

基于超效率 DEA 模型的三峡库区生态效率评价及空间演化格局分析

解亚丽¹, 柯小玲^{1,2*}, 闵园园¹, 郭海湘¹, 王德运¹

[1. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心, 湖北武汉 430074]

【摘要】 本文基于2010—2017年的统计数据, 首先采用超效率DEA模型对三峡库区26个区县的生态效率进行测算, 然后运用空间自相关分析方法对三峡库区生态效率的演化格局进行了实证分析, 探索三峡库区生态效率的时空动态演变特征。研究表明: 2010—2017年三峡库区生态效率平均水平处于0.5601~1.1920, 整体呈现波动性变化趋势, 生态效率在一定程度上有所改善, 但是整体水平仍然较低; 从区域层面看, 各个区县间生态效率水平不平衡, 空间分布上呈现“西高东低”的非均衡性特征。局部空间自相关分析表明, 三峡库区2010—2017年集聚性呈逐渐减弱态势, 空间异质性逐渐增加, 整体的生态效率差异变大。最后依据实证研究分析结果, 本文对如何提升三峡库区生态效率提出了相应的政策建议。

【关键词】 三峡库区; 超效率DEA; 空间相关性

【中国分类号】 F124.5; X37

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252(2020)01-0113-08

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.01.113

引言

三峡库区是三峡水利工程的直接影响区域, 也是我国最重要的生态敏感区之一。2014年国务院颁布的《全国对口支援三峡库区合作规划》指出, 三峡库区经济社会发展基础较为薄弱、环境承载压力大的基础性矛盾依旧没有改变。近年来, 三峡库区水土流失、土地退化严重, 水库水污染及水体富营养化加剧, 生物多样性愈加脆弱, 地质灾害频发。2018年4月24日, 习近平总书记视察三峡库区, 提出长江经济带建设要“共抓大保护、不搞大开发”, 明确生态文明建设是三峡后续工作规划的重要目标。三峡库区作为长江中上游的咽喉要道, 其生态环境直接影响长江流域, 因此对三峡库区的生态效率进行研究非常有必要。

1 文献综述

“生态效率”的概念最早是由德国学者 Schaltegger 和 Sturm^[1] 在1990年提出的, 并且在经济活动创造价值和污染的前提下, 首次在学术上将其定义为衡量环境、资源、生态和经济协调发展程度的一种工具。

1992年世界可持续发展工商理事会^[2] 将生态效率的概念内涵进行了拓展, 认为生态效率应包括资源效率和环境绩效两个部分。经济合作与发展组织^[3] 在1998年将生态效率的定义扩大到更大组织范围。生态效率通常被定义为经济活动的经济价值与环境影响的比值。在实证研究中, 分子常常是地区生产总值, 分母是生态压力指标, 如土地、水、人力、能源消耗等。

常见的测度生态效率的方法有因子分析赋权法^[4]、数据包络分析法^[5]、超效率DEA方法^[6]、三阶段DEA方法^[7]等。同时, 当前研究计算生态效率的方法大多采用DEA模型, 而该模型得出的结果范围在0到1之间, 这样就很难再对有效决策单元(效率值为1)进行进一步的比较分析。而超效率DEA模型则能够很好地克服这一弊端, 它是在DEA模型的基础上, 针对有效决策单元效率值的比较问题提出来的, 并且它有助于了解连续时间段内决策单元动态效率变化情况和导致效率变化的因素^[8]。

为了测算生态效率, Kuosmanen 和 Kortelainen^[9] 最早建立了基于DEA框架的生态效率测度体系, 此

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于数据驱动的滑坡地质灾害预测及其应急决策研究——以长江经济带三峡库区为例”(71874165); 教育部人文社会科学研究青年基金项目“煤矿区生态安全评价体系与预警模型研究”(13YJC630065); 中国地质大学(武汉)资源环境经济研究中心开放基金项目“长江经济带城市生态安全预警与协调治理路径研究”(H2018002B)。

作者简介: 解亚丽(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事资源环境管理研究, E-mail: 470481235@qq.com。

