适应性评价^[12-13]以及适应性策略选择^[14-15]等方面, 可见, 国外学者对于适应性的研究已经较为成熟。20世纪90年代中期以来, 国内学者在适应性概念解读^[16]、适应性指标选择^[17]、适应性驱动机制^[18]以及适应性评价^[19]等方面展开了广泛研究, 并且研究尺度涉及全国^[20-21]、省

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071086, 41471110, 41371146) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41071086, No.41471110, No.41371146]

作者简介: 郭付友(1987-), 山东菏泽人, 博士, 主要从事经济地理与区域生态经济研究。E-mail: guofy945@nenu.edu.cn

通讯作者: 佟连军, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域生态经济研究。E-mail: tonglj@neigae.ac.cn

域^[22-23]及市域尺度^[24], 成果也较为丰富。但总体看来, 对适应性理论的研究仍显匮乏, 同时对适应性对策的研究相对较多, 而对适应性影响因素的辨识尚着墨不多。另外现有研究对于流域产业系统与环境系统的适应性问题鲜有涉及。

流域具有显著的整体性与关联性、区段性与差异性、层次性与网络性以及开放性与耗散性等特点^[25], 由于流域资源环境系统的相对封闭性、上下游之间的密切联系性, 以及流域产业系统与资源环境系统矛盾冲突的尖锐性, 因此流域产业系统环境适应性问题亟需研究。松花江流域是东北老工业基地发展的基础和命脉。经济的快速发展和人口的空间集聚导致松花江流域环境污染问题日益凸显, 尤其是2005年松花江发生重大水污染事件以后, 该流域环境状况一直受到国际社会的高度持续关注。但长期形成的重型产业结构、“三高”产业链以及线性生产方式使得流域环境状况短时期内难以改善。随着吉林省增产百亿斤粮食工程、吉林市“千亿级”石化产业基地、松原市“千万吨级”油气生产基地等重大项目的建设, 将对流域资源环境提出更高要求和挑战。松花江生态经济走廊作为中国产业系统快速嬗变的典型地区, 产业集聚与资源环境系统之间的冲突和矛盾不断加剧, 使得该地域产业系统环境适应性问题引起社会的广泛关注。基于此, 本文以适应性分析的视角, 采用计量方法对吉林省松花江流域产业系统环境适应性进行研究。

2 概念解析、研究区与研究方法

2.1 产业系统环境适应性

生态学最早提出了“适应”一词, 表示种群能够通过自身适当改变以适应环境变化, 从而保证种群生存和延续能力。后来适应引申用于社会学、地理学等领域研究范畴, 指系统通过有效调整自身应对外界干扰和压力, 甚至转换成一种新的状态以适应外界变化的环境^[16]。适应不仅是对现有扰动以及持续存在变化的适应, 而且也是对可知变化以及不可预知变化的适应; 适应不仅依赖于系统自身的调整, 更依赖于其周围系统作用的共同发挥; 适应不是直接机械式的末端治理, 而是可以在源头循环以及清洁生产等环节施加影响。

另外, 适应性与脆弱性之间既有联系又有区别, 脆弱性是指系统对系统内外扰动因素具有较高的敏感性, 同时缺乏应对不利扰动的能力从而易使系统遭受损害的属性, 是系统内部与生俱来的本质属性, 并且在系统受到扰动时该属性才会表现出来。脆弱性产生的直接原因来源于系统的内部特征, 并且脆弱性产生的主要驱动因素为系统与扰动因素之间的相互作用, 通过影响系统内部特征对脆弱性发挥放大或缩小的作用, 并最终通过系统面对扰动的敏感性以及应对能力体现出来^[26]。敏感性、应对力、恢复力以及适应能力等已成为脆弱性概念的重要构成因素^[27], 共同决定着系统的脆弱性, 即脆弱性是风险暴露程度、敏感性以及适应能力的函数, 可以衡量系统受到干扰破坏的程度^[28]。与此同时, 脆弱性各个组成部分之间的关系是动态演化的, 随时间、地点、干扰强度以及系统属性而不断发生着变化。适应是降低脆弱性的重要途径, 通过预测未来可能发生的变化, 分析其脆弱性, 然后借助适应性策略选择改变系统状态进而降低脆弱性, 从而使系统更好地适应了变化的环境。

基于以上分析, 本文认为产业系统环境适应性是以资源环境承载力为依据, 通过对不同产业与生态环境之间物质能量输入与输出关系的度量, 所表征出的产业系统的生态亲合状态, 反映了资源环境约束下产业系统的重组能力、应变能力和学习能力。产业系统具有整体性、非线性、开放性、自适应性、不确定性等特点, 具有适应新变化的能力^[19]。

产业系统是生态环境的承载对象,为生态环境的发展提供必要的人力、资金以及技术支持;生态环境是产业系统的承载载体,为产业发展提供所需的生存空间和物质基础,二者互为条件、相互增益。产业系统环境适应性分析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以及能量的传递与流动的线性关系,最终目的是建立起二者之间物质以及能量循环流动与不断重复利用的网络组织共生关系。

