

# 多源遥感数据支持下的县域尺度生态效率测算 及稳健性检验 ——以长江中游城市群为例

马 勇<sup>1</sup>, 童 昀<sup>1,2</sup>, 任 洁<sup>3</sup>

(1. 湖北大学绿色发展研究院, 武汉 430062; 2. 湖北大学商学院, 武汉 430062;

3. 昆士兰大学商学院, 澳大利亚昆士兰州 布里斯班 4072)

**摘要:** 生态效率是评价区域生态文明水平的重要依据,也是地理学与经济学开展资源环境综合研究的常用指标和变量,县域尺度生态效率测度的研究匮乏,制约了上述问题在县域层面上开展。在长江经济带生态优先和绿色发展国家战略下,以长江中游城市群为研究区域,依托多源遥感数据构建县域尺度生态效率测算指标体系,应用非合意产出超效率EBM模型测算2000-2015年县域生态效率,利用GIS空间分析工具揭示其时空分异规律和空间关联特征。并设计稳健性检验方案,对县域尺度生态效率测度路径科学性及其稳健性进行检验。结果表明:(1)各年份长株潭城市群和环鄱阳湖城市群所辖县域的生态效率均优于武汉城市圈所辖县域;(2)研究期内生态效率维持高位区域包括武汉市辖区等12个县市,生态效率持续低值区域包括瑞昌市等7个县市;(3)县域生态效率H-H集聚区由衡阳市、株洲市及其周边至2015年成片消失,L-L集聚区则按照顺时针走向,逐步形成围绕武汉市的闭合环形区域;(4)基于市域生态效率排名对比的稳健性检验表明,县域生态效率测度路径和结果具有较高可信度。

**关键词:** 生态效率; 县域; 遥感数据; EBM模型; 稳健性检验; 长江中游城市群

长江经济带是中国“T”型发展战略的重要组成部分,习近平总书记强调推动长江经济带发展必须坚持生态优先绿色发展的战略定位,涉及长江的一切经济活动都要以不破坏生态环境为前提,共抓大保护、不搞大开发。2018年习近平总书记再次考察长江,要求在坚持生态环境保护的前提下,推动长江经济带科学发展、有序发展、高质量发展。长江中游城市群地处“长江之腰”,在长江经济带生态文明和绿色发展进程中具有重要地位。《生态文明体制改革总体方案》明确要求建立生态文明绩效考核制度。生态效率即是有效考核区域经济社会发展绩效和度量区域生态优先和绿色发展水平的重要指标。近年来,生态效率也越来越多地作为一个非直接可获的指标和变量,被纳入到资源环境综合研究中<sup>[1-3]</sup>。因此以长江中游城市群为案例区,测度县域尺度生态效率,有助于将生态效率具备的理论价值和实践价值深化到县级尺度,对于精准认识长江中游城市群内部经济社会生态化发展格局态势,制定因地制宜的政策措施提高区域生态效率,促进生态效率落后区域加快绿色转型发展具有重要意义。

生态效率由德国学者Schaltegger等<sup>[4]</sup>首次提出,认为生态效率是价值增量与环境影响

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-04-01

基金项目: 国家社会科学基金青年项目(17CJY051); 湖北省政府智力成果采购重点项目(HBZD201705); 湖北省社会科学基金项目(2015190)

作者简介: 马勇(1959-),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,中组部国家“万人计划”领军人才,研究方向为生态文明与绿色发展。E-mail: mytcn@126.com

增量的比值。随后,包括世界可持续发展工商理事会(WBCSD)、经济合作与发展组织(OECD)、欧洲环境署(EEA)等在内的国际组织和研究机构从不同角度阐释了生态效率的内涵<sup>[5]</sup>。尽管上述定义有所差异,但都认为生态效率同时兼顾经济活动的生态效益和经济效益,强调在环境投入和环境负产出减量化的同时实现经济产出。国内外生态效率研究中,生态效率测度是一项基础和热点议题。按测算对象划分,主要包括特定企业、产业行业、行政区域三个方面。国外生态效率测算最先是针对特定企业开展的,这一程度上归功于WBCSD的提倡和推广。例如德国化工企业巴斯夫集团、日本富士以及索尼公司率先制定了企业层面的生态效率实施规划<sup>[6]</sup>。Côté等<sup>[7]</sup>、Fernándezviñé等<sup>[8]</sup>将生态效率测算从大型企业应用到中小企业上。而国内企业层面的生态效率测算研究成果相对较少,且研究层次不高,测算对象涉及钢铁<sup>[9-10]</sup>、化工<sup>[11-12]</sup>、能源<sup>[13]</sup>等企业。产业行业生态效率测算方面,Willison等<sup>[14]</sup>对海洋渔业、Kharel等<sup>[15]</sup>对铁棒工业、Kelly等<sup>[16]</sup>对不同旅游线路、程翠云等<sup>[17]</sup>对农业、姚治国等<sup>[18]</sup>对旅游业、范建平等<sup>[19]</sup>对物流业的生态效率进行了测算。区域生态效率测算方面,Wursthorn等<sup>[20]</sup>尝试建立统一的欧洲生态效率核算统计框架,Gómez Calve等<sup>[21]</sup>、Mercedes等<sup>[22]</sup>对欧盟国家较长时间序列的生态效率进行了测算。而国内区域生态效率测算基本以省域尺度、市域尺度为主。王恩旭等<sup>[23]</sup>、成金华等<sup>[24]</sup>、罗能生等<sup>[3]</sup>、刘军等<sup>[25]</sup>运用不同模型测算了多年份的中国各省份生态效率,并进行了时空特征、影响因素等延伸研究。李惠娟等<sup>[26]</sup>、任宇飞等<sup>[27]</sup>、马勇等<sup>[28]</sup>则以不同区域或类型的城市为研究对象,进行了城市尺度的生态效率评价。相比之下,县域尺度测算成果则寥寥无几,这主要是因为国内县级经济、社会、环境等相关统计指标不完备,多项县级投入与产出指标不可获。在有限的县域生态效率测度探索中,任宇飞等<sup>[29]</sup>利用非期望产出SBM模型对京津冀城市群县域单元三个截面年度的生态效率进行了测度,金贵等<sup>[30]</sup>利用随机前沿生产函数测度了2014年湖北省县域的土地利用效率、生态绩效指数和生态效率。但这两项研究在选用指标方面还有待丰富补充,而且没有检验县域生态效率评价结果的稳健性,进而无法验证构建的县域生态效率测算指标体系和模型的科学性和适用性。