*** 责任作者:** 柯小玲(1980—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境管理研究, E-mail: kxlcug@163.com。

后,国内外学者在这方面进行了诸多探索,主要包括以下几个方面内容:一是基于超效率 DEA 模型的生态效率研究,例如,成金华^[8]等运用超效率 DEA 模型对中国 30 个省份的生态效率进行了测度;陈浩^[10]等运用超效率 DEA 模型测度了中国 32 个资源型城市的生态效率,并利用 Malmquist 指数分析影响因素;Casu^[10]使用超效率 DEA 模型对欧洲银行市场进行了生态效率评价。二是基于三阶段 DEA 模型的生态效率评价,例如,吴振华^[12]等运用三阶段 DEA 模型对河南省 18 个市的农业土地生态效率进行了研究。三是基于网络 DEA 的生态效率评价,例如, Fried^[13]等应用网络 DEA 模型分析了数据噪声对生态效率评价的影响,杨佳伟^[14]等运用非期望中间产出网络 DEA 模型对我国 30 个省份的生态效率进行了分析。四是基于 PCA-DEA 组合模型的生态效率评价,例如,曹俊文^[15]等基于 PCA-DEA 组合模型对长江经济带 11 省市的生态效率进行了评价,顾程亮^[16]基于 CRR-DEA 模型和 Malmquist 指数对我国经济发展的生态效率进行了静态综合分析。

Tobler^[17]曾指出地理学第一定律:“任何东西与别的东西之间都是相关的,但近处的东西比远处的东西相关性更强”。空间自相关分析在地理统计学中应用较多,有多种指数可用,最常用的是 Moran 的 *I* 指数和 Geary 的 *C* 指数。本文选用 EMS1.3 软件和 Geoda 软件分析三峡库区的生态效率水平及空间相关性分析,其中 EMS1.3 软件是基于微软 Windows 9x/NT 系列的计算数据包络分析效率测度的软件,Geoda 是一个设计实现栅格数据探求性空间数据分析的软件工具集合体的最新成果。

综上所述,关于生态效率研究静态分析较多,选择的时间跨度普遍较小,并且学者大多研究省域^[18]或某区域如长江经济带^[19]、长三角等的区域生态效率的评价^[20],很少有学者研究三峡库区的生态效率问题^[21,22],鉴于此,本文基于三峡库区 26 个区县的面板统计数据,采用改进的 DEA 方法即超效率 DEA 模型全面评价三峡库区 2010—2017 年的生态效率,并运用空间自相关分析方法探寻三峡库区生态效率的时间、空间动态演变规律和原因,以期对三峡库区生态修复和建设工作提供理论参考。

2 研究方法

2.1 超效率 DEA 方法

传统 DEA 方法有一个缺陷,即测度值的范围在 0 到 1 之间,当决策单元较多时,可能会出现多个效

率值为 1 的情况。为了改进这个不足,Anderson^[23]等提出了超效率 DEA 的方法。超效率 DEA 方法将有效决策单元的生产前沿面后移,在其效率值不变的前提下,将投入按比例增加,投入增加的比例即超效率评价值,这样测算的效率值会大于 1,就可以对效率值为 1 的有效决策单元进行更深一步的研究;对于无效的决策单元,生产前沿面不变,和传统模型的测度值一致。超效率 DEA 模型的表达式如下:

$$\begin{cases} \min \theta \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + S^- = \theta X_{j_0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j - S^+ = Y_{j_0} \\ \lambda_j \geq 0, j=1,2,\dots,n \\ S^+ \geq 0, S^- \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, θ 为决策单元的效率值; X 和 Y 分别为决策单元的输入集和输出集; λ_j 为决策变量; S 为松弛变量向量。

2.2 空间自相关

空间自相关研究某一属性值在相关区域空间上的关联集聚程度,分为描述指定属性在整个空间集聚性的全局空间自相关,和进一步分析具体局部单元属性与周边相邻空间集聚性的局域空间自相关。全局 Moran's *I* 指数为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} |x_i - x_j| |x_i - x_j|}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n |x_i - x_i|^2} \quad (2)$$

式中, I 为全局 Moran's *I* 指数; n 为测度区域数目; x_i 为区域 *i* 的属性值; x_j 为区域 *j* 的属性值; \bar{x} 为各区域属性值均值; W_{ij} 为空间权重矩阵。Moran's *I* 指数取值范围在 $[-1, 1]$,正负号表示相关的正负属性,取值为 0 表示没有空间相关性。用统计量 *Z* 检验 Moran's *I* 的显著性水平:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (3)$$