2.2 研究区域概况

研究区域为吉林省松花江从上游至下游依次流经的吉林市、长春市、松原市和白城市等4市及其所管辖区域,流域面积为133684 km²,占吉林省幅员总面积的70%^[29]。研究区内产业门类齐全,以化工、造纸、冶金、煤炭、制革、机械、石油、棉纺、建材、食品以及酿造业为主,产业结构的重型化特点突出,2013年流域GDP为9963.42亿元,人口为1663.84万人,分别占吉林省76.75%和62.12%^[30],可见,该区的发展对于吉林省社会经济发展起到重要的作用。研究数据来自于2001-2014年《吉林统计年鉴》^[30]、2000-2013年《吉林省环境质量报告书》^[31]中相关数据。

2.3 研究方法

2.3.1 指标体系构建 构建科学合理的指标体系是对松花江流域产业系统环境适应性做出客观评价的基础和前提。遵循科学性、代表性、可比性以及可获得性的原则,参考相关研究成果^[17, 19, 26, 32-35],在产业系统环境适应性内涵的基础上设计出松花江流域产业系统环境适应性研究指标体系(表1)。其中第一层为目标层,反映产业系统与环境系统适应性耦合的总体状况。第二层为系统层,包括产业系统和环境系统适应力指数,反映子系统的适应性水平。第三层为准则层,包括敏感性、稳定性以及响应3个可以反映系统适应性要素,其中敏感性是指系统来自内外发展环境变化扰动的敏感程度,通常情况下适应性与敏感性呈反比例关系;稳定性是指内外发展环境发生变化时,系统能够保持原有状态的能力,是系统的固有属性,稳定性大小与系统自身因素息息相关,主要包括系统要素的相互关系以及系统结构的复杂程度;响应是指系统应对外界变化时所形成的适应与反馈效应,表征系统具有吸收干扰和重组能力,反映了系统的学习能力、重组能力以及创新能力等主要特征。第四层为指标层,共有30项具体指标,其中多数指标可以直接通过统计资料获取,部分指标需要经过简单计算,包括:①产业系统运行状况指数,用规模以上工业企业成本费用利润率/规模以上工业企业负债率表征。②体制结构状态指数,用国有单位在岗职工与集体单位在岗职工人数占在岗职工人数比值表征。

③产业系统结构熵,计算公式为:

$$X_6 = -\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 产业所占比重; n 表示产业种类。

④产业系统结构转换率,计算公式为:

$$X_7 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - G)^2 \times K_i}{G} \quad (2)$$

式中: N_i 和 G 分别为第 i 产业和 GDP 的年均增长率; K_i 是第 i 产业产值占 GDP 的比重。

⑤产业结构高级化系数,用信息传输、计算机服务和软件业单位从业人员数以及交通运输、仓储和邮政业单位从业人员数总和与制造业和采矿业单位从业人员总和的比值表征。⑥三产产业化系数,用第三产业从业人员比重与第三产业产值占 GDP 比重的乘积表征。⑦市场组织结构指数,用工业总产值与工业企业总数的比值表征。⑧民营经济发展指数,用城镇私营和个体从业人员数占在岗职工人数比值表征。

⑨产业综合发展指数,计算公式为:

表1 吉林省松花江流域产业系统环境适应性研究指标体系

Tab. 1 Environment adaptability indicators of industrial system of the Songhua River Basin in Jilin Province

系统层	准则层	指标层	权重	系统层	准则层	指标层	权重
产业系统适应性	敏感性	产业系统运行状况指数	0.0049	环境系统适应性	敏感性	人均工业废水排放量	0.0459
		二产产值比重/二产就业比重	0.0054			人均工业SO ₂ 排放量	0.0188
		三次产业产值比重变化率绝对值之和	0.0253			人均工业废气排放量	0.0347
		体制结构状态指数	0.0124			人均水资源量变化率	0.1509
		实际利用外资额/GDP	0.0350			人均耕地面积变化率	0.0669
	稳定性	产业系统结构熵	0.0127		稳定性	人均公共绿地面积	0.0218
		产业系统结构转换率	0.0356			建成区绿化覆盖率	0.0133
		产业结构高级化系数	0.0296			人均耕地面积	0.0304
		三产产业化系数	0.0114			人均水资源量	0.0311
		市场组织结构指数	0.0297			环境质量指数	0.0234
	响应	民营经济发展指数	0.0126		响应	废气治理设施数	0.0413
		产业综合发展指数	0.1010			万元GDP能耗	0.0026
		科学技术和教育财政支出比例	0.0304			万元GDP电耗	0.0053
		每万人在校大学生数	0.0540			万元GDP水耗	0.0055
		人均固定资产投资	0.0380			三废综合利用产品产值	0.0703

$$X_{12}=1/\sum |X_{im}-X_{in}| \tag{3}$$

式中： X_{im} 表示*i*城市第*m*个产业部门产值比重； X_{in} 表示*i*城市第*n*个产业部门产值比重。

⑩ 环境质量指数，计算公式为：

$$X_{25}=\sqrt[3]{D\times R\times E} \tag{4}$$

式中： D 、 R 、 E 分别表示工业固体废物综合利用率、污水处理厂集中处理率以及生活垃圾无害化处理率。

2.3.2 熵值法 熵是系统无序程度的度量，值越小，表征某项指标值变异程度越大，该指标提供的信息量越大，其权重越大。熵值法可以有效克服指标变量间信息重叠和人为确定权重的主观性，适合对多元指标进行综合评价，主要步骤见参考文献[36-37]。