鉴于此,本文的推进之处在于:(1)通过集成多种观测目标的遥感数据,进一步丰富县域生态效率测度的评价指标体系;(2)设计稳健性检验方案,对本文所构建的多源遥感数据支持下的县域生态效率测算路径以及测度结果进行科学检验;(3)实证层面,引入非合意产出超效率EBM模型进行县域生态效率测算,并以长江中游城市群为典型案例区,填补相关空白。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 县域生态效率测算指标体系的构建

县域尺度生态效率测算指标体系的构建采用自上而下的方式进行,以既有研究和文献为理论依据构建指标体系的准则层,基于数据可获性确定指标体系的指标层。(1)准则层的构建。从国内外生态效率测度已有文献看,大多从投入指标和产出指标两个方面进行指标体系构建。投入指标方面,多围绕生产函数投入项构成确定投入要素,主要包括水、土地、劳动力、资本、能源等<sup>[25]</sup>,针对不同研究对象、研究尺度和研究区域,对水和土地指标的纳入情况有所差异,但劳动力、资本和能源则相对固定。产出指标方

面，通常划分为合意产出与非合意产出。合意产出以GDP为代表的经济产出为主，非合意产出则为废水、废气、废物等环境产出。由此，本文确定了涉及土地投入、资源投入、资本投入、劳动力投入的投入指标<sup>①</sup>，以及涉及合意产出和非合意产出的产出指标。

(2) 指标层的构建。按照准则层内容，结合遥感数据种类以及长江中游城市群县域经济社会统计数据的可获性，确定具体指标。其中投入变量包括建设用地面积、耕地面积、能源消耗指数、全社会固定资产投资、年末总人口等5项指标，产出变量包括GDP、地方财政一般预算收入、NO<sub>2</sub>年均浓度（非合意）、PM<sub>2.5</sub>年均浓度（非合意）等4项指标。综上，构建多源遥感数据支持下的县域生态效率测算指标体系，见表1。

表1 多源遥感数据支持下的县域生态效率测算指标体系

Table 1 Calculating index system for county ecological efficiency based on multi-source remote sensing data

目标层	准则层	指标层	数据来源
县域尺度生态效率	投入指标	土地投入	
		建设用地面积	中国土地利用现状遥感监测数据
		耕地面积	
		资源投入	DMSP/OLS夜间灯光数据
		资本投入	《中国县域统计年鉴》《湖北省统计年鉴》《湖南省统计年鉴》《江西省统计年鉴》
		劳动力投入	
	产出指标	经济产出	
		GDP	
		地方财政一般预算收入	
	环境产出（非合意）	NO <sub>2</sub> 年均浓度	气溶胶反演遥感数据
		PM <sub>2.5</sub> 年均浓度	

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

- (1) 建设用地面积与耕地面积由中国土地利用现状（LUCC）遥感监测数据处理获得，中国土地利用现状数据集由以 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源，通过人工目视解译生成，划分耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型，由中科院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn/>）获取，空间分辨率为1 km×1 km。
- (2) 能源消耗指数数据由DMSP/OLS全球夜间灯光数据处理获得<sup>②</sup>，已有研究表明夜间灯光数据与能源消费存在显著的线性相关性<sup>[31-32]</sup>。参考刘海猛等<sup>[33]</sup>的研究，将行政区范围内所有栅格灰度值之和该区域能源消耗指数。DMSP/OLS数据由中科院资源环境科学数据中心（<http://www.resdc.cn/>）获取，空间分辨率为1 km×1 km。
- (3) 非合意产出PM<sub>2.5</sub>数据、NO<sub>2</sub>数据来源于大气成分分析组织利用美国宇航局提供的MODIS、MISR等遥感数据反演得出的栅格数据集，空间分辨率为0.01°×0.01°。
- (4) 县域经济、社会等数据来源于《中国县域统计年鉴》《湖北省统计年鉴》《湖南省统计年鉴》《江西省统计年鉴》、各县域《国民经济和社会发展统计公报》，个别缺失数据利用均值补齐。
- (5) 稳健性检验中涉及的市域经济、社会、能源、环境等数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》。

① 水资源投入数据暂不可获，故未纳入准则层。

② DMSP/OLS全球夜间灯光数据时间段为1998-2013年，故根据2012-2013的年增长率估算2015年能源消耗指数。

### 1.2.2 数据处理

获取多源遥感影像栅格原始数据后,以长江中游城市群185个县域单元行政区底图数据为参考,利用ArcGIS软件进行投影、剪裁和提取数值等操作。再将遥感指标数据与经济社会统计数据数据进行匹配,形成完整的县域尺度生态效率评价数据库。

### 1.3 测算模型选择

数据包络分析是测算效率的常用手段,通常分为以CCR、BCC模型为代表的径向模型和以SBM模型为代表的非径向模型两类,现有文献已表明径向模型和非径向模型皆存有缺陷,因此本文选用能够兼容投入前沿值与实际值的径向比例,以及投入差异化的非径向松弛的EBM(Epsilon-based measure)模型进行县域尺度生态效率的测度,同时纳入环境非合意产出,设定超效率、非导向以及规模报酬可变选项。囿于篇幅,具体规划式参见已有研究<sup>[34-36]</sup>。

### 1.4 研究区域与时段

长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分,根据2015年国务院批复同意的《长江中游城市群发展规划》,长江中游城市群地跨湖北、湖南、江西3省31市,涉及185个县级单元(含县及市辖区),内部包括武汉城市圈、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群3大城市群。而且自《国务院关于中西部地区承接产业转移的指导意见》颁布以来,长江中游城市群成为承接长江经济带东部地区产业转移的重要区域,伴随着由此而来的产业规模和结构重要调整和转变,其生态效率可能也发生变化。因此本文选择长江中游城市群作为研究区域进行县域尺度生态效率研究。为揭示县域生态效率的动态规律,本文选择2000年、2005年、2010年、2015年4个截面作为测算时段。