式中: $E(I)$ 为理论期望; $\text{Var}(I)$ 为理论方差。

全局自相关假定空间同质,无法反映局部集聚特征,需要进一步进行局部空间自相关分析。局部空间关联指数(LISA)是 Moran's *I* 指数的局部形式,用于分析区县与周围区县的聚散效应并找到聚集点。局部 Moran's *I* 指数为:

$$I_i = Z_i \sum_{j \neq i}^n W_{ij} Z_j \quad (4)$$

式中, I_i 为城市 i 的局部 Moran's I 指数; Z_i 为城市 i 的生态效率值, Z_j 为城市 j 的生态效率值。

3 研究对象与指标体系构建

3.1 研究对象与数据来源

本文以三峡库区为实证研究对象, 涵盖湖北和重庆两个省(市)的 26 个区县^①, 即湖北省宜昌市所辖的秭归县、兴山县、夷陵区, 恩施州所辖的巴东县, 重庆市所辖的巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县、万州区、忠县、涪陵区、丰都县、武隆区、石柱县、长寿区、渝北区、巴南区、江津区及重庆核心区(包括渝中区、北碚区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区 and 江北区)。三峡库区总面积约 7.9 万 km^2 , 总人口约 3000 万, 涉及移民 117.15 万人。

本文对三峡库区 26 个区县 2010—2017 年的面板数据进行研究, 所有投入产出的指标数据来自《三峡公报》和《国民经济和社会发展统计公报》《重庆市统计年鉴》《宜昌市统计年鉴》, 以及各具体区县的统计年鉴。

3.2 指标体系的构建

本文参考德国环境经济核算账户中的生态效率指标, 将资源消耗和环境影响作为投入类指标, 地区生产总值(GDP)作为产出类指标。具体指标的选取参考已有的研究成果^[24-26], 结合三峡库区生态效率特征, 选取 9 个高频指标, 构建三峡库区生态效率评价指标体系, 具体如表 1 所示。

表 1 三峡库区生态效率评价指标体系

类别	维度	指标构成	指标说明
投入	资源投入	土地资源	建设用地面积 / km^2
		能源	单位 GDP 能耗 / (吨标准煤 / 万元)
		水资源	用水总量 / 万 t
		人力资源	就业人数 / 万人
	环境投入	废气排放	SO_2 排放量 / t; 烟、粉尘排放量 / t
		废水排放	废水排放量 / 万 t
固废排放		固体废弃物排放量 / 万 t	
产出	经济产出	经济发展总量	地区 GDP / 亿元

① 三峡库区区域界定依据来自《三峡工程后续工作总体规划》和《重庆市国民经济和社会发展第十个五年计划构建三大经济区重点专题规划》。

4 实证结果与分析

4.1 2010—2017 年三峡库区生态效率测度

根据上述原理, 采用 EMS1.3 软件测算得到三峡库区 26 个区县 2010—2017 年的生态效率值, 结果见表 2。

本文根据各个区县所处的地理位置将三峡库区分为三个区域: 库首区域、库中区域、库尾区域, 并参考李在军^[27]、陆砚池^[28]等学者的研究成果, 将 2010—2017 年 26 个区县的生态效率值平均值分为四个等级: 生态效率平均值大于 1 为“优”, 生态效率平均值大于 0.9 小于 1 为“良”, 生态效率平均值大于 0.7 小于 0.9 为“中”, 生态效率平均值小于 0.7 为“差”。

从宏观层面来看, 如表 2 和图 1 所示, 2010—2017 年三峡库区的生态效率整体呈显著上升趋势, 仅少数区县生态效率呈现先上升后下降再上升的“波浪形”特征, 这说明三峡库区愈发重视生态问题, 人们的生态保护意识在逐步提高, 这与我国近年来坚持“生态优先、绿色发展”方针政策息息相关。