依据熵值法计算步骤，首先对2001-2013年阶段吉林省松花江流域30项指标，共计1560项数据统一进行标准化处理。为了消除指标量纲对研究结果的影响，采用极差法进行标准化处理，并设定当指标为正功效时， $y_{ij}=(x_{ij}-\min x_j)/(\max x_j-\min x_j)$ ，反之， $y_{ij}=(\max x_j-x_{ij})/(\max x_j-\min x_j)$ ，式中， x_{ij} 、 $\min x_j$ 、 $\max x_j$ 分别代表指标*j*的实际统计值、最小值以及最大值。在此基础上求出30项指标的差异性系数 g_i ，进而得出各指标的权重 w_j ，最后运用公式： $D(w)=\sum w_j\times y_{ij}$ ，求出准则层中敏感性、稳定性以及响应得分。而敏感性、稳定性以及响应是适应性的关键参数，由此适应性数值大小可用以下函数关系予以度量：

$$AD=\sqrt[2]{ST\times RE}/SE \tag{5}$$

式中： AD 为产业系统（或环境系统）适应力； ST 为稳定性； RE 为响应； SE 为敏感性。

另外，在产业系统环境适应性评价分析中，虽然具体指标权重对最终结果正确与否起着重要作用，但是指标体系中系统层（ AD ）指标的权重也起着至关重要的影响，为提高测度结果的客观性，采用均方差赋权法计算系统层的指标权重^[38]，根据系统层标准化得分以及权重综合求出产业系统环境适应性数值。

2.3.3 协整分析 尽管存在两个或以上的非平稳序列变量,但其经过线性组合之后可能存在着稳定性关系,即协整关系。检验非平稳序列变量之间是否存在统计学上因果关系的方法通常为Granger检验^[39-40]。在Granger检验基础上,通过协整关系检验(E-G两步法)估计长期均衡关系参数(协整向量),在协整关系存在基础上,将第一步得到残差作为非均衡误差项归并到误差修正模型(VCM)之中,用协整回归(OLS)估计相应参数^[41]。本文运用ADF(Augmented Dickey-Fuller)法首先检验各变量的稳定性,在协整关系存在的基础上进行变量之间Granger分析,并且通过E-G两步法检验产业系统环境适应性与各影响因素相互的影响关系,在对得到残差项进行ADF检验之后,最终确定回归关系。

3 测度结果分析

3.1 产业系统环境适应性指标权重

指标权重分析(表1),对产业系统适应性指标影响最大的是每万人在校大学生数(0.0540)、人均固定资产投资(0.0380)、产业系统结构转换率(0.0356)以及实际利用外资额/GDP(0.0350),而二产产值比重/二产就业比重(0.0054)以及产业系统运行状况指数(0.0049)对其作用不明显,说明了本区产业系统的发展深受“内源力”和“外向力”双重扰动作用,其中“内源力”主要来自于产业系统应对外界发展环境变化的自我调整能力和学习能力,而第二产业“一枝独秀”的事实反映了本地区产业系统自适应性以及自组织能力较差,由此也导致了产业系统运行状况不佳。另外“外向力”也对产业系统的发展施加重要影响,“外向力”主要包括政府投资、吸引外资以及科技支撑条件等。吉林省松花江流域产业发展依赖于投资拉动,相对具有“指令性”经济的性质。

对环境系统适应性指标影响最大的是人均水资源量变化率(0.1509)、三废综合利用产品产值(0.0703)、人均耕地面积变化率(0.0669)以及人均工业废水排放量(0.0459),而万元GDP水耗(0.0055)、万元GDP电耗(0.0053)以及万元GDP能耗(0.0026)对其作用不明显,反映了对环境扰动作用最大的是工业化的发展,同时也说明目前工业发展依赖于资源的高消耗以及高投入,工业运行效率低下,工业发展对耕地的蚕食作用进一步加剧,由于历史和现实双重作用下,未来对环境的干扰作用势必增强。

3.2 产业系统环境适应性敏感性

长春市产业系统敏感性呈现波动上升的趋势(图1a),而吉林市、松原市以及白城市均呈现波动下降的趋势,其中吉林市又可分为2001-2008年阶段波动下降,2008-2013年阶段稳步下降。4个地级市环境系统敏感性均显著呈现阶段性发展特征(图1b),其中2001-2008年阶段,长春市呈现逐步升高趋势,2008-2013年阶段则呈现倒“V”形;2001-2008年阶段,吉林市呈现平稳发展态势,2008-2013年阶段则呈现倒“V”形;2001-2010年阶段,松原呈现先降后增再减的趋势,2010-2013年阶段则呈现倒“V”形;2001-2010年阶段,白城呈现波动上升趋势,2010-2013年阶段则呈现倒“V”形。说明人均工业SO₂排放量及人均工业废气排放量是导致环境系统敏感性呈现阶段性特征的重要原因,现阶段工业化的大力发展对环境造成了相当程度上的干扰。吉林市作为松花江源头,其产业结构以石化产业为主,对水环境的干扰相对较大,同时由于生产以及生活用水的需求导致向下游流经的水资源不断减少,加之伊通河水质较差,汇入干流之后势必对下游地区产生严重干扰,导致下游地区敏感性指数均呈现与吉林市相似的特征。