## 2 结果分析

### 2.1 县域生态效率测算及时空特征

#### 2.1.1 县域生态效率测算结果

在前文指标数据和测算模型的基础上,以长江中游城市群185个县级单元为DMU,计算2000年、2005年、2010年、2015年县域生态效率。囿于文章篇幅,不采用表格形式报告县域尺度生态效率测算结果,而采用可视化方式进行,通过ArcGIS软件的自然断裂点分类法,将4期县域生态效率值分为6类,同时反馈描述性统计结果,如图1。

结果表明:(1)4个时期长江中游城市群县域生态效率均值为0.7134、0.6353、0.6958、0.6632,呈“N”形徘徊波动态势。(2)整体看,生态效率较高的县级单元主要集中在长江中游城市群的西部区域和南部区域,并连接成“V”形地带。各年份长株潭城市群和环鄱阳湖城市群所辖县域的生态效率均优于武汉城市圈所辖县域。(3)各时期均进入生态效率前30位的县域单元包括武汉市辖区、长沙市辖区、黄石市辖区、宜昌市辖区、鹰潭市辖区、上饶市辖区、常德市辖区、韶山市、井冈山市、铜鼓县、兴山县、资溪县等12个县市,以市辖区单元居多,上述县级区域是长江中游城市群生态效率较高且较稳定区域。(4)各时期均落入生态效率后30位的县域单元包括瑞昌市、安陆市、孝昌县、蕲春县、江陵县、永修县、监利县等7个县市,且均非市辖区单元,上述县级区域是长江中游城市群生态效率持续低值区域。



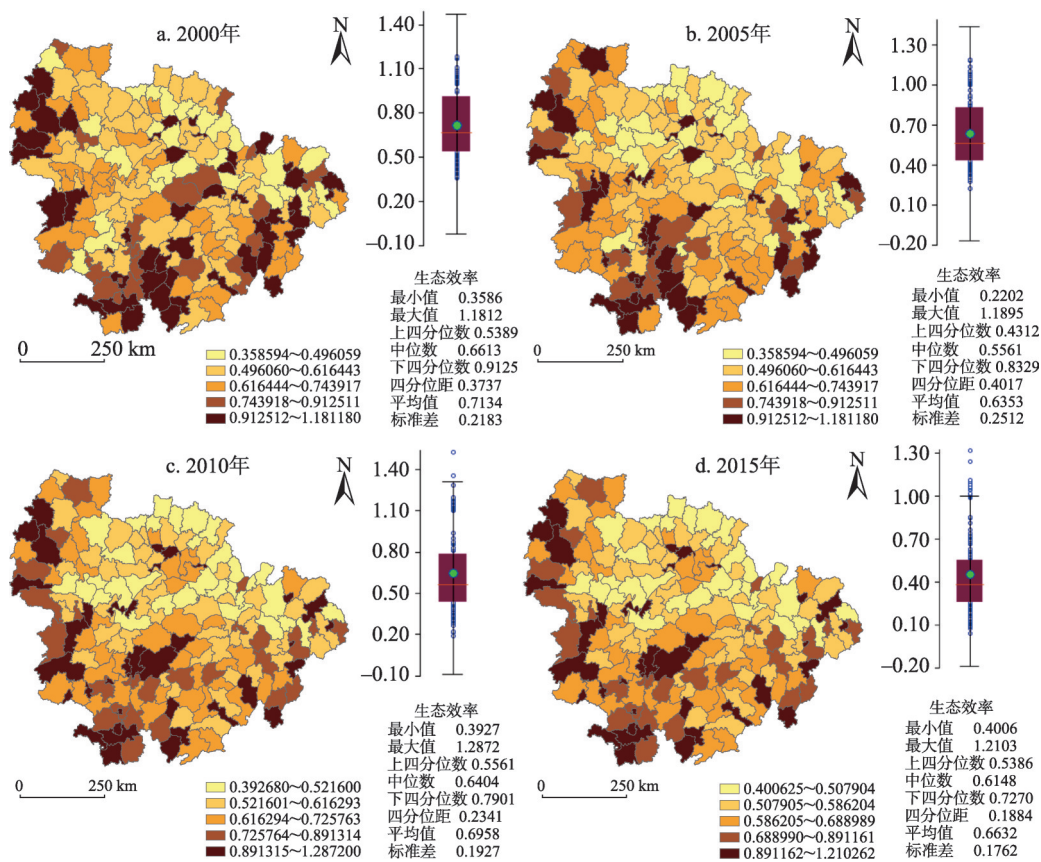


图1 长江中游城市群县域生态效率时空格局

Fig. 1 Temporal and spatial patterns of ecological efficiency in the urban agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River

2.1.2 县域生态效率的空间关联特征

(1)全局空间自相关分析结果

为识别长江中游城市群及其内部各区域县域生态效率的集聚程度和空间关联，选用全局Moran's *I*进行判断，当全局Moran's *I* > 0时表示研究对象之间存在空间正相关关系；全局Moran's *I* < 0则相反<sup>[37]</sup>。利用ArcGIS 10.2软件，分别以长江中游城市群整体，以及内部三大城市群武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为观测区域，测算2000年、2005年、2010年、2015年的生态效率全局Moran's *I*，并返回*P*值以确定显著性，结果如表2。

结果表明长江中游城市群及其内部各子城市群的县域生态效率空间相关性变化特征各异：①长江中游城市群整体，全局Moran's *I*均大于0，且通过0.01水平下显著性检验，呈现出显著空间正相关性，即各县级单元的生态效率在空间分布并非均质，而存在高值区间相邻和低值区间相邻特征。各年份全局Moran's *I*先上升后下降。②武汉城市圈，2000年、2005年全球Moran's *I*接近0，且未通过显著性检验，但2010年和2015年全球Moran's *I*均大于0，且分别通过0.01、0.05水平下显著性检验，表明武汉城市圈各县级单元生态效率空间集聚程度显著升高，空间分布类型由独立随机分布过渡到高高集聚或低低集聚。③长株潭城市群，全局Moran's *I*在2000-2015年间逐年下降，由2000年的