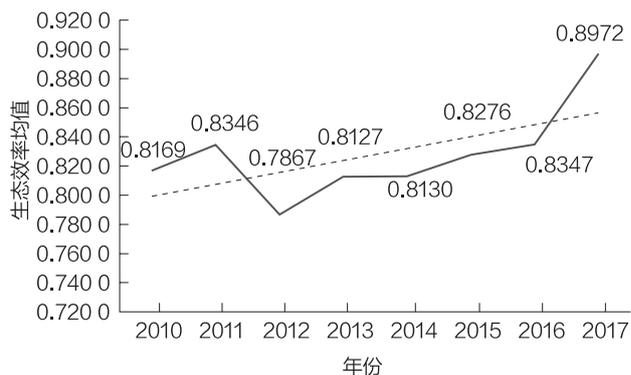


图 1 三峡库区 2010—2017 年生态效率变动趋势

对比分析各区县的生态安全效率, 生态效率平均值为“优”的区县包括渝北区和渝中区等。除了石柱县外, 其他三个区都属于库尾区域, 可见三峡库区库尾的生态效率均高于其他区域。这是因为渝北区的 GDP 居重庆第一, 有很多高新产业, 能耗小, 经济效益高; 渝中区三面环水, 公园绿地分布广泛; 九龙坡区的旅游和经济资源都很丰富; 石柱县为全国水土保持生态环境建设示范县。生态效率平均值为“良”等级的有巫山县和沙坪坝区等。巫山县位于重庆市东部, 处三峡库区腹心, 旅游、烟草是其主导产业, 均

表2 2010—2017年三峡库区各区县生态效率值

区县	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	均值	排名	
库首区域	夷陵	0.8168	0.8324	0.8979	0.9656	0.9172	0.9875	0.9704	1.0000	0.9235	9
	秭归	0.5177	0.5444	0.5798	0.6574	0.5651	0.5773	0.5982	0.6810	0.5901	23
	兴山	0.5976	0.6143	0.6277	0.6752	0.6771	0.7575	0.6798	0.7167	0.6682	21
	巴东	0.4563	0.6714	0.6127	0.6505	0.5692	0.7176	0.6980	0.7093	0.6356	22
库中区域	巫山	0.8891	1.0508	0.9287	0.9211	1.0600	1.0803	0.9489	0.9444	0.9779	5
	巫溪	0.4869	0.5154	0.4856	0.4922	0.5143	0.5014	0.6958	0.7894	0.5601	26
	奉节	0.7322	0.7146	0.7515	0.6792	0.6724	0.6301	0.6747	0.6936	0.6935	20
	云阳	0.7185	0.6278	0.5024	0.4683	0.5486	0.5986	0.5832	0.5891	0.5796	24
	开县	0.8248	0.8764	0.7876	0.7164	0.7185	0.6695	0.7181	0.8212	0.7666	16
	万州	1.1109	1.0503	0.8186	0.8843	0.8194	0.7704	0.6957	0.7765	0.8658	11
	忠县	0.6246	0.5654	0.5663	0.7955	0.8502	0.9276	0.9229	0.9091	0.7702	14
	石柱	0.9162	1.0102	0.9187	1.0506	1.1000	1.0704	1.1205	1.1710	1.0447	4
	丰都	0.6323	0.6862	0.3700	0.5533	0.4978	0.5103	0.6429	0.6447	0.5672	25
	武隆	0.7411	0.7271	0.7876	0.6521	0.7185	0.7000	0.7181	0.7468	0.7666	18
	涪陵	0.9885	0.9293	1.1000	0.9844	0.8799	0.8927	1.0100	0.9695	0.9693	8
	长寿	0.6155	0.8287	0.7828	0.7824	0.8056	0.7364	0.6142	0.9377	0.7629	17
	渝北	1.1207	1.1126	1.1807	1.1320	1.1707	1.3111	1.3102	1.1980	1.1920	1
	库尾区域	江北	1.1380	1.0565	0.8932	0.8882	0.8832	0.8456	1.0108	1.0910	0.9758
南岸		0.9654	0.8813	0.8262	0.9445	0.9192	0.9020	0.8526	0.9910	0.9103	10
九龙坡		0.9921	0.8922	0.9153	1.0617	0.9731	1.2501	1.2815	1.2966	1.0828	3
巴南		0.8834	0.9591	0.8736	0.7854	0.8026	0.8162	0.7855	0.9580	0.8563	12
江津		0.7751	0.7825	0.6974	0.7541	0.7994	0.7896	0.7023	0.8440	0.7681	15
大渡口		1.0012	0.8841	0.7511	0.5967	0.6073	0.5966	0.5104	0.6130	0.6951	19
沙坪坝		0.9339	1.0409	0.9599	1.1210	1.0181	0.8709	0.8198	0.9995	0.9705	7
渝中		1.0108	1.1203	1.1056	1.1223	1.2123	1.1817	1.3285	1.3400	1.1777	2
北碚		0.7487	0.7266	0.7335	0.7962	0.8383	0.8268	0.8100	0.8965	0.7971	13