另外,长春、吉林、松原和白城市产业系统敏感性以及环境系统敏感性平均得分分别为0.0459、0.0316、0.0269、0.0291以及0.0419、0.0823、0.0191、0.0305,说明产业系

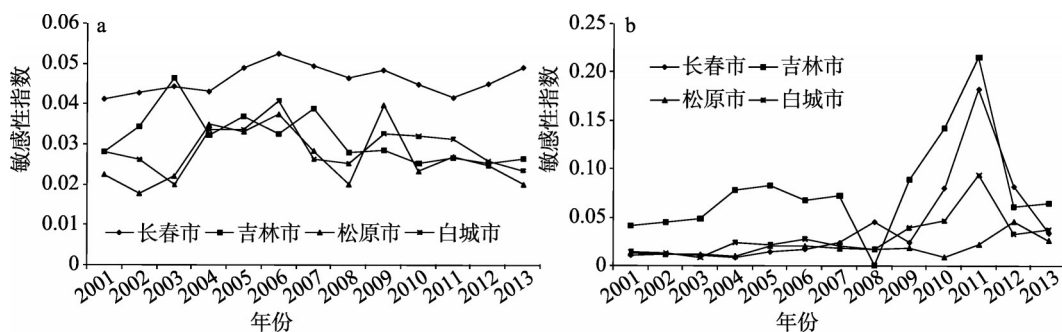


图1 吉林省松花江流域产业系统与环境系统敏感性指数

Fig. 1 Sensitivity index of industrial system and environmental system of the Songhua River Basin in Jilin Province

统与环境系统具有非线性耦合关系, 产业发展并不一定是导致环境恶化的根本原因。

3.3 产业系统环境适应性稳定性

产业系统稳定性区域特性鲜明(图2a), 长春市呈现阶段性变化特征, 2001-2010年阶段基本维持不变, 而2010-2013年阶段则逐步提高。吉林市呈波动起伏状态, 松原市则呈“U”型变化特征, 而白城市则波动上升。产业系统稳定性主要来自于产业系统自身内源力作用, 产业的多样化以及产业结构优化升级促进了产业系统稳定性的提高。环境系统稳定性总体呈逐年上升趋势(图2b), 但2010年以后, 长春市和吉林市环境系统稳定性有所下降, 主要由于2010年长吉一体化的提出促使了新一轮产业发展的热潮, 对环境的干扰作用不断增强。而2001年吉林生态省建设规划西部区域为草原湿地保护和绿色产业生态经济区, 促使松原市以及白城市环境系统稳定性不断提升。

3.4 产业系统环境适应性响应

产业系统响应受市场力、内源力、科技条件以及政府投资等方面的作用, 由此导致了区域产业系统响应的差异性。图3表明, 长春市产业系统响应呈稳步提升的态势(图3a), 与其市场条件较好、产业结构优化升级、科技支撑雄厚以及政府大力投资直接相关。吉林市则波动起伏, 松原市则先下降后上升, 白城市则整体呈不断下降趋势。环境系统响应与产业发展效率以及环境治理情况等条件有关, 长春市呈逐年递增趋势, 吉林市呈“几”字型发展特征, 而松原和白城几乎保持不变, 长期维持在较低水平(图3b)。

3.5 产业系统适应力与环境系统适应力

适应力大小直接受系统的稳定性、响应以及敏感性等适应性要素影响。图4表明, 长春市产业系统适应力稳步提升, 吉林市和松原市则先降低后波动上升, 白城市呈先增

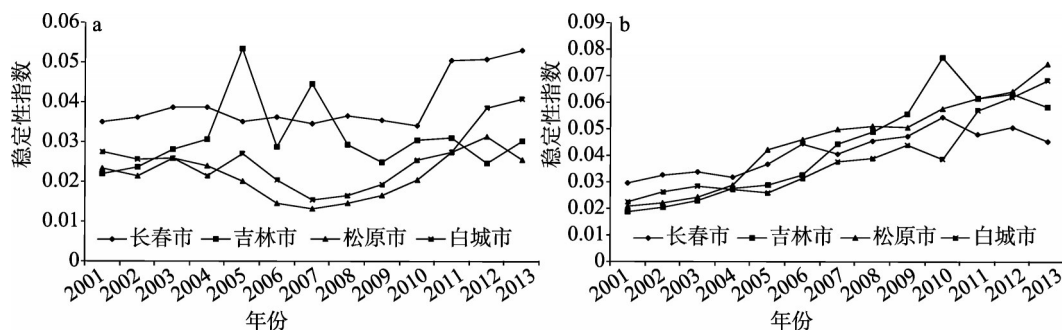


图2 吉林省松花江流域产业系统与环境系统稳定性指数

Fig. 2 Stability index of industrial system and environmental system of the Songhua River Basin in Jilin Province

加后降低再波动上升趋势(图4a)。长春市已经形成汽车工业、绿色食品业、光电子以及生物制药等四大主导产业,并且产业结构不断优化升级,三产比重长期稳定在40%以上,产业发展自组织性以及自我调整能力高。吉林市以及松原市产业发展严重依赖于石化产业、冶金以及电力产业等重型工业,以油为主、“一业独大”的现状使得产业发展不稳定性增加。白城市农副产品加工、汽车配套、纺织业、能源、皮革、建材以及机械加工等均有一定的发展优势,已经形成了“多业并举”的发展格局,任何一种产业的变化都对整个产业系统适应力产生一定影响。