表2 长江中游城市群县域生态效率全局 Moran's I 变动情况

Table 2 Changes of global Moran's I of county ecological efficiency in urban agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River

年份	2000年		2005年		2010年		2015年	
	Moran's I	P 值	Moran's I	P 值	Moran's I	P 值	Moran's I	P 值
长江中游城市群	0.11445	0.00859	0.21212	0.00000	0.18925	0.00002	0.13475	0.00204
武汉城市圈	-0.02282	0.92772	0.00994	0.73398	0.20210	0.00382	0.14273	0.03592
长株潭城市群	0.26960	0.00023	0.15202	0.02832	0.10010	0.12535	0.02579	0.54814
环鄱阳湖城市群	-0.09085	0.45569	0.00768	0.83375	-0.11600	0.31775	-0.06161	0.64036

0.26960一直递减到2015年的0.02579，反映长株潭城市群县域生态效率空间集聚程度逐渐降低，县域间生态效率差异逐步缩小。④环鄱阳湖城市群，除2005年，其余年份全局 Moran's I均小于0，但未通过显著性检验，县级单元生态效率呈微弱的空间负相关。

(2)LISA 局部空间自相关聚类结果

全局 Moran's I 只揭示研究区域整体上的集聚类型，还需利用 LISA 空间自相关聚类<sup>[38]</sup>将进一步识别县域生态效率在相邻县域中的自相关性，并划分4种集聚类型：高高集聚（H-H）为高生态效率县域单元被高生态效率县域单元包围，高低集聚（H-L）为高生态效率县域单元被低生态效率县域单元包围、低高集聚（L-H）为低生态效率县域单元被高生态效率县域单元包围、低低集聚（L-L）为低生态效率县域单元被低生态效率县域单元包围。利用 GeoDa 软件，识别2000年、2005年、2010年、2015年的长江中游城市群县域生态效率空间集聚特征，并返回通过0.01显著性水平检验的LISA聚类结果，如图2。

结果显示：①4个时期生态效率H-H、L-L集聚类型的县级单元数量先上升后下降，这与前文长江中游城市群全局 Moran's I 指数的变化一致。具有较大空间规律性变化的是H-H集聚区与L-L集聚区，而H-L、L-H集聚类型的县域单元数量基本稳定，但各年度区域存在变动。②对于H-H集聚区，2000-2010年，主要出现在衡阳市、株洲市及其周边，同时在非连续地域例如炎陵县、保康县、秭归县、长阳土家族自治县等区域也出现少量高高集聚板块。但是到了2015年，衡阳市、株洲市及其周边的H-H集聚区成片消失，只剩下湘潭县、南丰县、长阳土家族自治县等少量区域。③对于L-L集聚区，其空间格局和变化规律则更为明显。2000-2015年L-L集聚区基本按照顺时针走向，逐步形成围绕武汉市的闭合环形区域。虽然这些地区，距离长江中游城市群最大城市和国家中心城市武汉空间位置最近，但这些区域不仅并没有享受到武汉带来的辐射拉动作用，反而由于武汉巨大的优质资源及产业要素的虹吸作用，以及可能存在承接武汉的资源消耗型产业转移，而在绿色发展道路上受到明显抑制。因此要从宏观层面，对这些区域加强产业扶持力度以及政策、资金支持，避免成为长江中游城市群生态优先和绿色发展的“灯下黑”区域。④对于H-L集聚区，最显著的规律是，2005年以前主要稳定在武汉市辖区、咸宁市辖区、汉南区、黄石市辖区、黄冈市辖区等区域，但2010年以后，上述区域基本退出H-L集聚区。整体趋势上表明上述城市的市辖区与周边所辖县域的生态效率差异逐渐降低。⑤对于L-H集聚区，整个研究时段中总体呈零星状分布，并且未形成连片区域，表明出现周围生态效率高值而中心生态效率低值的空间结构机率较低。

