

中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素

周 亮^{1,2}, 车 磊³, 周成虎²

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息
系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 绿色发展作为化解自然环境约束、破解经济转型难题、支撑和实现全球可持续发展目标(SDGs)关键。正逐渐成为中国生态文明建设、美丽中国建设和全球经济转型与重构的重要指导理念。在梳理绿色发展概念与内涵基础上, 采用SBM-Undesirable模型、泰尔指数和空间马尔科夫链等方法, 对2005-2015年中国城市绿色发展效率时空分异特征及其演变过程进行了测度与刻画, 并进一步耦合自然与人文因素定量探讨了人地关系地域系统下的影响机制。研究表明: ① 2005-2015年中国城市绿色发展效率稳步提升, 由0.475增加到0.523, 总体提高了10%, 时序上呈现“W”型波动增加的阶段性演变特征。② 中国城市绿色发展效率呈现出“东中西”阶梯状递减的区域差异规律, 不同类型城市群具有“国家级>区域性>地方性”倒金字塔式集群增长特征, 形成了“超大城市>特大城市>大城市>中等城市>小城市”稳定等级规模结构。③ 中国城市绿色发展效率空间集聚特征显著, 高效率城市存在正向溢出效应, 低效率城市则负向溢出影响, “高高集聚、高带动低”的空间俱乐部趋同现象较为凸显, 不同类型城市演化存在显著的路径依赖与时空惯性。④ 人地关系地域系统视角下, 人文社会因素对城市绿色发展效率影响程度大于自然本底要素, 其中经济实力、产业结构、开放程度和城市气温呈现积极促进作用。

关键词: 绿色发展; 效率; 空间马尔科夫; 时空演变; 人地关系; 可持续发展目标

DOI: 10.11821/dlxb201910006

1 引言

生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计, 构建高质量现代化经济体系、解决污染问题需要依靠这一政策。中国先后历经了由“无序发展—黑色发展—循环发展—可持续发展”的演变, 目前正逐步向绿色发展转型。绿色发展作为生态文明建设的重要内容, 能有效突破自然环境约束, 破解经济发展中的生态难题, 解决人民对绿水青山等良好生态环境的需要与生态环境质量不高之间矛盾^[1-2]。绿色发展与可持续发展理念一脉相承, 对于可持续发展的政策引导至关重要。此外, 生态文明建设、绿色发展战略的实施同时也符合中国现阶段“供给侧改革”战略, 资源环境约束下经济健康成长模式转型成为突破经济新常态的重要途径^[3-4]。在刘易斯拐点出现, 劳动力要素红利逐渐消失背景下, 单纯依靠增加生产要素投入的发展模式已难以为继^[5]。因此, 急需加快发展方式转

收稿日期: 2018-07-02; 修订日期: 2019-06-28

基金项目: 中国科学院战略性先导A类专项(XDA19040502); 国家自然科学基金项目(41701173, 41961027); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJCZH268) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of the CAS, No.XDA19040502; National Natural Science Foundation of China, No.41701173, No.41961027; Science Foundation for the Excellent Youth Scholars of Ministry of Education of China, No.17YJCZH268]

作者简介: 周亮(1983-), 男, 甘肃天水人, 博士/博士后, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110012408), 研究方向为城市与区域可持续发展。E-mail: zhougeo@126.com

2027-2044 页

变,把转型升级、提高质量和增加效率作为主线,实现从要素投入增长向新型驱动发展的“质量变革”“效率变革”和“动力变革”转变^[6-7]。

绿色发展作为实现经济、社会和环境可持续发展的重要突破,正逐渐成为全球可持续发展目标(SDGs)和全人类发展的共识。绿色发展理念与研究备受各界的关注,1987年联合国世界环境与发展委员会的报告《我们共同的未来》(Our Common Future)中首次提及可持续发展问题^[8]。1989年David Pierce的著作《绿色经济的蓝图》(Blueprint for Green Economy)主张建立一种“可承受的经济增长”,首次提到以环境保护为核心的绿色发展理念。2005年联合国亚太经社会(UNESCAP)第五届亚太环境与发展问题会议提出“绿色增长”概念,认为绿色增长是“环境可持续的经济增长”。2007年联合国环境规划署(UNEP)首次将“绿色经济”定义为“重视人与自然、能创造体面高薪工作的经济”。随着对经济活动与资源环境关系的深入认识,特别是2008年国际金融危机后,绿色经济、绿色新政、绿色增长、绿色转型、绿色发展的新格局被相继提出,用于解决发展与可持续问题的实际需要。2011年经合组织(OECD)认为绿色发展是谋求经济增长和发展的解决方案,同时也是防止环境退化,生物多样性丧失和不可持续利用自然资源的关键^[9]。2012年“里约+20”峰会上全球各国进一步凝聚绿色发展的共识,促进了绿色经济模式的多元化发展,重塑我们共同的未来。联合国可持续发展大会更是将“发展绿色经济”作为2012年的主题,旗帜鲜明地引导“全球经济向绿色过渡”的发展新方向。国际组织与学术界通过不断呼吁与宣言,促使绿色发展在全球范围内形成广泛的共识并付诸实践。另外,国外学者研究也多从人类发展与生态环境二者关系切入,经历了由生态意识萌芽、环境反思与觉醒向持续增长与均衡发展和可持续性与绿色化理念的不断批判与进步。通过发展模式不断调整与创新优化,在保持经济增长的同时,提高资源与能源利用率,避免对环境过度破坏、资源过度消耗的绿色化发展理念正逐渐成为新时代国际学术界的共同认知。

绿色化发展概念与中国传统天人合一、人地协调、可持续发展观息息相关,并同时和新时期生态文明建设与“青山绿水就是金山银山”理念不谋而合。进而国内学者首先对中国实施绿色发展战略、绿色发展政策以及相关驱动和制约因素进行了广泛的论证和研究,通过对绿色发展的概念与内涵、道路与模式转型、战略对策及驱动(制约)因素、测度与评价指标体系、理论及其应用方法^[10-15]等方面展开研究与分析,已形成比较系统的理论体系。循环(Cycle)、低碳(Low-Carbon)、可持续(Sustainable)是绿色发展的核心理念,其关键之处在于提升绿色发展效率。绿色发展效率以绿色增长、绿色科技、绿色能源和绿色创新为主要内容,通过低能耗、适应人类健康、环境友好相关产业的GDP占比不断提高,从而实现低资源消耗、低污染排放,达到经济增长与资源消耗、污染排放脱钩^[16]。绿色发展效率提升是实现生态文明建设和经济转型发展的重要途径,即实现经济增长的同时,也能够同时响应资源节约与环境污染减排,推动转向低投入、低排放和高产出的转变。有关绿色发展效率研究主要从区域宏观尺度和企业(行业)微观两个层面着手,涵盖了测度模型与计算方法、时序变化与空间分异规律、收敛性与影响因素以及分行业效率评价^[17-21]等多方面内容。通过DEA模型、方向距离函数模型、全要素生产率模型等^[22-24]对效率进行测度,利用Malmquist指数分解、核密度估计以及空间自相关等方法演绎其时空动态演变特征,构建Tobit回归、Bootstrap截断回归、空间自回归等模型重点关注财政分权、技术创新和环境规制等要素对绿色发展效率的影响^[25-26]。这些实证研究将之前的理念、概念、内涵等顶层设计具体落实到位,系统探讨中国践行绿色发展模式、区域差异、行业和企业绿色发展异质性问题。

总结已有研究发现：① 研究内容方面，主要侧重于城市某一领域效率或是某一特定含义，如城市经济效率、土地利用效率、产业效率、生态效率等。对复杂“经济—社会—自然”耦合系统的城市绿色发展效率研究不够深入和系统。城市作为一个“经济—社会—自然”耦合复杂的人地关系地域系统，研究城市绿色发展效率，判定投入资源的有效配置可以客观地反映出经济、社会、自然等子系统协调发展程度。② 评价体系方面，绿色发展效率的指标评价体系构建还不够完善。投入角度较少将技术创新纳入生产过程，未能充分考虑技术投入对生产的影响；资源要素投入仅以化石能源消耗代替，难以真实、全面地反映实际生产中能源消耗。产出角度有关社会产出的设计仍存在较大的改进空间，研究者更多地考虑环境污染因素，因环境改善带来的生态效益常被忽视。③ 研究尺度方面，以往研究多从省（区域）、城市群和特定区域等层面出发，对城市尺度的精细刻画不足。“全国—东—中—西”由整体到局部的多尺度区域差异化研究范式较为固定，较少将“全国—区域—城市群—城市”的分析视角纳入研究之中，一定程度上弱化了对多尺度、多层级绿色发展效率的对比与认知，不能清晰地体现出区域发展的空间异质与关联特征。在多要素频繁流动、知识技术跨区溢出、环境污染不断扩散以及多学科交叉互融的大背景下，以人地关系地域系统理论为指导，整合自然本底与人文社会发展等相关要素，将地理学、生态学、环境学和经济学等多学科系统融合，在地理学空间异质与空间关联视角下，考察复杂人地关系地域系统的绿色发展效率显得十分必要。