长春市呈现钟摆震荡且不断下降的趋势,吉林市则平稳发展后急剧递增,松原市呈现波动变化发展,白城市环境系统适应力与产业系统适应力具有相对一致的变化趋势(图4b)。以上分析说明产业系统适应力与环境系统适应力变化趋势并非完全一致,二者具有非线性变化关系特征。同时表明松花江源头吉林市的发展对整个流域的影响很大。

3.6 产业系统环境适应性

产业系统环境适应性综合指数中,长春、松原以及白城市产业系统环境适应性指数与环境系统适应力具有相对一致的变化趋势,而吉林市则先降低后不断上升(图5),可见现阶段生态环境对于产业系统环境适应性提高具有重大影响作用,吉林省松花江流域由于重型化产业结构特点,产业清洁化以及产业轻型化速度相对迟缓,在这种情况下生态环境的治理与改善相对于产业结构的调整较为容易。

总体而言,产业系统环境适应性综合指数得分呈现出由长春市>白城市>松原市>吉林市,演化为长春市>松原市>吉林市>白城市,并且区域之间差异程度不断缩小。吉林市、长春市、松原市以及白城市作为松花江依次流经的城市,其产业系统环境适应性总体呈现出由流域自上而下依次降低到中心—外围特征逐渐形成的过程。另外也说明了长

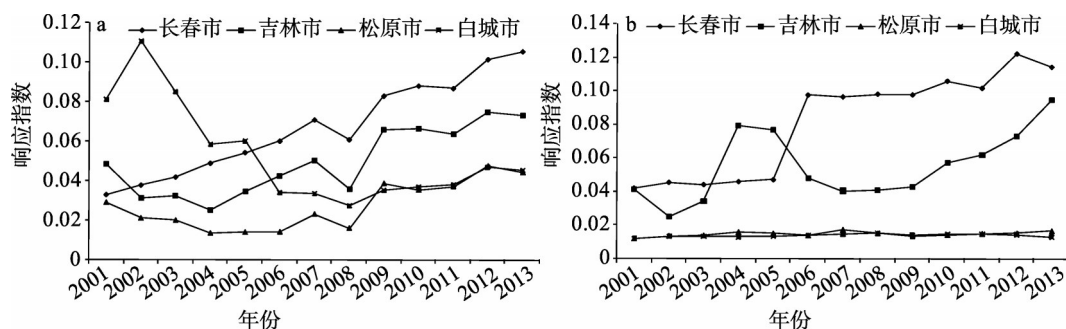


图3 吉林省松花江流域产业系统与环境系统响应指数

Fig. 3 Response index of industrial system and environmental system of the Songhua River Basin in Jilin Province

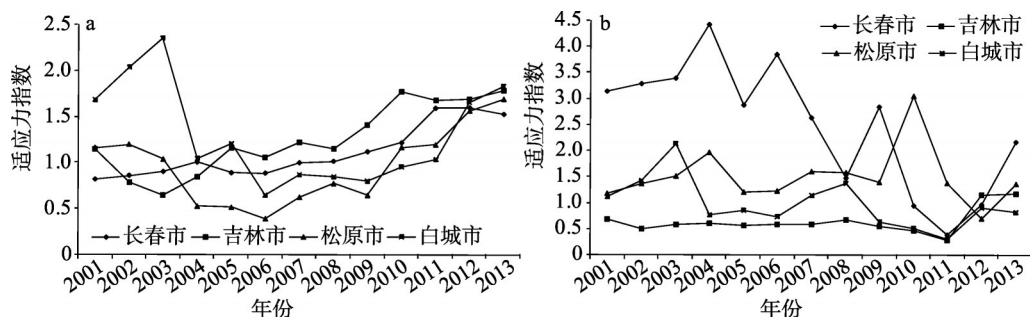


图4 吉林省松花江流域产业系统与环境系统适应力指数

Fig. 4 Adaptability index of industrial system and environmental system of the Songhua River Basin in Jilin Province

春市辐射功能作用不断增强,同时反映了流域产业系统环境适应性并非一定完全呈现流域的特征,流域内中心性城市功能的发挥也可以影响并且改变其演化发展趋势。

4 产业系统环境适应性影响因素

产业系统环境适应性是由自然因素、经济因素以及社会因素等多种因素互为条件、互为因果、相互制约、相互耦合而成的复合系统,因此产业系统环境适应性影响因素涉及到多个层面。但当前对其研究定性描述层面居多,对于定量分析的研究成果尚不多见,并且具体因子作用力程度强弱的研究尚着墨不多,为此,参考相关研究成果^[42-43],结合松花江流域(吉林省段)具体情况,最终选取人均GDP代表经济发展水平(ED)、工业总产值占GDP比重代表产业结构(IS)、外商直接投资占GDP比重代表产业发展外向力(IO)、财政支出占GDP比重代表政府调控能力(GA)、万人科技活动人员数代表科学技术因素(TF)、工业废水排放达标率代表环境管理力度(EG),定量分析产业系统环境适应性(IE)的影响因素。