为低能耗产业；沙坪坝区坐处学府大区，交通枢纽，教育、经济、科技、人才各方面发达。生态效率平均值为“中”等级的有万州区和巴南区等。巴南区、北碚区等地处山清水秀地带，江津区、忠县的农业发展较发达。生态效率平均值为“差”等级的有大渡口区 and 奉节县等，这一等级的区县经济发展相对落后，没有高科技产业带动发展，产业结构单一，因此生态效率也不高。

4.2 2010—2017年三峡库区生态效率的动态演变特征

为了探讨三峡库区近年来的生态效率空间演变特征，本文将三峡库区26个区县2010—2017年的生态效率值导入Geoda软件，绘制2010—2017年三峡库区三个区域的生态效率水平柱状图，从而能更清晰、直观地呈现出三峡库区生态效率的空间特征。柱状条越长，代表生态效率值越高，图2至图4反映了2010—2017年三峡库区生态效率的动态演变趋势。从组内和组间差异来看，三峡库区生态效率在空间分布上呈现“西高东低”的非均衡性，即生态效率水平较高的区县主要集中在三峡库区库尾段，生态效率水平较低的区县主要集中在库首段。库尾区域除了大渡口区、江津区等少数个别排名靠后外，整体排名

靠前；库中区域除了石柱县、巫山县、涪陵区排名靠前外，其他都排名中等靠后；库首地区除宜昌夷陵外，整体排名最后，库首地区的生态效率平均值最低。

从时间跨度分析，2010—2017年生态效率水平整体有所提升，库尾区域的“聚强”效应已初步显现。2013年相较于2010年“两极分化”现象明显，即和2010年相比，库尾区域生态效率水平高的区县2013年愈发高，库首和库中区域生态效率水平低的区县2013年更低。2017年三峡库区整体生态效率水平有较大的提升，表明近年来国家重视长江生态建设，地方政府积极响应并取得初步成效。

4.3 2010—2017年三峡库区生态效率差异的空间分析

4.3.1 全局空间自相关分析

本文空间权重矩阵 W_{ij} 选取rook原则，运用GeoDa软件计算2010—2017年三峡库区生态效率的全局自相关Moran's I指数，并检验其显著性，所得结果如表3所示。从表3可以看出，各年份的Moran's I指数均为正，取值范围在0.014~0.258，说明三峡库区的生态效率存在正向的全局空间集聚效应，表现出