基于此，本文整合城市、区域与城市群等多尺度范围，以中国285个地级及以上城市为主要研究对象，系统梳理绿色发展及其效率的概念与内涵，并以此为基础构建城市绿色发展效率投入—产出评价体系，采用SBM-Undesirable模型对2005-2015年中国城市绿色发展效率进行测度。通过多种空间尺度分析方法对城市绿色发展效率的时空演变特征进行分析，并综合自然本底和人文社会因素进行系统性的作用机制探究。试图探明绿色发展规律，厘清发展作用机制，为区域经济、社会、环境三大系统的绿色协调发展提供一定的决策参考。

2 内涵与理论基础

绿色发展是以增强经济活力、增进社会福祉、增益资源财富为目标，强调经济系统、社会系统与自然系统的共生性和发展目标的多元化，即三大系统的整体性与协调^[27]。文献梳理发现，当前绿色发展概念界定较为模糊，更多偏重于经济、社会或自然某一方面。如绿色生产、绿色创新、绿色经济、绿色技术和绿色全要素生产效率等相关概念，这使得研究者在初期概念界定模糊，导致其评价体系构建不合理，很难系统、完整地体现出生态文明建设背景下绿色发展的综合评价。因此，研究尝试结合前人研究基础，综合经济、社会与自然三大系统，重新梳理定义了绿色发展概念理论框架（图1）。该理论框架由“目标层—内涵层—基准层”复合成一个三圈作用的交互系统：① 最外部第一圈层是由经济系统（Economic System）、社会系统（Social System）和自然系统（Natural System）组成的基准层。此圈层中不同子系统内部由多重要素构成，形成各自独立的体系。如在经济系统中，以产业集聚、生产优化、科技创新和经济全球化组成的新型经济系统发展要素内涵，这些要素支撑着绿色发展。社会系统则包含智慧城市、社会福利、财政扶持等新时期、新思想指导下的发展理念，更加强调社会福利与人民福祉。自然系统则以“水、土、气、生、地”五大要素为依据，各要素交互耦合形成自然圈层的绿色发展基准。② 第二圈层是以绿色福利（Green Benefit）为目标，绿色财富（Green

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

研究数据来源涵盖3个部分：①自然与环境数据。年均气温和年降水量数据来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site>)，原始数据为全国756个气象站点的逐月数据，剔除异常站点值后，将剩余703个站点数据计算全年均值，并采用Kriging插值方法生成全国2005-2015年年均气温和年降水量时间序列的栅格数据。PM_{2.5}遥感反演浓度数据，采用美国国家航空航天局(NASA)公布的2004-2016年全球大气PM_{2.5}浓度栅格数据作为基础研究数据 (<http://earthdata.nasa.gov>)，分辨率为0.01°。采取前后3年均值作为中间年份PM_{2.5}浓度^[28]。MODIS NDVI数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像中心，2005-2015年中国区域NDVI植被指数合成产品TERRA的MODND1M的月合成数据，空间分辨率为500 m，借助ArcGIS 10.2平台将原始数据进行逐月合成处理后，生成相应年的NDVI数据。②基础地理信息数据。矢量行政边界图来源于国家基础地理信息中心提供的1:400万中国基础地理信息数据。本文选取了中国285个地级以上城市，不包括台湾、香港和澳门地区。为保持空间连续性和便于分析，将个别时序上不统一的城市，包括安徽省巢湖市、海南省三沙市和儋州市、贵州省的毕节市和铜仁市以及青海省海东市做剔除处理。③社会经济数据。固定存量、单位从业人数、城市职工平均工资、城市绿地面积等统计数据，主要来源于2006-2016年的《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》以及中经网统计数据库，各城市专利申请授权数量来源于中国国家知识产权局(SIPO)专利检索数据库。对于部分缺失的数据通过地区官方网站数据进行调整和补充。将所有自然本地要素和人文社会要素导入ArcGIS中，构建2005-2015年中国城市绿色发展效率时空数据库。

3.2 研究方法

3.2.1 SBM-Undesirable模型 城市发展过程中除期望产出以外，还会产生环境污染等非期望产出。传统径向DEA模型未能考虑到无效DMU松弛变量部分，因此对于存在非期望产出的效率测度存在偏差。为了修正松弛变量，Tone提出了SBM-Undesirable模型(Slack-based Model-Undesirable)，能有效解决投入产出变量的松弛性与非期望产出问题，准确评价中国城市绿色发展效率^[28]。本文采用投入视角下考虑非期望产出的、固定规模报酬不变的SBM-Undesirable模型对中国城市绿色发展效率进行测度。其公式如下：

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^x / x_{kn}^t}{1 + \frac{1}{M+1} \left(\sum_{m=1}^M s_m^y / y_{km}^t + \sum_{i=1}^I s_i^b / b_{ki}^t \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kn}^t + s_n^x = x_{kn}^t, & (n=1, 2, \dots, N) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t y_{km}^t - s_m^y = y_{km}^t, & (m=1, 2, \dots, M) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t + s_i^b = b_{ki}^t, & (i=1, 2, \dots, I) \\ z_k^t \geq 0, s_n^x \geq 0, s_m^y \geq 0, s_i^b \geq 0, & (k=1, 2, \dots, K) \end{cases} \quad (1)$$

式中： ρ 为目标效率值； N 、 M 、 I 分别表示投入、期望产出和非期望产出个数； $(x_{kn}^t, y_{km}^t, b_{ki}^t)$ 表示第 k 决策单元在 t 时期的投入产出值； (s_n^x, s_m^y, s_i^b) 分别为投入、期望产出

和非期望产出的松弛量； z'_k 为决策单元的权重向量。

3.2.2 区域差异测度 引入泰尔指数 (Theil) 来测度城市绿色发展效率的区域差异程度^[29]。泰尔指数存在可分解特性，可将其分解为区域内差异和区域间差异，对城市绿色发展效率区域差异结构及其来源可进行有效分解。其公式如下：

$$\begin{aligned} Theil &= Theil_w + Theil_b \\ Theil_w &= \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{n} \frac{\bar{x}_i}{\bar{x}} \right) Theil_i \\ Theil_b &= \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} \left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}} \right) \ln \left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

式中： m 表示区域分类数量； n_i/n 表示不同区域群组内城市占比； \bar{x}_i/\bar{x} 表示各城市绿色发展效率均值与全国均值之比； $Theil_i$ 表示 i 城市的绿色发展效率的泰尔指数； $Theil_w$ 和 $Theil_b$ 分别表示整体区域内与区域间城市绿色发展效率差异。

3.2.3 空间马尔科夫链 空间马尔科夫法 (Spatial Markov Chain) 由马尔科夫法与空间滞后相结合而形成，可以较好地分析城市绿色发展效率变化过程中的空间相互作用关系^[30]。通过对比空间与非空间矩阵中相对应的元素，能得出城市绿色发展效率类型转移概率与周围相邻城市间关系，揭示以不同类型城市为邻居城市绿色发展效率类型转移的空间溢出效应。将城市绿色发展效率离散为 k 种类型，将传统的 $N \times N$ 阶状态转移概率矩阵分解为 k 个 $N \times N$ 阶转移概率矩阵形式，能够清晰地表达出不同时空背景下，城市绿色发展效率提高或降低的可能性。以第 N 个条件矩阵为例， $P_{ij}(k)$ 表示以某个城市以空间滞后类型 k 为条件时，从 t 年 $t+1$ 年由状态 i 转移到状态 j 的空间转移概率。空间滞后类型 (k) 由其绿色发展效率值在初始年份的空间滞后值划分。其公式如下：

$$P_{ij,t+1}(k) = P_{ij,t}(k) \times N \times W_k \tag{3}$$

式中： N 为 $N \times N$ 的转移矩阵； W_k 为空间滞后项类型； $P_{ij,t+1}$ 为 $t+1$ 年份以 k 为空间滞后条件下的第 k 种类型的概率矩阵。