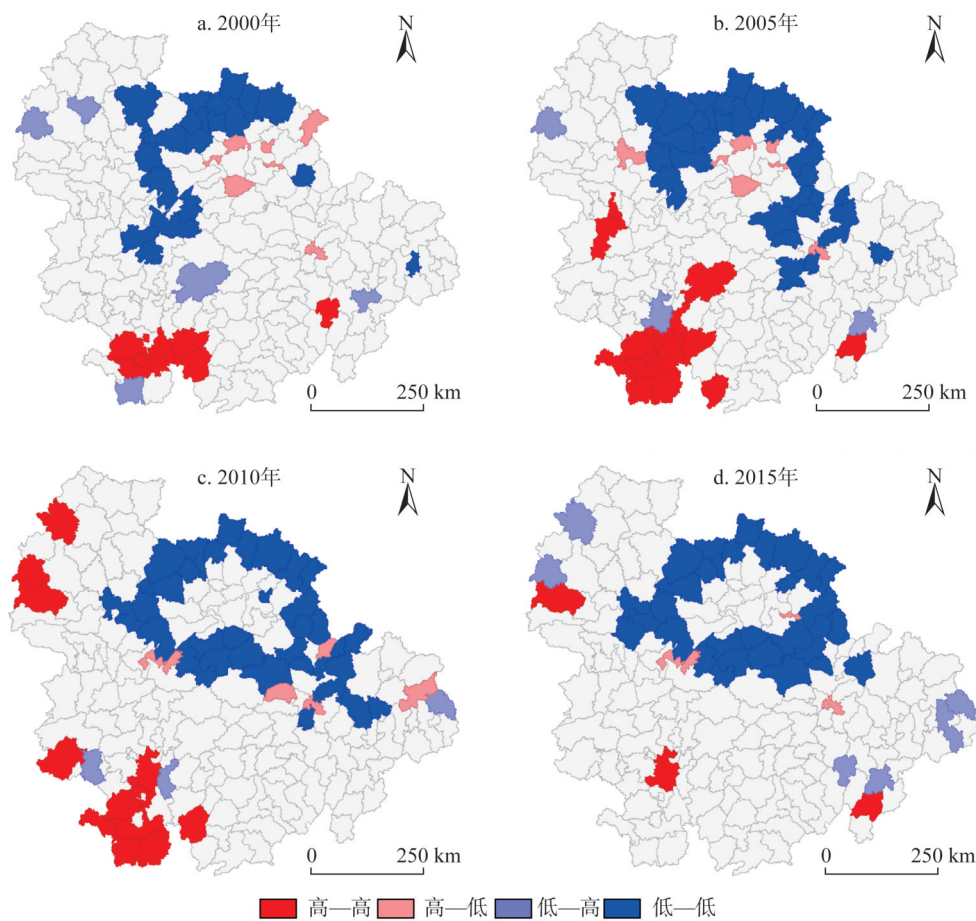


图2 长江中游城市群县域生态效率LISA聚类结果  
Fig. 2 LISA clustering results of ecological efficiency

2.2 稳健性检验

2.2.1 稳健性检验思路

既有研究均未对县域生态效率测算方法与测算结果的科学性和一致性做出检验，因此本文将添加稳健性检验环节，以期弥补现有文献不足。由于县域生态效率测算文献较少，本文实证结果无法通过与前人研究对话获得检验，因此需对前文设计的包括数据、指标、测算在内的县域生态效率测算路径进行自我检验。

由于县域尺度的生态效率无法只通过社会经济环境统计数据直接测算获得，不能与本文在遥感数据支持下测度的结果进行直接对比。本文设计的稳健性检验思路是将县域尺度上升为市域尺度，从而分别利用传统方法和本文提出的测度方法进行生态效率测度，再比较二者结果，评判本文构建测度路径的科学性和稳健性。需要指出，基于两种方法测度的生态效率不具备数值上的可比性，因此主要比较排名的变化情况。同时考虑到单个截面年份的测算结果对比，可能会受该截面年度中某个地域单元或某个指标异常值的影响，因此基于下面两个路径分别计算2000-2015年各DMU的生态效率均值。

- 路径一：使用与县域生态效率测算完全相同的指标和超效率EBM模型。
- 路径二：参考市域生态效率测度的相关文献，在使得指标体系准则层与路径一一致



的基础上，结合统计数据可获性选择指标层，形成市域生态效率指标体系，如表3，并采用超效率EBM模型。

表3 市域生态效率测算指标体系  
Table 3 Calculating index system for city ecological efficiency

目标层	准则层	指标层	单位
市域尺度生态效率	投入指标	资本投入	全社会固定资产投资
		劳动力投入	就业人员数
		土地投入	建成区面积
		资源投入	供水总量
	产出指标		全社会用电量
		经济产出	GDP
			地方财政一般预算收入
		环境产出（非合意）	工业废水排放量
			工业二氧化硫排放量
			工业烟(粉)尘排放量

2.2.2 稳健性检验结果

按照稳健性检验思路，在路径一和路径二下分别测度长江中游城市群31个市域单元的生态效率，并计算两种路径之间的市域生态效率排名差异，结果见表4。为更直观展现稳健性检验结果，绘制图3，图形中对角线是完全稳健线（位于此线上的所有DMU在两个路径下测出结果名次完全相同），并根据±5的排名差异阈值分别绘制上包络线 and 下包络线。

(1)稳健性结果分析

结果显示：① 位于上下包络线范围内的DMU达到21个，占比67.74%，两组生态效率分值的皮尔森相关系数达到0.76252，且通过显著性检验，两种路径测度出的市域生态效率结果一致性和稳健性较好。因此总体判断采用本文路径测度出的长江中游城市群县域生态效率结果具有较高的可信度。② 位于完全稳健线的DMU有4个城市，分别是鹰潭市、长沙市、岳阳市、襄阳市，其中3个城市位于湖南省。除此之外，位于上下包络线范围内的DMU还包括新余市（-3）、武汉市（-2）、鄂州市（+1）、潜江市（+5）、常德市（-2）、宜昌市（-3）、天门市（-3）、衡阳市（-5）、抚州市（-2）、景德镇市（-4）、南昌市（+1）、娄底市（-5）、九江市（-5）、黄石市（-5）、益阳市（+2）、荆门市（+2）、荆州市（+2）等17个城市。③ 位于上下包络线以外的DMU分别是吉安市（+9）、上饶市（+11）、宜春市（+9）、萍乡市（-6）、孝感市（+10）、黄冈市（+9）、咸宁市（+14）、仙桃市（-8）、株洲市（-9）、湘潭市（-13）。可以发现，路径二测出名次高于路径一的DMU主要位于湖北省和江西省，而湖南省出现较大偏差的地市均为路径二测出名次低于路径一。

(2)排名差异成因分析

两种路径测算的市域生态效率排名差异的成因来自多方面：① 生态效率测算指标体系的差异。虽然本文在投入指标和产出指标的准则层做了控制，但是指标层的具体指标在数量上，以及数据类型与数据结构上均有区别。② 遥感数据和统计数据自身的数据质量问题。例如本文使用的遥感数据空间分辨率为1 km×1 km和0.01°×0.01°，精度不高。