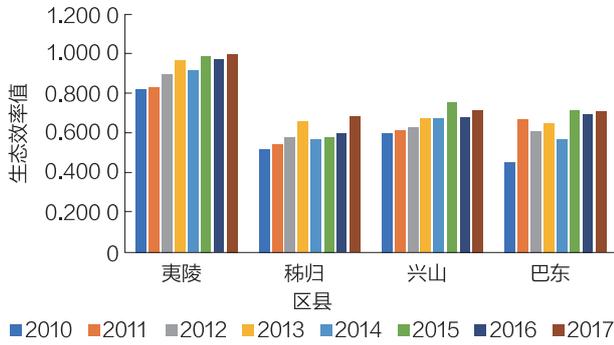


图2 库首区域各区县2010—2017年生态效率值变化趋势

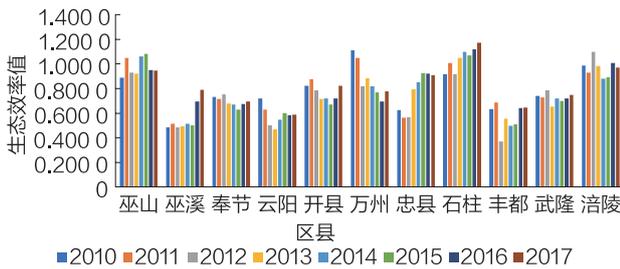


图3 库中区域各区县2010—2017年生态效率值变化趋势

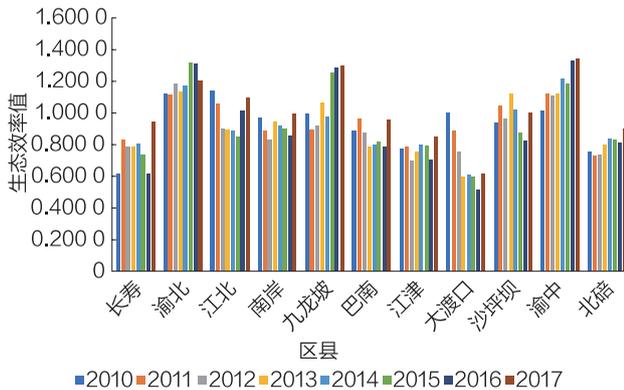


图4 库尾区域各区县2010—2017年生态效率值变化趋势

相同的聚集现象。Moran's *I* 指数呈 U 形波动，表示随着时间的推移其集聚程度呈波动变化。

4.3.2 局部空间自相关分析

为了分析三峡库区生态效率的局部差异特征，本文对 2010—2017 年三峡库区各区县生态效率的局域 Moran's *I* 指数进行了计算，并选取 2010 年、2013 年和 2017 年三个典型年份，绘制三峡库区生态效率的局部 Moran's *I* 散点图，如图 5 所示。Moran's *I* 散点图横轴对应变量 *X* 的所有观测值，纵轴对应空间滞后向量 W_{ij} ，由此可以把三峡库区 26 个区县划分为四种类型，分别落在不同的象限。其中，第 I 象限为高高型 (H-H)，表示生态效率值高的区县被紧邻的其他高值区县包围；第 II 象限为低高型 (L-H)，表示生态效率值低的区县被紧邻的其他高值区县包围；第 III 象限为低低型 (L-L)，表示生态效率值低的区县被紧邻的其他低值区县包围；第 IV 象限为高低型 (H-L)，表示生态效率值高的区县被低值区县包围。其中，高高型和低低型表示区域发展差异较小，呈正相关；高低型和低高型则表示区域发展差异较大。

分析图 5 和表 4 三峡库区各区县局部空间相关性可知：从各象限具体分布来看，大多数区县表现出在地理空间上显著的的正的空间自相关性，即高高型和低低型；从各个象限区县数量的变化来看，生态效率空间正相关占比由 2010 年的 61.54% 下降到 2013 年的 53.85%，又上升到 2017 年的 65.38%，表明 2010—2013 年三峡库区生态效率空间聚集性减弱，空间异质性逐渐增强，生态效率的区域整体差异在扩大。而 2013—2017 年，三峡库区生态效率空间聚集性显著增

表 3 2010—2017 年三峡库区生态效率全局自相关 Moran's *I* 检验

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Moran's <i>I</i>	0.257 7	0.164 2	0.097 6	0.229 0	0.192 8	0.044 8	0.014 4	0.200 1
Z 值	2.199 5	1.542 0	1.026 0	1.935 3	1.774 4	0.584 2	0.459 3	1.788 0
P 值	0.024 0	0.071 0	0.152 0	0.038 0	0.045 0	0.286 0	0.295 0	0.040 0

表 4 三峡库区生态效率的局部空间相关性聚类分布

年份	2010	2013	2017
高高型 (H-H)	渝北、沙坪坝、江北、九龙坡、南岸、渝中、巴南、大渡口	渝北、沙坪坝、江北、九龙坡、南岸、渝中	渝北、沙坪坝、江北、九龙坡、南岸、渝中、长寿、巴南
低高型 (L-H)	忠县、丰都、长寿、北碚、江津	忠县、丰都、长寿、北碚、江津、巴南、大渡口、	丰都、北碚、江津、大渡口
低低型 (L-L)	巫溪、兴山、云阳、巴东、奉节、秭归、武隆、夷陵	巫溪、兴山、云阳、巴东、奉节、秭归、武隆、开县	巫溪、兴山、云阳、巴东、奉节、秭归、武隆、开县、万州
高低型 (H-L)	巫山、石柱、涪陵、开县、万州	巫山、石柱、涪陵、夷陵、万州	巫山、石柱、涪陵、夷陵、忠县