3.3 评价体系构建

基于前文绿色发展“三圈系统理论”与“城市绿色发展效率空间作用模型”，以投入—产出模型为基础，建立中国城市绿色发展效率投入产出指标体系（表1）。投入方面选取资本、劳动力、技术、资源等要素。具体地，选取资本存量代表资本投入，选取历年劳动从业总人数代表劳动力投入，选取各地科技与教育事业财政支出代表技术投入，

表 1 中国城市绿色发展效率评价体系
Tab. 1 The evaluation system of UGDE in China

类型	一级	二级	三级
投入	资本要素	固定资本存量	全社会固定资产投资总额
	劳动力要素	单位从业人数	年末单位从业人数
	技术要素	专利授权量	各地专利申请授权数量
	资源要素	水、土、能源消费总量	供水总量、城市建成区面积、全社会用电量 人工和天然气供气量、液化气供应量
产出	期望产出	经济效益	国内生产总值(2005年不变价)
		社会效益	城市职工平均工资、社会消费品零售总额
		环境效益	城市绿地面积、绿地覆盖率、工业固体废物综合利用率 污水处理厂集中处理率、生活垃圾无害化处理率
	非期望产出	环境污染	工业废水排放量、工业SO ₂ 排放量、工业烟尘排放量

资源投入则以水、土、能源总量消费总量来表示。期望产出方面,选取各地区国内生产总值反映经济效益,社会效益指数综合反映社会产出,环境效益指数反映环境“好”的产出。此外,考虑到发展过程中由于废弃物排放对生态环境造成的价值亏损,因此将环境污染指数作为非期望产出要素纳入评价体系内,把资源环境约束作为评价绿色发展效率的重要因素。运用熵值法综合计算各城市的资源要素、社会效益指数、环境效益指数以及环境污染。国内生产总值根据各省GDP的平减指数调整为2005年不变价格。由于资本存量无法直接获取,因此用全社会固定资产投资总额表示资本存量。

4 中国城市绿色发展效率时空分异特征

科学识别中国城市绿色发展效率分布特征,探究国土空间上城市绿色发展效率时空分布规律,对宏观把握绿色发展政策实施情况以及理清内部时空过程具有重要意义。

4.1 中国城市绿色发展效率时序演进特征

基于SBM-Undesirable模型分别测度2005-2015年中国285个地级以上城市绿色发展效率(Green Development Efficiency, GDE)与其区域差异指数(Theil Index)(图3)。结果发现,2005-2015年中国城市绿色发展平均配置效率总体呈现“下降—上升—下降—上升”的“W”型波动过程,区域差异表现为与其对应相反“M”型变化特征。GDE具有三阶段演进特征,即第一阶段(2005-2008年),城市绿色发展效率处于波动下降,由

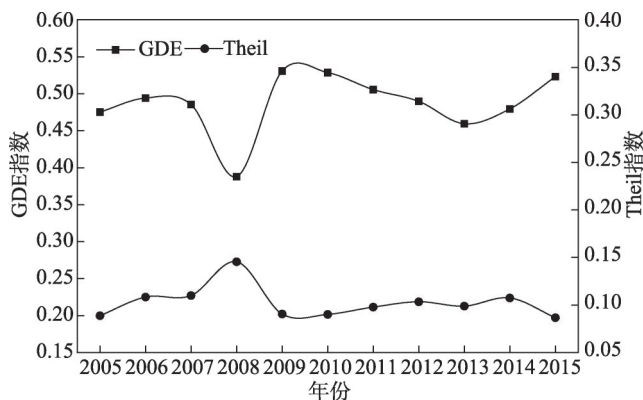


图3 2005-2015年中国城市绿色发展效率变化趋势

Fig. 3 The temporal evolution of UGDE in China from 2005 to 2015

2005年0.475减小至2008年的0.388,减小了24%。与此同时,区域差异在迅速扩大,从2005年0.089增加至2008年0.145,增加了64%。此阶段在中国加入世界贸易组织后,实现了“软着陆”,国际贸易合作逐步加深。一方面改善了中国落后的技术生产条件,提高了资源配置效率,但由于技术提升所带来的环境污染加剧和资源不节约使用,引发了严重的环境生态问题,工业环境污染等非期望出不断增多,使得GDE不断减小。另一方面,此时正值中国“十一五”规划初期,区域协调发展问题成为阻碍GDE提升的另外原因。GDE水平降低的同时,区域差异不断扩大,印证了此阶段中国城市绿色发展矛盾显著,发展极化现象较为明显。第二阶段(2008-2009年),GDE处于迅速提升阶段,由2008年0.388增加到2009年的0.531,变化幅度为37%。并且在此时期内,区域差异又得到很好地控制,泰尔指数由2008年的0.145降低到2009年的0.091,降低了61%。GDE水平提升、区域差异缩小,成为后金融危机时代中国践行低碳、绿色可持续发展道路的缩影。政府制定了各地区节能减排的约束性目标,并建立相应的“目标责任体系”来强化地方政府环境管理的责任,以及采取“十大重点节能工程”“淘汰落后产能”等具体政策措施。政策指引与生产生活中零排放目标的实施,促进着中国城市绿色转型提升,致使城市绿色发展效率得到了较大幅度提升。第三阶段(2009-2015年),GDE整体呈现“V”型变化,区域差异则呈现倒“V”字马鞍形。在“十二五”规划中,政府越来越重

视结构性调整、节能减排和区域协调发展。因而，城市绿色发展效率在经历了初期调整造成的下降期向逐步上升转变，区域差异程度也逐渐缓和。

4.2 中国城市绿色发展效率空间分异特征

为了探讨多视角不同区域、不同城市群等级及不同规模城市绿色发展效率的时空特征，按照中国经济地理发展格局和地域空间特征将中国划分为3大区域、20个城市群和5个城市等级进行系统分析。三大区域包括东部地区、中部地区和西部地区；20个城市群参考国家“5+9+6”城市群规划建设目标将城市群划分为国家级、区域性和地方性城市群^[31]；重点城市依据《中小城市绿皮书》，按2005-2015年间城市市辖区平均常住人口将中国城市划分为超大、特大、大、中和小城市^[32]。

4.2.1 总体分布特征 根据2005-2015年城市绿色发展效率计算结果，参考已有研究对效率测度划分标准，以0.25、0.50和0.75为临界值进行空间可视化制图，反映中国城市绿色发展效率的空间分异特征（图4）。中国城市绿色发展效率呈现集聚化连片发展特点，以核心大城市为中心，分布具有明显的地带差异性。2005年、2008年、2009年和2015年广州市、深圳市、海口市等13个城市均为城市绿色发展的高效率地区，这些城市主要分布于东部沿海、长江中游和东北地区。高效率地区在区位优势及政策优势的双重推动下，实现集约型模式下经济高质量增长的同时，通过先进的技术优势在产业结构优化及环境治理方面取得了较大进步，基本完成了从劳动密集型产业向资本密集型、知识技术