首先,根据相关性分析验证了产业系统环境适应性与产业发展外向力以及环境管理力度的Pearson系数均小于0.5,而其余因素的Pearson系数均大于0.9,所以刨除产业发展外向力以及环境管理力度因素的影响。

其次,在Eviews 6.0软件中对5个指标进行单位根检验,验证了5个指标的一阶差分的 t 检验值均小于其在1%显著性水平下的临界值,即通过了一阶单位根检验,验证了序列具备平稳性。Granger分析显示,在滞后一期时,产业结构、经济发展水平、政府调控以及科学技术与产业系统环境适应性互为Granger原因,由此运用OLS回归,回归结果为:

$$IE = 0.870ED - 3.069IS - 0.784GA + 1.363TF - 15.15$$

式中:解释变量 ED 在1%显著性水平下显著; IS 、 GA 在5%显著性水平下显著; TF 在10%显著性水平下显著。

4.1 产业结构

从影响因素作用强弱程度分析,对产业系统环境适应性起主导作用的是产业结构,其影响系数高达-3.069,是最低值-政府调控能力($GA=-0.784$)的3.91倍,但符号为负,说明产业结构对产业系统环境适应性起负向作用,主要是由于研究区资源型产业较为发育,形成了“三高”的重工业产业结构,增加了产业系统的结构脆弱性,并且在此基础上,形成了以重化工业为核心的重污染产业链,由此造成了流域环境恶化,尤其是流域水环境污染十分严重,严重影响了环境系统的适应性,受此双重路径作用下,降低了流域产业系统环境适应性。

4.2 科学技术

回归结果显示科学技术因素的作用强度为1.363,显示了科学技术因素对于产业系统环境适应性的重要促进作用。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,科学技术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,减少污染源的排放与扩

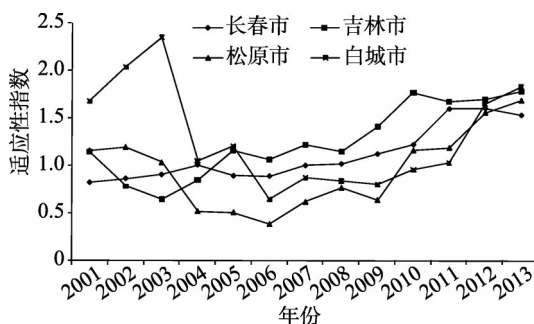


图5 吉林省松花江流域产业系统环境适应性指数

Fig. 5 Environmental adaptability index of industrial system of the Songhua River Basin in Jilin Province

散, 而且还可以末端治理污染, 减少对环境的污染与破坏。吉林省松花江流域科技实力雄厚, 2001-2013年, 万人拥有科技活动人员数从21人增加至50人^[30], 年均增长率高达11.5%, 区域新兴产业光电子、信息产业、生物医药、新材料、新兴化工、新能源以及商贸旅游发展态势良好, 一定程度上可以缓解产业结构的重型化特征, 不断使产业变“轻”和“清”, 势必促进流域产业系统环境适应性的提升。

4.3 经济发展水平

回归结果显示人均GDP每提高1个单位, 产业系统环境适应性指数提升0.87个单位, 经济发展水平的提高可以极大地促进产业系统环境适应性指数的提升。经济发展可以促进规模效应的形成及其作用的发挥, 并不断改善生产技术, 同时可以不断推进治污设施建设。另外在经济发展水平提高的同时, 居民生活水平也在不断的改善, 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指数的增长。

4.4 政府调控

回归结果表明政府调控作用对于产业系统环境适应性指数的提升具有一定程度上的负相关作用, 主要由于政府仍热衷于传统高耗能产业的投资, 尤其是流域内占有绝对比重的“三高”产业的投资, 而对于环境保护的支出严重不足。2013年财政支出中用于环境保护的支出占财政支出比重为5.11%, 仅占GDP比重为0.65%, 对环境保护的投入不足势必影响环境系统适应性。持续不断地对“三高”产业的投资, 无疑将会加重环境系统的破坏程度, 而环境系统作为产业系统的载体以及生态本底, 环境系统的负反馈机制将会对产业系统施加一定的负向作用, 甚至会使产业系统变得不可持续, 由此形成恶性循环, 必将降低产业系统环境适应性指数。

5 结论与讨论

(1) 吉林省松花江流域产业系统的发展深受“内源力”和“外向力”双重扰动作用, 以油为主、“一业独大”的产业发展现实导致了产业系统运行状况不佳, 同时产业发展依赖于投资拉动, 相对具有“指令性”经济的性质。另外本区工业化的大力发展对环境干扰作用将会不断增强。

(2) 不同适应性要素时空分异特征显著。长春市产业系统敏感性波动上升, 吉林市、松原市以及白城市均波动下降, 而环境系统敏感性均显著呈现阶段性发展特征; 长春市产业系统稳定性呈阶段性变化特征, 吉林市则波动起伏, 松原市呈“U”型特征, 白城市波动上升。而环境系统稳定性总体逐年上升; 长春市产业系统响应稳步提升, 吉林市波动起伏, 松原市先下降后上升, 白城市则不断下降。而环境系统响应中, 长春市逐年递增, 吉林市呈现“几”字型发展特征, 松原市和白城市几乎保持不变, 长期维持在较低水平。