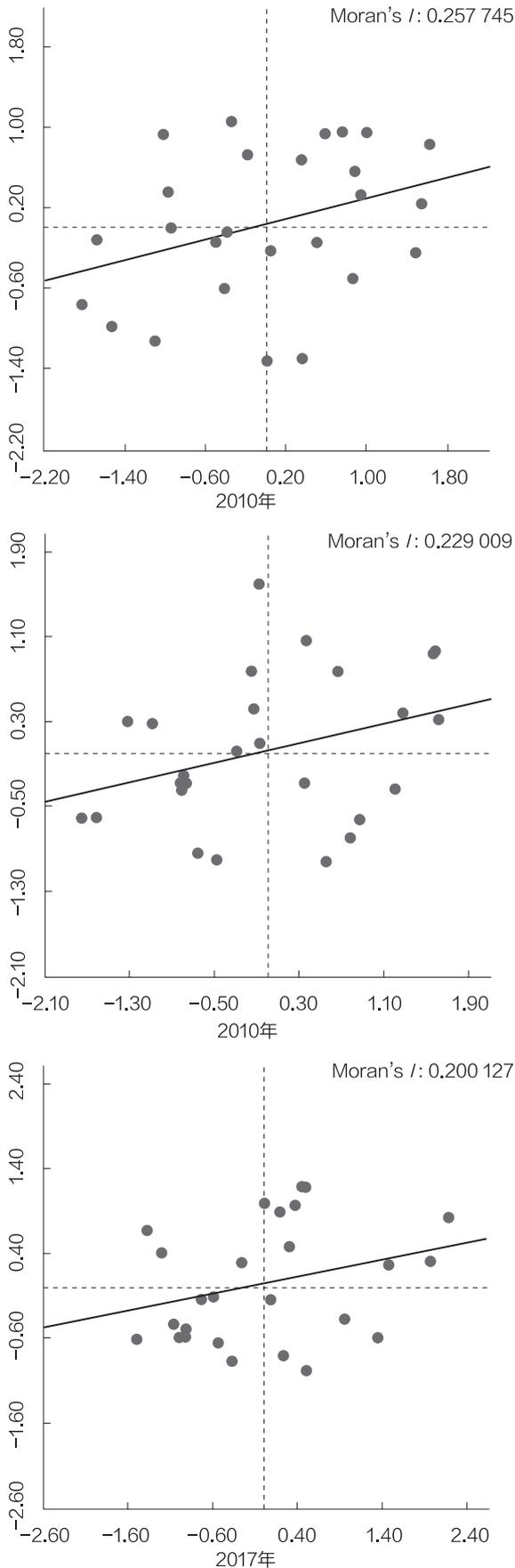


图5 2013—2017年三峡库区生态效率的Moran's I/散点图

强、空间异质性减弱，说明三峡库区的生态效率存在较显著的空间溢出效应。

(1) 高高型(H-H)。高高聚集区主要聚集在三峡库区库尾区域，渝北、沙坪坝、江北、九龙坡、南岸、渝中6个区县一直在高高聚集区中，并且都分布于三峡库区库尾段。这几个区县是重庆市主要的经济发达区，旅游资源被充分开发利用，产业结构丰富且积极引进高新科技项目，对周边区县的辐射带动效果也好，生态效率皆名列前茅并逐年向上提升。相反，大渡口从2010年的高高型转变成了2017年的低高型，这说明为了提升经济效益却对资源环境消耗太大会使生态效率下降，发展经济不能以牺牲环境为代价，不然会适得其反。

(2) 低高型(L-H)。低高聚集区主要分布在三峡库区库中区域，数量和对应的区县相对稳定，2010年只有忠县、丰都、长寿、北碚、江津，到2013年增加了巴南和大渡口，2017年又减少到北碚、丰都、江津、大渡口。这是因为这一类型的区域和库尾段生态效率高的区域地理位置相近，目前经济发展还不能和经济发达的高高型齐头并进，但是该类型具有被正向带动的地理优势，生态效率上升空间较大。

(3) 低低型(L-L)。低低聚集区主要集中在三峡库区库首区域以及和库首区域相连的库中区域，其中巫溪、兴山、云阳、巴东、奉节、秭归、武隆7个区县一直处于低低聚集区，占整个三峡库区的26.92%。这几个区县多崇山峻岭，可利用的土地资源有限，并且产业结构层次低下，缺乏高新科技产业带动经济发展，技术水平不高从而导致资源利用效率低下，生态效率水平低。巴东、秭归等区县要想摆脱生态效率低的现状必须调整当地的产业结构，把地理环境优势利用起来，着力开发旅游产业，合理引进优秀的外资企业，处理好经济效益和生态环境之间的关系。