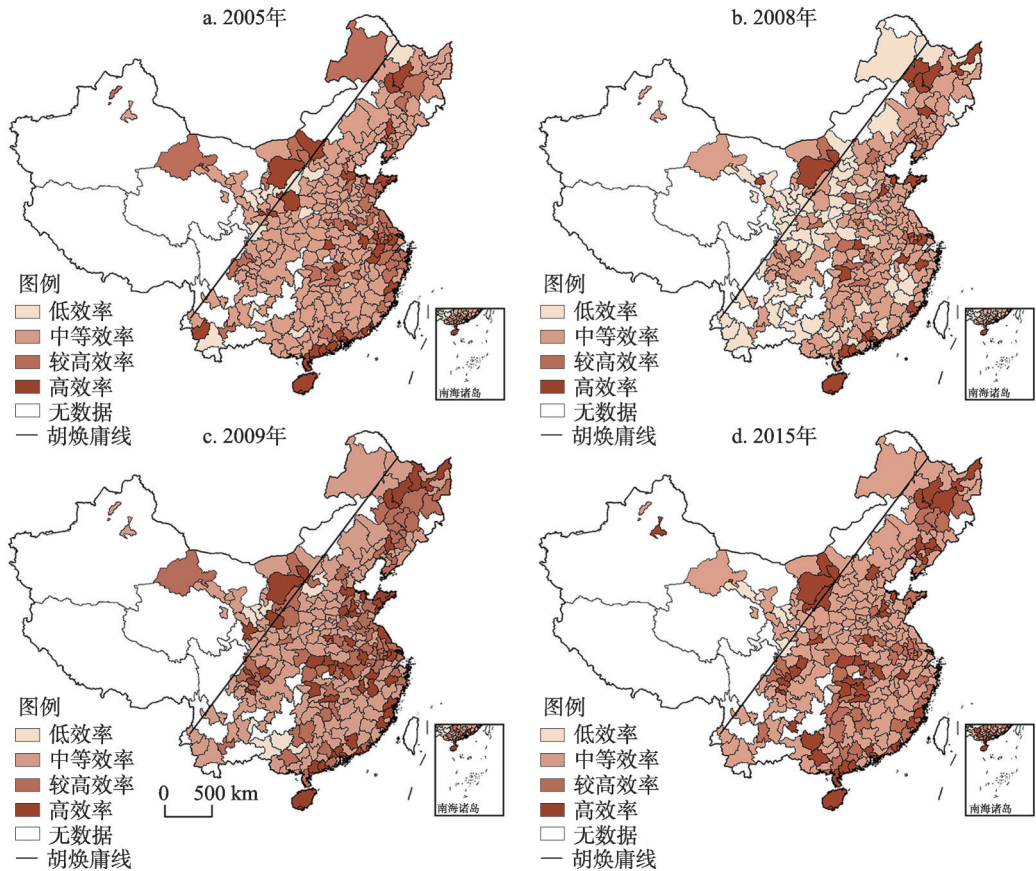


图4 2005-2015年中国城市绿色发展效率空间分布
Fig. 4 The spatial distribution of UGDE in China from 2005 to 2015

密集型的转化，劳动力和资源要素增长模式向依靠技术和资金转型，受资源环境压力与劳动力成本等倒逼形式的影响程度减弱，生态环境效益也较高。此外，投入要素配置不断转型升级，期望产出持续增加，环境污染等非期望产出不断减小，使得GDE可以维持较高水平。较高效率城市分布于高效率城市边缘，形成了以长三角城市群外围、山东半岛城市群和江淮城市群几个集中分布地带。中等效率城市广泛分布于中国大部分地区，但其分布范围逐渐缩减，长江中游地区得到明显提高。河南、陕西、四川、河北等省份依旧维持其中等效率格局，研究时段内无明显改变。而低效率的城市主要集中胡焕庸线两侧，集中分布于甘肃、云南、贵州和广西等省份部分城市。中等效率和低效率类型城市大多处于工业化中期阶段，受资源禀赋与区位条件双重约束严重，加之资源依赖性较强以及“两高一低”的产业结构特征造成发展的不可持续性，导致城市经济效益不断降低、生态环境质量明显下降，城市创新能力和产业活力不足，产业结构性矛盾与体制机制冲突，对城市三产不断挤压，导致经济发展面临瓶颈，使得其绿色发展效率一直处于较低水平。

4.2.2 三大区域差异现象 2005-2015年中国东、中、西三大地区城市绿色发展效率均呈现先下降后上升再下降最后上升的“W”型变化趋势，绿色发展效率均值分别为0.548、0.475和0.428，呈现出“东—中—西”阶梯状递减规律（图5）。具体来看，东部地区城市绿色发展效率在减小，由2005年0.569减小至2015年0.555。中西部地区城市绿色发展效率整体上在逐渐提升，增幅分别为18.89%与19.78%，增加幅度明显，绿色发展效率提升较大。西部地区GDE空间非均衡程度最大（0.033），东部地区次之（0.032），中部地区最小（0.031），其内部差异均高于区域间的差异，由此可以看出三大区域内部发展不均衡是制约绿色发展效率提升关键之所在。东部地区内部差异占比不断提升，自2005年泰尔指数占比29.64%提高至2015年的30.77%。东部地区依靠自身的资源禀赋条件，具有较强的资源环境净化能力。随着对外开放、科技创新和信息技术溢出，其对资源及环境的压力逐渐减少，多年来GDE一直保持中高速稳定增长，成为三大区域中最高地带。中部地区内部差异最小，但研究时段内区域内部差异占比不断提高，到2015年占总体差异的35.78%。随着工业化城镇化的调整与转型，中部地区一些工业城市发展的资源枯竭问题逐渐凸显，以资源开发早、规模大为特征的中部地区过早步入工业枯竭时期，经济发展长期积累的结构性问题爆发，体制机制弱化、创新创业活力不足等诸多问题不断出现，导致发展的可持续性难度加大。初期GDE区域均衡性较强，在城市发展与转型过程中，由于政府战略与政策的实施给中部城市所带来产业转移，不仅难以缩小东部与中部的经济发展水平差距，还可能使得中部地区要承受大部分的环境负外部性与环境污染相关的福利损失，从而成为东部的“污染避难所”。研究期内，西部地区GDE总体水平较低，各

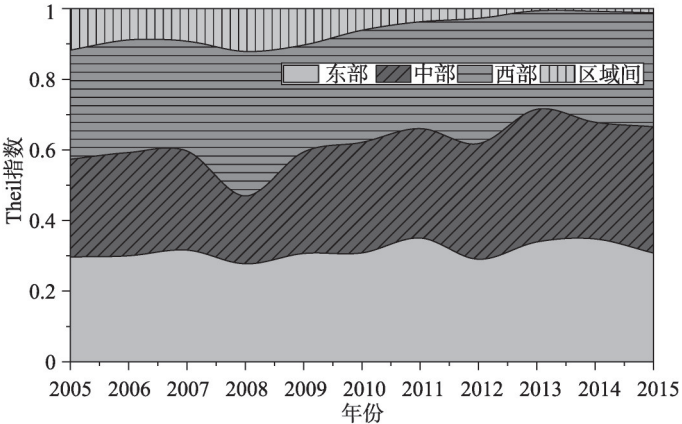


图5 2005-2015年中国东中西三大区域城市绿色发展效率泰尔指数及其分解

Fig. 5 The Theil index and its decomposition of UGDE in three regions of China from 2005 to 2015

城市大多处于较低水平。由于城市发展以内向型经济为主,受政策影响较大,因而其在发展过程中不仅受到路径依赖的桎梏,还要消耗大量的资源。加之地区经济模式单一、市场机制不完善,因此效率始终低于东部和中部地区。出于经济平衡发展的考虑,国家实施以产业转移等不同形式的区域协调发展战略,和对中西部采取相对宽松的节能减排规制政策都可以理解,但这可能会驱使中西部重蹈东部覆辙,走上“先发展后治理”的老路,因此期望通过产业转移和形成环境政策差异来促进中西部更好更快发展似乎并不是一条有效途径。在限制高耗能、高污染产业向中西部转移的同时,切实推动技术、人才和信息向中西部转移,积极引导中西部发展高新技术产业才是真正行之有效的策略。

4.2.3 多等级城市群发展规律

2005-2015年间,不同等级城市群绿色发展效率均有所增加,这也符合整体绿色发展效率提高的特征。各城市群城市绿色发展效率呈现出国家级城市群>区域性城市群>地方性城市群倒金字塔递减的集群增长特征(图6)。国家级城市群城市绿色发展效率均值最高,但其在研究期内表现出先减小再增加后稳定的变化趋势,由2005年的0.546变化到2015年的0.553,整体上只提升了1.20%,其绿色发展效率水平较高但提升

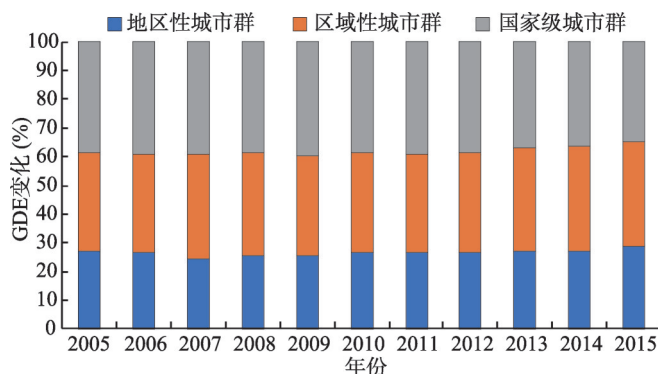


图6 2005-2015中国城市群绿色发展效率多等级演变规律

Fig. 6 The multi-level evolution of UGDE in urban agglomerations of China from 2005 to 2015