表4 稳健性检验结果  
Table 4 Results of robustness test

城市	路径一		路径二		排名 差异	城市	路径一		路径二		排名 差异
	生态效率	排名	生态效率	排名			生态效率	排名	生态效率	排名	
鹰潭市	1.2220	1	1.3732	1	0	咸宁市	0.9124	17	1.1154	3	14
萍乡市	1.1052	2	1.0402	8	-6	景德镇市	0.8835	18	0.7912	22	-4
新余市	1.0670	3	1.0541	6	-3	宜春市	0.8644	19	1.0231	10	9
长沙市	1.0528	4	1.1137	4	0	上饶市	0.8508	20	1.0263	9	11
武汉市	1.0522	5	1.0422	7	-2	吉安市	0.8393	21	1.0204	12	9
鄂州市	1.0405	6	1.0754	5	1	南昌市	0.8317	22	0.8316	21	1
潜江市	1.0337	7	1.1440	2	5	娄底市	0.8274	23	0.6967	28	-5
仙桃市	1.0234	8	1.0062	16	-8	襄阳市	0.8040	24	0.7715	24	0
常德市	1.0131	9	1.0229	11	-2	九江市	0.7856	25	0.6733	30	-5
宜昌市	1.0090	10	1.0096	13	-3	黄石市	0.7710	26	0.6316	31	-5
天门市	1.0081	11	1.0092	14	-3	益阳市	0.7554	27	0.7566	25	2
衡阳市	1.0025	12	1.0022	17	-5	黄冈市	0.7384	28	0.8646	19	9
湘潭市	1.0001	13	0.7403	26	-13	荆门市	0.7184	29	0.7365	27	2
株洲市	0.9403	14	0.7736	23	-9	孝感市	0.6901	30	0.8606	20	10
岳阳市	0.9320	15	1.0087	15	0	荆州市	0.6516	31	0.6939	29	2
抚州市	0.9133	16	0.8957	18	-2						

大气污染物数据通过气溶胶反演得到，反演过程中可能存在误差。对于时间跨度较长的夜间灯光数据，已有文献表明由于卫星传感器的变动和光线过饱和等原因<sup>[39-40]</sup>将导致误差。此外，县域社会经济统计数据在统计、报送的过程中可能也含有一定质量问题。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文在多源遥感数据的支持下和稳健性检验的验证下，应用非合意产出超效率EBM模型，实现研究区域县域生态效率较长时间跨度的动态测度。并基于GIS空间分析方法揭示县域生态效率的时空特征。主要获得以下结论：

（1）形成较为科学的县域生态效率测度路径。首先基于遥感数据与县域社会经济统计数据可获性，构建县域生态效率测算指标体系。其次，利用GIS技术提取县域遥感数据指标数值并与统计数据融合，制备县域生态效率测算数据库。再次，选用适当模型进行生态效率测算。最后，用市

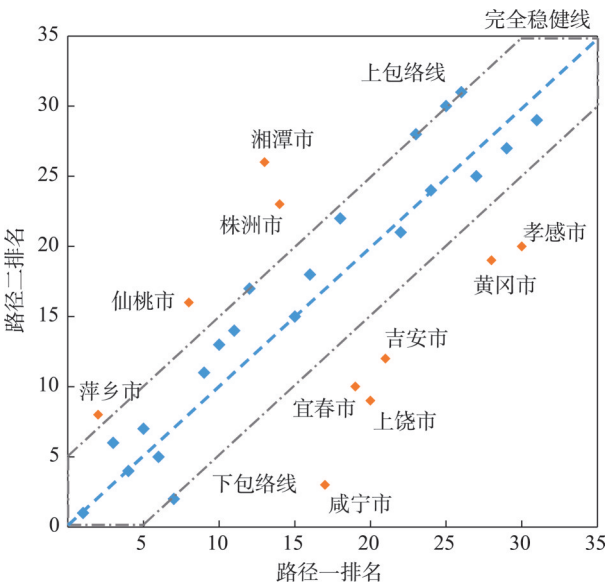


图3 稳健性检验结果示意图  
Fig. 3 Diagram of robustness test results

域尺度的稳健性检验,检验测度结果的科学性和稳健性。

(2) 获得长江中游城市群县域生态效率测算结果。研究期生态效率维持高位区域包括武汉市辖区、长沙市辖区、黄石市辖区、宜昌市辖区、鹰潭市辖区、上饶市辖区、常德市辖区、韶山市、井冈山市、铜鼓县、兴山县、资溪县等12个县市。生态效率持续低值区域包括瑞昌市、安陆市、孝昌县、蕲春县、江陵县、永修县、监利县等7个县市。

(3) 识别长江中游城市群县域生态效率时空特征。长江中游城市群及内部各子城市群的县域生态效率空间相关性变化特征各异,其中长江中游城市群内,各年份均呈现显著空间正相关性。2000-2010年,H-H集聚区主要出现在衡阳市、株洲市及其周边,同时在非连续地域出现少量高高集聚板块,2015年,衡阳市、株洲市及其周边的H-H集聚区成片消失。2000-2015年L-L集聚区按照顺时针走向,逐步形成围绕武汉市的闭合环形区域。

### 3.2 讨论

本文是对县域生态效率测度的有效尝试,为地理学、经济学在县域尺度上的生态环境与资源综合议题开展提供了新指标和变量,为更大范围县域尺度生态效率动态测度提供了经验。除此之外,在实践应用层面,还应当思考如何充分发挥县域生态效率在县级政府绿色绩效考核中的作用,以体现研究的现实意义。在中国,政府绩效考核是官员任用和选拔重要依据,是各级党政官员实际工作的指挥棒。十八届三中全会通过的《中共中央关于深化改革若干问题的决定》首次要求“完善发展成果考核评价体系,纠正单纯以经济增长速度评定政绩的偏向”,之后中共中央国务院印发《生态文明体制改革总体方案》中明确提出“完善生态文明绩效评价考核和责任追究制度”。因此,在长江经济带生态优先绿色发展,共抓大保护、不搞大开发的战略背景下,有必要通过绿色绩效考核来促使长江经济带区域各级政府践行绿色发展理念。“郡县治,天下安”,县域绿色发展对于区域整体绿色发展至关重要,推动县级政府绿色绩效考核也是应有之义。生态效率是一项兼顾经济效益和环境影响的综合指标,赋予其县级政府绩效考核功能,将一定程度上扭转某些地方政府不惜以资源消耗、污染排放而获取经济产出的工作导向。而本文提出的县域生态效率测算路径为将生态效率指标纳入县级政府绩效考核体系提供了可能。一般而言,政府绩效考核体系是较为综合、集成、全面的考核体系,今后应当探索生态效率指标与现有县级政府绩效考核体系的关联框架,即解决生态效率指标接入县级政府绩效考核体系的属性确定、权重设置、实施主体等嵌入性问题。应当指出,本文作为一项探索性研究,仍存在以下缺陷,可供未来研究进一步完善:第一,县域生态效率指标体系尚不丰富,今后在扩大遥感数据获取种类的基础上,尝试纳入生态服务价值、植被覆盖度、CO<sub>2</sub>浓度等环境指标。第二,使用的遥感数据空间分辨率有待提高,以提高测算结果质量。第三,探讨稳健性结果中测度误差较大单元的原因,改进县域尺度生态效率测算结果的稳健性。