(3) 不同适应力子系统时空分异特征显著。长春市产业系统适应力稳步提升, 吉林市和松原市则先降低后波动上升, 白城市呈现先增加后降低再波动上升趋势。长春市环境系统适应力呈钟摆震荡不断下降趋势, 吉林市则平稳发展后急剧递增, 松原市则波动变化, 白城市环境系统适应力与产业系统适应力变化趋势相对一致; 相较于产业系统适应力而言, 环境系统适应力的提升对于产业系统环境适应性的优化改善具有更为重要作用。

(4) 产业结构、科学技术、经济发展水平以及政府调控作用是影响产业系统环境适

应性的重要因素,对于吉林省松花江流域而言,其影响程度强弱具有产业结构 > 科学技术 > 经济发展水平 > 政府调控作用,未来要积极利用科学技术优化调整现有产业结构,增强市场配置资源的主体地位,加强环境保护与治理,在大力发展经济的同时,力争使其对环境的干扰作用降至最小化。

参考文献(References)

- [1] Brooks N. Vulnerability, risk, and adaptation: A conceptual framework. Working Paper 38, Tyndall Center for Climate Change Research, Norwich University of East Anglia, 2003.
- [2] Scheraga J, Grambsch A E. Risks, opportunities, and adaptation to climate change. *Climate Research*, 1998, 11(1): 85-95.
- [3] Schipper E L F. Conceptual history of adaptation to climate change under the UNFCCC. *Review of European Community and International Environmental Law*, 2006, 15(1): 82-92.
- [4] O'Brien M J, Holland T D. The role of adaptation in archaeological explanation. *American Antiquity*, 1992, 57(1): 36-69.
- [5] Brook S N, Adger W N, Kelly P M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, 2005, 15: 151-163.
- [6] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, 16: 282-292.
- [7] Gallopín G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 293-303.
- [8] Kelly P M, Adger W N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climate Change*, 2000, 47: 325-352.
- [9] Smit B, Burton I, Klein R J T, et al. The science of adaptation: A framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1999, 4(3/4): 199-213.
- [10] Nelson D R, Adger W N, Brown K. Adaptation to environmental change: Contributions of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources*, 2006, 32(1): 395-419.
- [11] Smith J B, Ragland S E, Pitts G J. A process for evaluating anticipatory adaptation measures for climate change. *Water, Air and Soil Pollution*, 1998, 92: 229-238.
- [12] Korhonen J, Seager T P. Editorial: Beyond eco-efficiency. *Business Strategy and the Environment*, 2008(17): 411-419.
- [13] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [14] Mark Dodgson. Asia's national innovation systems: Institutional adaptability and rigidity in the face of global innovation challenges. *Asia Pacific Journal of Management*, 2009, 26(3): 589-609.
- [15] Bormann B T, Haynes R W, Marttn J R. Adaptive management of forest ecosystems. *Bioscience*, 2007, 57(2): 186-171.
- [16] 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. [方修琦, 殷培红. 弹性、脆弱性和适应: IHDP 三个核心概念综述. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 11-22.]
- [17] 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. [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. *地理研究*, 2011, 30(3): 243-255.]
- [18] Lv Hongjiang, Liu Hong, Cheng Ming. The drivers of organizational adaptability and their function mechanism. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2007(12): 167-172. [吕鸿江, 刘洪, 程明. 组织适应性形成的驱动因素及其作用机制研究. *科学与科学技术管理*, 2007(12): 167-172.]
- [19] Gao Yingchun, Tong Lianjun. Adaptability analysis of industrial system in Jilin province. *Human Geography*, 2011, 26(3): 111-115. [高迎春, 佟连军. 吉林省产业系统适应性分析. *人文地理*, 2011, 26(3): 111-115.]
- [20] 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. [吴绍洪, 尹云鹤, 赵慧霞, 等. 生态系统对气候变化适应的辨识. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 115-118.]
- [21] 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. [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. *气候变化研究进展*, 2006, 2(2): 51-56.]
- [22] 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. [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. 地理科学, 2004, 24(6): 680-686.]
- [23] 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. [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. 地理研究, 2005, 24(5): 664-672.]
- [24] Luo Pei, Yan Xiaopei. Research on adaptive urban morphology under the rapid growth. *Urban Problems*, 2006(4): 27-31. [罗佩, 阎小培. 高速增长下的适应性城市形态研究. 城市问题, 2006(4): 27-31.]
- [25] Zhang Wenhe. The development of watershed and the strategic position of China's seven river basins. *Geography and Territorial Research*, 1991, 7(1): 14-19. [张文合. 流域开发综论: 兼议我国七大江河流域的战略地位. 地理学与国土研究, 1991, 7(1): 14-19.]
- [26] Li He, Zhang Pingyu. Economic system vulnerability of mining cities in Northeast China. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(1): 116-120. [李鹤, 张平宇. 东北地区矿业城市经济系统脆弱性分析. 煤炭学报, 2008, 33(1): 116-120.]
- [27] Li He, Zhang Pingyu, Cheng Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 18-25. [李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.]
- [28] Cui Shenghui, Li Xuanqi. Review on adaptation in the perspective of global change. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1088-1098. [崔胜辉, 李旋旗. 全球变化背景下的适应性研究综述. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1088-1098.]
- [29] 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. [杨丽花, 佟连军. 吉林省松花江流域工业污染物的结构特征. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(3): 346-351.]
- [30] Jilin Statistical Bureau. *Jilin Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2001-2014. [吉林省统计局. 吉林省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001-2014.]
- [31] Department of Environmental Protection of Jilin Province. *Jilin Environmental Quality Report*. Changchun: Department of Environmental Protection of Jilin Province, 2001-2013. [吉林省环境保护局. 吉林环境质量报告书. 长春: 吉林省环保部, 2001-2013.]
- [32] Li He, Zhang Pingyu. Vulnerability of urban employment of mining cities in Northeast China. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 751-760. [李鹤, 张平宇. 东北地区矿业城市社会就业脆弱性分析. 地理研究, 2009, 28(3): 751-760.]
- [33] Yang Lihua, Tong Lianjun. Dynamic Coupling and spatial disparity of economic development and water environmental quality in Songhua River Basin of Jilin Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 503-510. [杨丽花, 佟连军. 吉林省松花江流域经济发展与水环境质量的动态耦合及空间格局. 应用生态学报, 2013, 24(2): 503-510.]
- [34] Sun Pingjun, Xiu Chunliang. Study on the vulnerability of economic development in mining cities based on the PSE Model. *Geographical Research*, 2011, 30(2): 301-310. [孙平军, 修春亮. 基于PSE模型的矿业城市经济发展脆弱性研究. 地理研究, 2011, 30(2): 301-310.]
- [35] Su Fei, Zhang Pingyu. Vulnerability assessment of petroleum city's economic system based on set pair analysis: A case study of Daqing city. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(4): 454-464. [苏飞, 张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价. 地理学报, 2010, 65(4): 454-464.]
- [36] Ou Xiangjun, Zhen Feng, Qin Yongdong, et al. Study on compression level and ideal impetus of regional urbanization: The case of Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 993-1002. [欧向军, 甄峰, 秦永东, 等. 区域城市化水平综合测度及其理想动力分析: 以江苏省为例. 地理研究, 2008, 27(5): 993-1002.]
- [37] Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 387-398. [陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.]
- [38] Dai Quanhou, Liu Guobin, Liu Mingyi. An evaluation on sustainable development of eco-economic system in small watershed in hilly area of Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 209-218. [戴全厚, 刘国彬, 刘明义. 小流域生态经济系统可持续发展评价: 以东北低山丘陵区黑牛河小流域为例. 地理学报, 2005, 60(2): 209-218.]
- [39] Damodar N Gujarati. *Basic Econometrics*. 4th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2005: 25-41. [古扎拉蒂. 计量经济学. 4版. 北京: 中国人民大学出版社, 2005: 25-41.]
- [40] Zhang Xiaotong. *Guide to Eviews and Case Study*. Beijing: China Machine Press, 2007: 118-122. [张晓峒. Eviews使用指南与案例. 北京: 机械工业出版社, 2007: 118-122.]
- [41] Gao Tiemei. *Econometrics Method and Model: Eviews Application and Case*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 260-278. [高铁梅. 计量经济分析方法与建模: Eviews应用及实例. 北京: 清华大学出版社, 2006: 260-278.]