不明显。区域性城市群城市绿色发展效率均值次之,其增加幅度明显高于国家级城市群,自2005年到2015年增加了16.81%,有追赶趋势。地区性城市群研究初期城市绿色发展效率最低,但其增长幅度最大,由2005年的0.383增加到2015年的0.457,增幅为19.20%。从3种等级城市群绿色发展效率的变化可以看出,国家级城市群作为国家重点发展的地区,尽管其具备高的资源配置效率,但受制于资源环境、社会发展以及经济增长多方面的压力制约下,高起点的国家级城市群地区绿色发展效率提升不明显。反而是由非核心城市和区域性城市组成的区域性城市群与地方性城市群,能在提高自身发展的同时,稳步提高绿色发展效率。城市群等级越高,其内部各城市联系越紧密,城市发育程度越好,其城市绿色发展效率也就越高。在国家制定生态文明建设与绿色发展政策号召下,其具备很好的响应能力。如成渝城市群凭借西部大开发战略,以及“国家城乡统筹重点改革示范区”,形成“双轮驱动”促使绿色发展效率的迅速发展。长江中游城市群则充分利用中部崛起战略机遇,以及武汉城市圈、长株潭城市群“两型社会改革试验区”发展契机获得长足进步。长三角、珠三角、京津冀城市群凭借其在技术进步、产业升级、资源利用、环境保护等方面的优势,在绿色发展道路上保持较大领先。

4.2.4 不同规模城市等级结构 中国城市绿色发展效率与人口规模呈现出正相关关系,表现出“超大城市>特大城市>大城市>中等城市>小城市”的等级规模特征(图7)。2005-2015年超大、特大、大、中和小城市绿色发展效率均值分别为0.617、0.519、0.463、0.435和0.426,不同等级城市绿色发展效率差距较大,呈现明显等级递减规律。除小城市外,研究期内其余各类城市绿色发展效率都有所提高。超大城市绿色发展效率占比增幅最大,增加了34.81%,提高最为突出。中等城市、大城市与特大城市绿色发展效率占

比较为稳定，研究期内分别稳定在18%、18%和21%左右，分别占总体城市绿色发展效率的1/5左右，无明显波动，小城市绿色发展效率在研究期内占比降低了5%。可见，城市绿色发展效率与人口规模呈现出正相关关系，城市规模越大，其在资源配置中集聚规模优势更加明显。人口集聚带来充足的劳动力，为城市可持续性增长提供绿色发展效率动力。伴随着不同等级城市之间出现的绿色发展效率“势差”，这种等级势差将通过不同途径影响城市绿色发展效率的提升。因而，对不同规模城市内部差异调控与管理是中国城市绿色发展效率提升的破解路径之一。

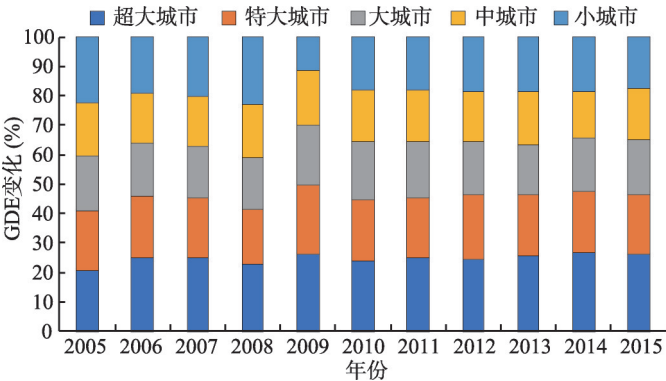


图7 2005-2015年中国城市绿色发展效率规模结构特征
Fig. 7 The characteristics of scale and structure of UGDE in China from 2005 to 2015

4.3 中国城市绿色发展效率时空动态特征

由于传统马尔科夫转移矩阵只关注类型之间的变化，缺乏空间视角，无法说明不同区域相互作用背景下中国城市绿色发展效率的时空动态转移特征。因此，采用空间马尔科夫转移矩阵分析，将有助于更好揭示城市绿色发展效率的时空动态特征。参考城市绿色发展效率时空分布特征，把城市绿色发展效率分成低效率（0~0.25）、中等效率（0.26~0.50）、较高效率（0.51~0.75）、高效率（0.76~1.00）4种类型，整个研究过程划分为3个时间段：2005-2008年、2008-2009年和2008-2015年（表2）。

中国城市绿色发展效率存在显著空间溢出效应，相邻城市间绿色发展效率受到彼此

表2 2005-2015年城市绿色发展效率空间马尔科夫转移矩阵
Tab. 2 The spatial Markov transfer matrix of UGDE in China

类型	2005-2008年					2008-2009年				2009-2015年			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	1	0.847	0.097	0.028	0.028	0.762	0.119	0.071	0.048	0.844	0.131	0.010	0.015
	2	0.292	0.477	0.200	0.031	0.190	0.238	0.476	0.095	0.202	0.551	0.191	0.056
	3	0.167	0.250	0.417	0.167	0.167	0.417	0.250	0.167	0.000	0.275	0.625	0.100
	4	0.111	0.111	0.222	0.556	0.222	0.000	0.000	0.778	0.034	0.052	0.190	0.724
2	1	0.674	0.304	0.022	0.000	0.357	0.500	0.071	0.071	0.805	0.161	0.011	0.023
	2	0.250	0.515	0.176	0.059	0.154	0.346	0.385	0.115	0.167	0.592	0.225	0.017
	3	0.118	0.196	0.549	0.137	0.045	0.091	0.500	0.364	0.016	0.203	0.626	0.154
	4	0.000	0.043	0.087	0.870	0.000	0.000	0.222	0.778	0.010	0.051	0.153	0.786
3	1	0.740	0.260	0.000	0.000	0.455	0.364	0.091	0.091	0.692	0.282	0.013	0.013
	2	0.280	0.480	0.200	0.040	0.176	0.294	0.471	0.059	0.130	0.652	0.174	0.043
	3	0.082	0.219	0.548	0.151	0.077	0.231	0.308	0.385	0.017	0.182	0.645	0.157
	4	0.019	0.074	0.148	0.759	0.000	0.100	0.200	0.700	0.009	0.026	0.183	0.783
4	1	0.833	0.133	0.033	0.000	0.600	0.400	0.000	0.000	0.838	0.162	0.000	0.000
	2	0.207	0.517	0.241	0.034	0.056	0.389	0.556	0.000	0.120	0.652	0.163	0.065
	3	0.049	0.246	0.557	0.148	0.000	0.111	0.500	0.389	0.010	0.286	0.480	0.224
	4	0.000	0.010	0.237	0.753	0.000	0.042	0.042	0.917	0.000	0.031	0.221	0.748

注：1. 低效率城市；2. 中等效率城市；3. 较高效率城市；4. 高效率城市。

相互影响。总体上,高绿色发展效率的城市对与其相邻城市释放显著正向溢出,反之,低效率城市则存在负向溢出。与高效率类型相邻的城市,其GDE类型向上转移的概率较大,而向下转移的概率较低,反之亦然。具体地,2005-2008年,低效率类型向上转移的概率平均为0.226,而与中等效率和较高效率城市为邻时,其转移概率分别增加到0.326和0.260,而当与低效率类型为邻时,其向上转移的概率降至0.153。2008-2009年,低效率类型与低效率类型相邻向上转移的概率为0.238,小于其与中等效率、较高效率和高效率为邻时向上转移的概率0.195、0.308和0.162。相应地,高效率类型与低效率类型为邻时向下转移概率为0.222,大于其与高效率类型为邻时向下转移的概率0.084。2009-2015年,低效率类型与低效率类型相邻向上转移概率(0.156)小于其与高效率类型为邻向上转移概率(0.162),高效率类型与高效率类型为邻向下转移概率(0.252)也小于其与低效率类型为邻向下转移概率(0.276)。此外,与不同类型城市相邻时,城市绿色发展效率保持其自身不变的概率均大于其向上或是向下转移的概率,这说明了中国城市绿色发展效率同时也存在较强的“俱乐部趋同”现象,各类型时空变化存在一定的时空惯性。对比3个不同研究时期,2008-2009年低效率、中等效率和较高效率向下转移概率均高于其他两个时段,即区域绿色发展效率存在明显提高。这与城市绿色发展效率自2008-2009年整体效率水平增加现象吻合,说明具体各城市效率的同时增加,是整体绿色发展水平提高的关键原因。但是,在3个时期内低效率维持其自身概率均高于其他类型,表明在区域空间依赖性作用背景下,城市间正向溢出效应对落后地区绿色发展效率提升相对有限,未来着力提高低效率类型城市绿色发展效率,促进正向溢出效应发挥更大作用将会给中国城市绿色发展的全面提升带来新局面。