### 参考文献(References):

- [1] 黄建欢,谢优男,余燕团.城市竞争、空间溢出与生态效率:高位压力和低位吸力的影响.中国人口·资源与环境,2018,28(3): 1-12. [HUANG J H, XIE Y N, YU Y T. Urban competition, spatial spillovers and eco-efficiency: The impacts of high-order pressure and low-order suction. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(3): 1-12.]
- [2] 陈梅,赵炜涛.新型城镇化下的旅游业与生态效率关系:以长江中游城市群为例.旅游学刊,2018,33(3): 89-97. [CHEN M, ZHAO W T. A study on the relationship between eco-efficiency and tourism under the new-type urbanization: A case study of urban clusters in the Middle Reaches of the Yangtze River. Tourism Tribune, 2018, 33(3): 89-97.]

- [3] 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. [LUO N S, LI J J, LUO F Z. Empirical analysis on the relationship between the China urbanization and regional eco-efficiency. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 53-60.]
- [4] SCHALTEGGER S, STURM A. Okologische rationalität-an-satzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten management instrumenten. Die Untemehmung, 1990, (4): 273-290.
- [5] 姚治国, 陈田. 国外旅游生态效率研究综述. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1222-1231. [YAO Z G, CHEN T. Review on overseas tourism eco-efficiency studies. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1222-1231.]
- [6] 尹科, 王如松, 周传斌, 等. 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. [YIN K, WANG R S, ZHOU C B, et al. Review of eco-efficiency accounting method and its applications. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3595-3605.]
- [7] CÔTÉ R, BOOTH A, LOUIS B. Eco-efficiency and SMEs in Nova Scotia, Canada. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(6-7): 542-550.
- [8] FERNÁNDEZVIÑE M B, GOMEZNAVARRO T, CAPUZRIZO S F. Eco-efficiency in the SMEs of Venezuela. Current status and future perspectives. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 736-746.
- [9] 戴铁军, 陆钟武. 钢铁企业生态效率分析. 东北大学学报, 2005, (12): 1168-1173. [DAI T J, LU Z W. Analysis of eco-efficiency of steel industry. Journal of Northeastern University, 2005, (12): 1168-1173.]
- [10] 谢琨, 刘思峰. 基于灰色评估的钢铁企业生态效率评价. 生态经济, 2016, 32(5): 111-116, 142. [XIE K, LIU S F. Evaluation of eco-efficiency index for steel enterprises based on grey evaluation. Ecological Economy, 2016, 32(5): 111-116, 142.]
- [11] 贾卫平. 循环经济模式下的新疆氯碱化工产业生态效率评价研究. 新疆: 石河子大学, 2016. [JIA W P. Study on evaluation of eco-efficiency of chlor alkali chemical industry under the mode of circular economy in Xinjiang Tianye as an example. Xinjiang: Shihezi University, 2016.]
- [12] 邹倩, 朱兆阁, 王艳秋. 石化企业生态效率评价. 生态经济, 2018, 34(8): 70-74. [ZOU Q, ZHU Z G, WANG Y Q. Evaluation on ecological efficiency of petrochemical enterprises. Ecological Economy, 2018, 34(8): 70-74.]
- [13] 关琬琳. 华润电力生态效率指标体系研究. 武汉: 中南财经政法大学, 2017. [GUAN W L. Research on the construction of eco-efficiency indicator system in Huarun Electrical Co. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2017.]
- [14] MARTIN WILLISON J H, COTÉ R P. Counting biodiversity waste in industrial eco-efficiency: Fisheries case study. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(3): 348-353.
- [15] KHAREL G P, CHARMONDUSIT K. Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(13): 1379-1387.
- [16] KELLY J, HAIDER W, WILLIAMS P W, et al. Stated preferences of tourists for eco-efficient destination planning options. Tourism Management, 2007, 28(2): 377-390.
- [17] 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. [CHENG C Y, REN J M, WANG R S. Spatial-temporal distribution of agricultural eco-efficiency in China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 142-148.]
- [18] 姚治国, 陈田, 尹寿兵, 等. 区域旅游生态效率实证分析: 以海南省为例. 地理科学, 2016, 36(3): 417-423. [YAO Z G, CHEN T, YIN S B et al. Regional tourism eco-efficiency model and an empirical research of Hainan province. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 417-423.]
- [19] 范建平, 肖慧, 樊晓宏. 考虑非期望产出的改进EBM-DEA三阶段模型: 基于中国省际物流业效率的实证分析. 中国管理科学, 2017, 25(8): 166-174. [FAN J P, XIAO H, FAN X H. A modified three-stage dea model with undesirable output consideration: An empirical analysis based on Chinese provincial logistics efficiency. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(8): 166-174.]
- [20] WURSTHORN S, POGANIETZ W R, SCHEBEK L. Economic environmental monitoring indicators for European countries: A disaggregated sector-based approach for monitoring eco-efficiency. Ecological Economics, 2011, 70(3): 487-496.
- [21] GÓMEZ-CALVET A R, CONSEA D, et al. On the dynamics of eco-efficiency performance in the European Union. Computers & Operations Research, 2015, 66: 336-350.
- [22] MERCEDES B, ANDRES J. Assessing environmental performance in the European Union: Eco-innovation versus catching-up. Energy Policy, 2017, 104(5): 240-252.
- [23] 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. [WANG E X, WU C Y. Spatial-temporal differences of provincial eco-efficiency in China based on super efficiency DEA model. Chinese Journal of Management, 2011, 8(3): 443-450.]