- [42] Chen Zuocheng, Gong Xinshu. Evaluation of ecological efficiency of industrial system and its influencing factors analysis in China's western region. *Forum on Science and Technology in China*, 2013(10): 49-55. [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.]
- [43] Tong Lianjun, Song Yanan, Han Ruiling, et al. Industrial environmental efficiency of costal economic belt in Liaoning province. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(3): 294-300. [佟连军, 宋亚楠, 韩瑞玲, 等. 辽宁沿海经济带工业环境效率分析. *地理科学*, 2012, 32(3): 294-300.]

Spatio-temporal difference and influencing factors of environmental adaptability assessment of industrial system in the Songhua River Basin of Jilin Province

GUO Fuyou^{1,2}, TONG Lianjun², WEI Qiang³, ZHANG Huimin²,
QIU Fangdao⁴, TONG Weiming^{2,5}

- (1. College of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;
2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;
3. College of Economics, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China; 4. School of Urban and
Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: On the basis of defining the connotation of the environmental adaptability of industrial system, this paper builds the environmental adaptability evaluation index system of industrial system and establishes an evaluation model in the perspective of the adaptive elements such as sensitivity, stability, and system response. And it analyzes the environmental adaptive evolution characteristics and the influencing factors of industrial system of the Songhua River Basin in Jilin Province. The results indicate that: (1) The development of industrial system has been under the double disturbance effect of internal and external factors. The internal impact is that the heavy industrial development leads to the poor industrial system operation condition. (2) The different adaptability elements and adaptability subsystem showed completely different regional evolution characteristics. The environmental and industrial system had the characteristics of nonlinear relationship, and so did the environmental system adaptability and the industrial system adaptability. (3) The environmental adaptability of industrial system turned from a feature of decreasing from upstream to downstream to a feature of the center- periphery with Changchun as the center. Obviously, the environmental adaptability of basin's industrial system represented a watershed characteristic to some extent. Meanwhile, the basin's central city functions could also influence and change the development trend of the adaptability. (4) The factors influencing the environmental adaptability of industrial system of the Songhua River Basin in Jilin Province include industrial structure, science and technology, economic development level and government regulation.

Keywords: adaptability; industry; environmental system; Songhua River; Jilin Province