5 中国城市绿色发展效率影响因素解析

中国城市绿色发展效率时空分异特征明显,不同地区、城市群及不同规模城市间GDE存在明显的区域差异性与空间关联性。“经济—社会—环境”三系统交互耦合作用下,不同自然本底条件与人文社会发展因素的非均衡性相互交织、相互影响,奠定了中国城市绿色发展效率时空格局变化过程的复杂性。因此,本文试图从人地关系地域系统入手,构建城市绿色发展效率影响因素模型,系统量化多因素作用下绿色发展效率演变的作用机制(图8)。

5.1 模型设定与变量选取

研究拟从自然本底要素和人文社会发展两个角度探究导致中国城市绿色发展效率时空格局演变的影响因素,并对中国城市绿色发展效率的“环境库兹涅茨假说”与“波特假说”进行验证检验。自然本底要素上,从水、土、气、生四方面初步选定的包括年降水量、年均气温、PM_{2.5}浓度和植被覆盖度,分别表示城市降水条件(*pre*)、城市气温(*temp*)、植被覆盖度(*ndvi*)以及环境质量(*eq*)。人文社会方面,采用人均国内生产总值(*rgdp*)来衡量宏观经济实力,预期其回归系数为正。绿色发展是中国新时期生态文明建设的主要方策略,其更加强调环境系统与经济社会系统协调发展,通过对生态环境的规制作用,提高资源要素配置效率,增强经济社会发展程度。因此,发展过程中对经济增长与技术创新值得具体思考。通过人均国内生产总值的平方(*rgdp*²)来检验城市绿色发展效率的环境“EKC”效应^[33]。根据“Porter假说”理论,严格的环境保护政策,不但不会导致成本增加,反而可能促进技术创新,使得在新的竞争中获得相对优势,促进其自身发展^[34]。因此,采用科技支出占地区财政收入比重来反映技术创新

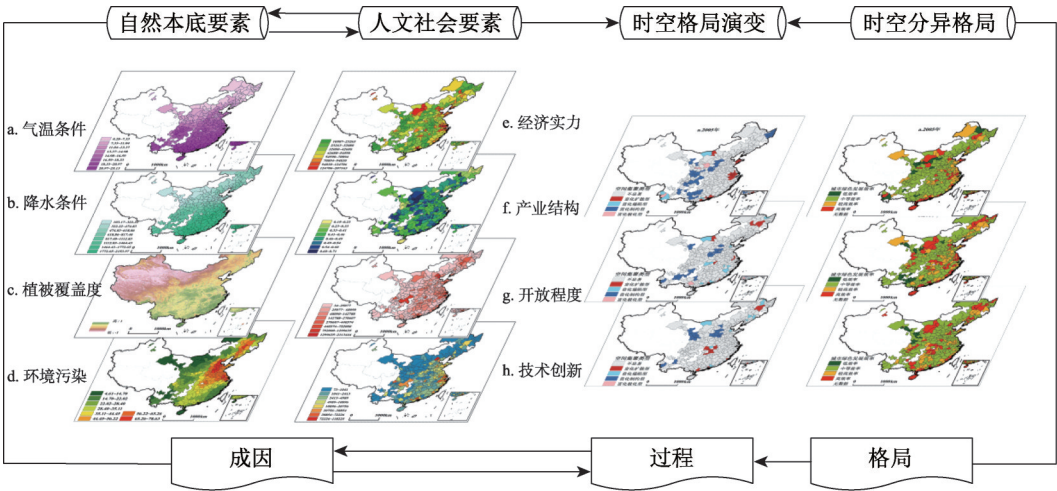


图8 中国城市绿色发展效率综合影响机制

Fig. 8 The comprehensive influence mechanism of UGDE in China

(*te*), 检验绿色发展政策的实施是否存在“Porter假说”现象。经济全球化进程显著影响着城市产业增长, 产业通过利用外商直接投资参与经济全球化, 强化自身比较优势, 吸收先进科学技术和管理经验, 积极获取知识溢出和创新活动以推动产业增长。但同时, 外资资本比例较高的产业通常是技术或资本密集型产业, 产值总量较大, 其增长率相对较低。另外, 外资也有可能产生竞争挤占作用, 从而影响产业增长, 不利于城市绿色发展效率提升。采用当年实际利用外资总额(*fdi*)表示各城市开放程度, 检验是否存在“污染物避难所效应”和“污染物天堂”假说, 预期系数不确定^[35]。此外, 本文还选取城市产业结构(*is*), 选取城市第二产业产值占GDP比例来衡量城市产业结构合理化和高级化程度, 预期其回归系数为负。

由于城市绿色发展效率介于0~1之间, 存在明显截断现象, 一般计量模型无法准确估计。因此, 本文引入面板Tobit计量模型对中国城市绿色发展效率的影响因素进行估计分析, 其计算公式为:

$$GDE_i^* = \beta_0 + \beta_1 \ln rgdp_i + \beta_2 \ln (rgdp)_i^2 + \beta_3 \ln is + \beta_4 \ln fdi_i + \beta_5 \ln te_i + \beta_6 \ln temp_i + \beta_7 \ln pre_i + \beta_8 \ln PM_{2.5i} + \beta_9 \ln ndvi_i + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \tag{4}$$
$$GDE_i = \begin{cases} GDE_i^*, & 0 < GDE_i^* \leq 1 \\ 0, & GDE_i^* \leq 0 \end{cases}$$

式中: GDE_i 为各城市绿色发展效率; β_0 为常数项系数; β_i 为各影响要素回归系数; ε_i 为随机误差项系数。在实际研究中只能观测到 GDE_i , 而观测不到 GDE^* 。在可观测范围内, 有 $GDE_i = GDE^*$, 模型运用极大似然估计法(MLE)来估计系数 β_i 。通过对各要素的多重共线性诊断与描述性统计和相关性检验, 显示各解释变量之间相关性较弱, 不存在多重共线性问题。

5.2 综合作用机制

模型(1)、模型(2)、模型(3)分别是对人文社会因素、自然本底条件和综合自然与人文各要素的回归结果(表3)。从各模型拟合结果来看, 对比对数似然比(Log-likelihood)、个体效应标准差(σ_u)、随机误差项标准差(σ_e)和 ρ , 发现模型(3)估计效果最佳。验证了基于人地关系地域系统框架下, 从自然本底和人文社会两个

表3 中国城市绿色发展效率影响因素估计结果
Tab. 3 The estimation results of influencing factors of UGDE in China

	变量	模型(1)	Z值	模型(2)	Z值	模型(3)	Z值
人文社会因素	<i>rgdp</i>	0.025***	3.68			0.030***	4.20
	<i>rgdp</i> ²	0.013***	3.68			0.015***	4.20
	<i>is</i>	0.087*	1.55			0.089*	1.58
	<i>fdi</i>	0.007**	2.07			0.005*	1.50
	<i>te</i>	-0.439***	-6.64			-0.453***	-6.84
自然本底因素	<i>temp</i>			0.005**	2.32	0.007***	3.21
	<i>pre</i>			-0.004	-0.67	-0.001	-0.40
	<i>eq</i>			0.0001	0.28	0.0004	0.38
	<i>ndvi</i>			0.119*	1.67	-0.027	1.01
	<i>C</i>	0.212***	-3.71	0.723***	-3.62	0.099***	1.01
相关检验	<i>sigma_u</i>	0.181		0.187		0.178	
	<i>sigma_e</i>	0.139		0.141		0.139	
	<i>rho</i>	0.628		0.638		0.621	
	似然比检验	1305.72		1262.74		1312.67	