- [24] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 等. 中国生态效率的区域差异及动态演化研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 47-54. [CHENG J H, SUN Q, GUO M J, et al. Research on regional disparity and dynamic evolution of eco-efficiency in China. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 47-54.]
- [25] 刘军, 马勇, 问鼎, 等. 2000-2014年中国区域生态效率测度及其时空差异. 生态环境学报, 2018, 27(3): 498-508. [LIU J, MA Y, WEN D, et al. Measuring of regional eco-efficiency in china and its spatial-temporal differences from 2000 to 2014. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3): 498-508.]
- [26] 李惠娟, 龙如银, 兰新萍. 资源型城市的生态效率评价. 资源科学, 2010, 32(7): 1296-1300. [LI H J, LONG R Y, LAN X P. Assessment for eco-efficiency of resource-based cities. Resources Science, 2010, 32(7): 1296-1300.]
- [27] 任宇飞, 方创琳, 蔺雪芹. 中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价. 地理学报, 2017, 72(11): 2047-2063. [REN Y F, FANG C L, LIN X Q. Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2047-2063.]
- [28] 马勇, 刘军. 长江中游城市群产业生态化效率研究. 经济地理, 2015, 35(6): 124-129. [MA Y, LIU J. Efficiency evaluation of regional industrial ecology of the Yangtze River Middle reaches urban agglomerations. Economic Geography, 2015, 35(6): 124-129.]
- [29] 任宇飞, 方创琳. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析. 地理科学进展, 2017, 36(1): 87-98. [REN Y F, FANG C L. Spatial pattern and evaluation of eco-efficiency in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Progress in Geography, 2017, 36(1): 87-98.]
- [30] 金贵, 吴锋, 李兆华, 等. 快速城镇化地区土地利用及生态效率测算与分析. 生态学报, 2017, 37(23): 8048-8057. [JIN G, WU F, LI Z H, et al. Estimation and analysis of land use and ecological efficiency in rapid urbanization area. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 8048-8057.]
- [31] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态. 地理研究, 2014, 33(4): 625-634. [WU J S, NIU Y, PENG J, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light. Geographical Research, 2014, 33(4): 625-634.]
- [32] XIE Y, WENG Q. World energy consumption pattern as revealed by DMSP-OLS nighttime light imagery. GIScience & Remote Sensing, 2016, 53(2): 265-282.
- [33] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191. [LIU H M, FANG C L, HUANG J J, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 177-191.]
- [34] KAORU TONE, MIKI TSUTSUI. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency. European Journal of Operational Research, 2010, 27(3): 1554-1563.
- [35] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素: 基于EBM-Tobit模型的两阶段分析. 资源科学, 2017, 39(8): 1522-1534. [WANG K L, LIU Y, SHI L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model. Resources Science, 2017, 39(8): 1522-1534.]
- [36] ANDERSEN P, PETERSEN N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. Management Science, 1993, (39): 1261-1264.
- [37] 马勇, 童昀. 长江中游城市群区域经济差异的时空演变及影响因子分析. 统计与决策, 2016, 32(21): 134-137. [MA Y, TONG Y. Temporal spatial evolution of regional economic disparities and influencing factors in urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River. Statistics & Decision, 2016, 32(21): 134-137.]
- [38] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于ESDA的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析. 自然资源学报, 2013, 28(4): 571-582. [SUN C Z, CHEN S, ZHAO L S. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582.]
- [39] 郑子豪, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和和方法. 遥感学报, 2018, 22(1): 161-173. [ZHENG Z H, CHEN Y B, WU Z F, et al. Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNL. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(1): 161-173.]
- [40] 张梦琪, 何宗宣, 樊勇. DMSP/OLS稳定夜间灯光影像的校正方法. 测绘通报, 2017, (12): 58-62, 76. [ZHANG M Q, HE Z Y, FAN Y. Calibration for DMSP/OLS stable nighttime light images. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (12): 58-62, 76.]



## Calculation and robustness test of county-scale ecological efficiency based on multi-source remote sensing data: Taking the urban agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River as an example

MA Yong<sup>1</sup>, TONG Yun<sup>1,2</sup>, REN Jie<sup>3</sup>

(1. Academy of Green Development, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. School of Business, Hubei University, Wuhan 430062, China; 3. Business School, University of Queensland, Brisbane 4072, Queensland, Australia)

**Abstract:** Ecological efficiency is an important basis for evaluating the level of regional ecological civilization. It is also a common index and variable for the comprehensive study of resources and environment in geography and economics. The lack of research on the measure of ecological efficiency at the county level has restricted the above-mentioned problems to be researched at the county level. Constructing a scientific path for measuring ecological efficiency at the county level is conducive to accurately identifying the regional economic and social ecological development pattern and providing a possibility for county-level government green performance assessment. Under the national strategy of ecological priority and green development of the Yangtze River economic belt, taking the middle reaches of the Yangtze River as the research area and relying on the multi-source remote sensing data to construct the index system for estimating the ecological efficiency of the county scale, the ecological efficiency of the county area from 2000 to 2015 was calculated by using the non-consensual output EBM super efficiency model, and the GIS spatial analysis tool was used to reveal spatial differences and spatial correlation characteristics. A robust test scheme is designed to test the scientificity and robustness of the county-scale ecoefficiency measurement path. The results show that: (1) The ecological efficiency of the counties under the jurisdiction of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration and Poyang Lake urban agglomeration is better than that of the counties under the jurisdiction of Wuhan urban agglomeration. (2) During the study period, the ecological efficiency of 12 counties and cities such as Wuhan maintained a high level, while that of 7 counties and cities such as Ruichang maintained a low level. (3) The H-H concentration area of ecological efficiency in the early stage is mainly in Hengyang, Zhuzhou and its surrounding areas. By 2015, these areas had disappeared. The L-L agglomeration area of ecological efficiency follows the clockwise trend and gradually forms a closed circular area around the city of Wuhan. (4) The robustness test based on the comparison of city ecological efficiency rankings shows that the measurement path and results of county ecological efficiency constructed in this paper have high reliability.

**Keywords:** ecological efficiency; county-scale; remote sensing data; EBM; robustness test; urban agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River