注：***、**、*分别表示通过99%、95%和90%显著性水平检验。

角度剖析城市绿色发展效率的合理性，表明城市绿色发展受人文和自然双重机制作用。就全国整体285个城市而言，人文社会因素中对城市绿色发展效率影响程度最大的是技术创新，其回归系数为-0.247，通过了99%显著性水平检验，与GDE之间存在显著负向作用。经济实力、产业结构和开放程度的回归系数分别为0.068、0.016和0.015，分别通过了99%、90%和95%的显著性水平检验，均对城市绿色发展效率产生正向影响，影响程度依次递减。自然本底要素中，只有城市气温通过了99%显著性水平检验，其回归系数为0.016。即年均气温每提高1%，城市绿色发展效率相应地提升0.016%。环境质量、植被覆盖度对城市绿色发展效率产生正向促进作用，但不显著。降水条件与城市绿色发展效率呈负向关系，年均降水量越多，城市绿色发展效率也会受到相应地抑制，但其作用并不明显。

人地关系地域视角下，人均GDP的平方项回归系数为0.068，通过了99%显著性水平检验，表明经济发展与城市绿色发展效率之间存在“U”型曲线关系。城市绿色发展效率可以看成是在生态文明和绿色发展政策背景下的一种环境规制手段，其效率提升会减少环境污染，因此可以把它理解成为环境污染的负向替代指标。那么，环境污染与经济发展之间的“环境库兹涅茨”曲线，可以从城市绿色发展效率与经济发展二者之间存在的“U”型关系来解读，即2005-2015年中国城市绿色发展与经济增长之间存在环境“EKC”效应。对外开放对GDE具有明显促进作用，说明在2005年以来，中国的发展不再依赖于外商投资，经济社会发展外向性逐渐减弱，因此中国已较为成功地跨越过发展中国家普遍存在的“污染避难所效应”以及“污染物天堂之说”阶段。伴随着科学发展观与可持续发展理念的不断引入，中国对于外商投资进行多方面考量，既要符合经济发展需求，也不能以损害自身环境为代价。这一现象很好地诠释了在1978年改革开放以来国家对于外商投资利用的角色转变，正逐渐符合生态文明建设与绿色发展政策要求。技术创新在解决生态环境问题和维持生产率增加方面均能发挥重要作用，将城市绿色发展效率作为一种环境规制手段，其与技术创新存在显著负向作用。依次对应的“Porter假说”主张积极环保政策，认为严格而恰当的环境规制能够刺激企业进行技术创新，其创

新效益可冲抵甚至超过环保成本,从而确保或提高企业的竞争力。从中国整体层面看,以提高城市绿色发展效率作为环境规制手段,其对各城市技术创新非但未起到积极促进作用,反而较大程度上抑制了技术创新水平的提升,存在明显的“绿色悖论”,技术创新“倒逼机制”尚未形成。根据波特假说,环境规制对企业技术创新乃至竞争力具有正的影响作用,但这是有条件的,即只有当一个国家或地区的经济水平发展到一定的程度时,“Porter假说”所描述的情况才可能出现。

6 结论与讨论

6.1 结论

(1) 2005-2015年中国城市绿色发展平均效率一直处于中等水平,由2005年的0.475增加到2015年的0.523,总体提高了10%。“下降—上升—下降—上升”的“W”型波动过程与区域差异“先增加后减小再波动”的“M”型变化规律相对应,城市绿色发展效率具有明显三阶段演进特征。2005-2008年GDE逐渐降低、区域差异不断扩大,到2008-2009年GDE迅速提高、区域差异快速缩小,2009-2015年GDE发展则相对较为均衡。城市绿色发展效率受政策影响较大,制定合理的区域发展政策,是进一步提高整体绿色发展水平的关键。

(2) “城市—区域—城市群”视角下,东、中、西三大区域GDE均呈现先下降后上升再下降最后上升的“W”型变化趋势,绿色发展效率均值分别为0.548、0.475和0.428,呈现出“东中西”阶梯状递减的特征。多等级城市群GDE存在“国家级城市群>区域性城市群>地方性城市群”倒金字塔递减的发展规律,且GDE与城市人口规模呈现正相关关系,“超大城市>特大城市>大城市>中等城市>小城市”的等级结构特征凸显。区域内差异大于区域间差异特征,研究尺度内部失衡是造成整体差异的主要原因。

(3) 中国城市绿色发展效率存在显著空间溢出效应,相邻城市间绿色发展效率受到彼此相互影响。总体上高效率城市对邻近城市释放显著正向溢出,低效率城市则存在负向溢出效应。与高效率类型相邻的城市,其GDE类型向上转移的概率较大,而向下转移的概率较低,反之亦然。此外,城市绿色发展效率保持其自身不变的概率均大于其向上抑或是向下转移概率,GDE类型转移存在较强的“俱乐部趋同”现象,GDE各类型时空变化存在一定的时空惯性。

(4) 人地关系地域系统视角下,人文社会因素影响程度远大于自然本底要素作用。人文社会因素中技术创新为核心驱动因素,与城市绿色发展效率存在显著负向作用。经济实力、产业结构和开放程度影响程度依次递减,影响程度回归系数分别为0.068、0.016和0.015,均对城市绿色发展效率产生正向影响。自然本底要素中城市气温的影响为正向,其每提高1%,GDE相应地提升0.016%。降水条件、环境质量、植被覆盖度对城市绿色发展效率作用不显著。

(5) 将城市绿色发展效率假设为一种环境规制手段,国家层面上经济发展的平方项系数显著为正,呈现“U”型关系,存在明显的环境“EKC”效应。对外开放与城市绿色发展效率呈显著正向相关,外商投资带来的污染转移效应不明显,反而会提高环境质量,“污染物避难所”效应不成立。技术创新对城市环境提高存在显著抑制作用,通过技术创新来提高环境质量在现阶段中国无法实现。

6.2 讨论

本文将城市绿色发展效率理解成为一种环境规制,以城市绿色发展效率程度反映生

态环境质量, 表征城市环境规制水平, 其时空格局及其影响因素研究, 对总体把控和推进中国城市绿色发展与生态文明建设具有借鉴意义, 同时也为验证西方发达国家理论在中国实际发展过程中是否成立提供可能。当前, 中国总体上存在环境“EKC”效应, 即经济发展的同时环境污染仍在持续。本研究也将为下阶段供给侧改革、经济结构调整、淘汰落后产能、绿色环保策略的制定, 实现经济增长与环境污染的脱钩发展提供前期探索积累。另外, “污染物避难所”效应在全国范围内未被证实, 这与中国对外商投资的结构筛选相关, 也反映出中国现阶段所面临的经济与环境问题, 更多地体现为自身的内生因素。如何调整好内部发展与污染之间关系, 成为实现绿色的关键。此外, “Porter假说”在现阶段中国得不到相应验证, 技术创新所带来的外部效益不能与现阶段中国各城市竞争力发展成本相持平, 使得积极环境保护政策未能刺激企业进行技术创新, 一定程度上抑制了经济增长。实施环境保护与经济增长之间并不冲突, 关键在于如何解决企业外部性成本与技术创新之间的关系。如何处理好环境保护、技术创新与经济增长三者之间关系, 对绿色的可持续性进程影响重大。

本文在梳理前人绿色发展研究基础上, 重新定义了绿色发展概念与内涵, 通过绿色发展“三圈系统理论”框架, 对绿色经济、绿色技术、绿色生产、绿色创新等概念进行了辨析, 进一步明确了相关概念界定与内涵解析。进一步利用城市绿色发展效率空间系统作用模型, 解析了城市绿色发展各系统、各要素间作用传导作用机制, 并用实证分析回应了理论假设。城市绿色发展效率时空格局的形成, 受自然本底与人文经济要素综合作用, 各要素相互作用形成了城市复杂人地系统的作用机制。各要素通过其自身演变或与其他要素间相互耦合胁迫, 不断塑造着城市系统内部发展, 城市绿色化进程以及绿色发展效率的提升。研究尝试借鉴综合地理学“格局—过程—成因”的思维逻辑, 以及人地关系地域系统研究框架, 为城市“公平”“包容”与“绿色”可持续发展提供新思路。这一目标与生态文明建设和绿色发展是高度契合的, 对进一步丰富人地关系理论, 切实解决生态环境问题提供了方法论支撑与研究视角的拓展。

参考文献(References)

- [1] Huang Maoxing, Ye Qi. The Marxist green development concept and green development in contemporary China: Comment on incompatibility theory between environment and development. *Economic Research Journal*, 2017, 52(6): 17-30. [黄茂兴, 叶琪. 马克思主义绿色发展观与当代中国的绿色发展: 兼评环境与发展不相容论. *经济研究*, 2017, 52(6): 17-30.]
- [2] Marc M F. Satellite images show China going green. *Nature*, 2018, 553(7689): 411-413.
- [3] Feng Tao, Zhang Huiqun, Hu Jun, et al. Dynamics of green productivity growth for major Chinese urban agglomerations. *Applied Energy*, 2017, 196: 170-179.
- [4] Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1788-1798. [车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析. *地理科学*, 2018, 38(11): 1788-1798.]
- [5] Ronald R K, Peter J S, Arvind P. Exploring the link between research and economic growth: An empirical study of China and USA. *Quality & Quantity*, 2016, 50(3): 1-19.
- [6] Haukkala, Teresa. A struggle for change: The formation of a green-transition advocacy coalition in Finland. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2018, 27: 146-156.
- [7] Zeng Ning, Ding Yihui, Pan Jiahua, et al. Sustainable development: Climate change - The Chinese challenge. *Science*, 2008, 319(5864): 730.
- [8] Brundtland G H, Khalid M, Agnelli S, et al. *Our Common Future*. New York: Island Press, 1987.
- [9] OECD. *Towards Green Growth: Monitoring Progress OECD Indicator*, 2011.
- [10] Lin Boqiang, Nelson I Benjamin. Green development determinants in China: A non-radial quantile outlook. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 764-775.

- [11] Liu Xuemin, Zhang Shengling. Chinese enterprise green transition: Target pattern, obstacles and countermeasures. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(6): 1-4. [刘学敏, 张生玲. 中国企业绿色转型: 目标模式、面临障碍与对策. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(6): 1-4.]
- [12] Choi Y, Bone C, Zhang N. Sustainable policies and strategies in Asia: Challenges for green growth. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016, 112: 134-137.
- [13] Huang Jianhuan, Lv Hailong, Wang Liangjian. Mechanism of financial development influencing regional green development: Based on eco-efficiency and spatial econometrics. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 532-545. [黄建欢, 吕海龙, 王良健. 金融发展影响区域绿色发展的机理: 基于生态效率和空间计量的研究. *地理研究*, 2014, 33(3): 532-545.]
- [14] Gu Chaolin. *Urban and Regional Planning Research: Green Development and Urban Planning Reform*. Beijing: The Commercial Press, 2015. [顾朝林. 城市与区域规划研究: 绿色发展与城市规划变革. 北京: 商务印书馆, 2015.]
- [15] Zheng Deifeng, Zang Zheng, Sun Caizhi, et al. Prediction and analysis of the transition to green economy in China based on the theory of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 7137-7147. [郑德凤, 臧正, 孙才志, 等. 基于生态系统服务理论的中国绿色经济转型预测分析. *生态学报*, 2014, 34(23): 7137-7147.]
- [16] Feng Tao, Zhang Huiqin, Hu Jun, et al. Dynamics of green productivity growth for major Chinese urban agglomerations. *Applied Energy*, 2016, 196: 170-179.
- [17] Bai Yu, Hua Congcong, Jiao Jianling, et al. Green efficiency and environmental subsidy: Evidence from thermal power firms in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 49-61.
- [18] Mu Xueying, Liu Kai, Ren Jianlan. Spatial differentiation and change of green production efficiency in China. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1006-1014. [穆学英, 刘凯, 任建兰. 中国绿色生产效率区域差异及空间格局演变. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1006-1014.]
- [19] Ma Hailiang, Ding Yuanqin, Wang Lei. Measurement and convergence analysis of green water utilization efficiency. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 406-417. [马海良, 丁元卿, 王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 406-417.]
- [20] Zhang J, Chang Y, Wang C, et al. The green efficiency of industrial sectors in China: A comparative analysis based on sectoral and supply-chain quantifications. *Resources Conservation & Recycling*, 2017, 132(5): 269-277.
- [21] Ray S C, Ghose A. Production efficiency in Indian agriculture: An assessment of the post green revolution years. *Omega*, 2014, 44(2): 58-69.
- [22] Lin Boqiang, Yang Lisha. Efficiency effect of changing investment structure on China's power industry. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 403-411.
- [23] Li Bin, Wu Shusheng. Effects of local and civil environmental regulation on green total factor productivity in China: A spatial Durbin econometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 153: 342-353.
- [24] Song Malin, Du Juntao, Tan Kimhua. Impact of fiscal decentralization on green total factor productivity. *International Journal of Production Economics*, 2018, 205: 359-367.
- [25] Zhang Jiangxue, Chang Yuan, Zhang Lixiao, et al. Do technological innovations promote urban green development? A spatial econometric analysis of 105 cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 395-403.
- [26] Zhao X, Liu C, Yang M. The effects of environmental regulation on China's total factor productivity: An empirical study of carbon-intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179: 325-334.
- [27] Hu Angang, Zhou Shaojie. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(1): 14-20. [胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 14-20.]
- [28] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [29] Zhang Guojun, Huang Wanling, Zhou Chunshan, et al. Spatio-temporal characteristics of demographic distribution in China from the perspective of urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1513-1525. [张国俊, 黄婉玲, 周春山, 等. 城市群视角下中国人口分布演变特征. *地理学报*, 2018, 73(8): 1513-1525.]
- [30] Pu Yingxia, Ma Ronghua, Ge Ying, et al. Spatial-temporal dynamics of Jiangsu regional convergence with spatial Markov chains approach. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 817-826. [蒲英霞, 马荣华, 葛莹, 等. 基于空间马尔可夫链的江苏区域趋同时空演变. *地理学报*, 2005, 60(5): 817-826.]
- [31] Fang Chuanglin, Mao Qizhi, Ni Pengfei. Discussion on the scientific selection and development of China's urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 515-527. [方创琳, 毛其智, 倪鹏飞. 中国城市群科学选择与分

- 级发展的争鸣及探索. 地理学报, 2015, 70(4): 515-527.]
- [32] Small and Medium-sized Cities Economic Development Committee of China Urban Economic Society. Report on the Development of Small and Medium-sized Cities in China. 2010, Green Development of Small and Medium-sized Cities. Beijing: Social Sciences Academics Press (CHINA), 2010. [中国城市经济学会中小城市经济发展委员会: 中国中小城市发展报告. 2010, 中小城市绿色发展之路. 北京社会科学文献出版社, 2010.]
- [33] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. Social Science Electronic Publishing, 1992, 8(2): 223-250.
- [34] Porter M E, Claas V D L. Toward a new conception of the environment: Competitiveness relationship. Journal of Economic Perspectives, 1995, 9(4): 97-118.
- [35] Copeland B R. International trade and the environment: Policy reform in a polluted small open economy. Journal of Environmental Economics & Management, 1994, 26(1): 44-65.

Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China

ZHOU Liang^{1,2}, CHE Lei³, ZHOU Chenghu²

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Green development is pivotal to resolving natural environmental constraints, solving national economic transition, and supporting and realizing the United Nations sustainable development goals. It is gradually growing into a crucial guideline for China's ecological civilization construction, "Beautiful China" development, and global economic transition and restructure. Based on a thorough review of the concept of green development, this paper accurately depicts a full picture of China's spatio-temporal patterns of urban green development efficiency (UGDE) in 2005-2015 by using SBM-Undesirable, the Theil index and the Spatial Markov Chain methods. Moreover, the influencing mechanism has been further discussed based on a quantitative analysis of both natural and human factors. Our results demonstrate that: (1) UGDE increased steadily by 10% from 0.475 in 2005 to 0.523 in 2015. And temporally, it shows a pattern of "W"-shaped fluctuated growth. (2) Spatially, UGDE decreased from eastern to central China, and further to western China. Besides, there is an inverted pyramid pattern of "national level > regional level > local level" urban agglomeration in UGDE growth. Moreover, there is a steady urban scale structure from super city to small city in UGDE. (3) There is an evident concentration of cities with high-level and low-level UGDE, indicating a significant influence of path dependence. (4) Quantitatively speaking, compared to natural factors, human factors such as economy size, industry structure, and openness level play a more important role in influencing the UGDE.

Keywords: green development; efficiency; spatial markov chain; spatio-temporal evolution; man-land relationship; sustainable development goals(SDGs)