(4) 高低型(H-L)。高低型聚集区分散在三峡库区各个区域，基本保持在5个区县数量不变，并且巫山、石柱、涪陵3个区县一直处于高低聚集区。该类型容易被外界影响而发生空间位移变化，并且这几个区县都有独特的经济发展方式，如巫山县的旅游资源、烟草行业、矿产资源丰富，石柱县是全国水土保持生态环境建设示范县，涪陵区是重庆市定位的中心城市等，但未对周围的区域产生明显的经济带动作用。夷陵区随着宜昌的迅猛发展生态效率提升较快，但由于没有健全的区域合作机制，周边区县的经济的发展并未跟上，夷陵区发生了由低低型到高低型的

转变。

综合以上分析可知：一方面，2010—2017年，三峡库区虽然整体生态效率呈现上升趋势，但从微观上分析会发现生态效率高的区县和生态效率低的区县呈现“两极分化”，且生态效率低的区县增长幅度小，局部空间关联性不高，生态效率高的区县对其周边县县的带动作用并不强；另一方面，生态效率低的区县也没有充分利用自身旅游资源的优势，积极开发旅游经济，引进或者投入高科技产业来提升经济效益，从而实现“低投入、低污染、高产出”。

5 研究结论与政策建议

5.1 研究结论

本文基于2010—2017年三峡库区26个区县的面板数据，构建生态效率投入产出模型，运用超效率DEA模型测度三峡库区26个区县近8年的生态效率水平，继而利用空间探索性分析方法对三峡库区生态效率的空间演化特征和差异进行分析，研究结论如下：

(1) 从时序分析结果来看，三峡库区整体生态效率水平在逐年提高，但是增长趋势较缓慢，整体生态效率水平略微偏低。各个区县之间差异明显，且两极分化情况有愈发严重趋势，均值范围从最低0.5601到最高1.1920，根据各区县效率差异可分为优、良、中、差四个等级。重庆市主城区渝北区和渝中区等生态效率几乎一直大于1，处于生产前沿面，是优等级；巫山县、涪陵等是略差一些的良等级；中等级的有南岸、巴南等；差等级有云阳、丰都、巫溪等区县。

(2) 从空间特征分析结果来看，三峡库区26个区县生态效率在空间上呈现“库首区域（不包含夷陵）衰弱、库中均衡（不包含石柱）、库尾聚强”的分布特征，库首区域到库尾区域呈现出缓慢上升趋势，生态效率差异明显，库尾区域的生态效率均值最高。夷陵是库首区域里生态效率值最高的，石柱是库中区域里最高的，渝北区的生态效率是整个三峡库区里最高。

(3) 从空间差异分析结果来看，全局空间自相关分析表明，三峡库区26个区县生态效率空间集聚效应2010—2012年从显著到显著性减弱，2013—2016年从显著到不明显，再到2017年的显著，整体呈“U”形波动，空间关联效应有再次增强趋势。局部空间自相关分析表明，生态效率高的区县和生态效率低的区县呈现“两极分化”的特征。

5.2 政策建议

根据研究结果，本文对提升三峡库区生态效率的政策建议如下：

(1) 因地制宜，分区域指导优化产业结构。不能一味地追求提升生态效率，过度追求反而会欲速则不达，要根据每个区县自身的特点来分类指导提升，适度开发。比如，经济发达的重庆主城区继续保持现在的高新技术多产业发展并持续优化，武隆在建的“一带一路影视创意文化产业城”的影视产业，经济不那么发达的奉节县、忠县等有得天独厚的旅游资源，则应该优化资源配置和生产空间布局，积极发展资源环境可承载的特色产业。

(2) 政府干预，制定规则，转变职能。三峡库区生态效率整体偏低，很重要的一个原因是没有统一的生态环境治理保护标准。生态效率水平高的区域对环境的治理更重视，如沙坪坝对治污不达标的企业坚决停业整顿，严格控制重化工业产能。加强相邻区县间的污染联合管制，制定库区统一的生态保护标准，共同监督管理，建立生态同建、环境同治的联防联控生态环境保护机制。政府部门转变以提高GDP来提升经济的政绩观，在考核中增加生态环境保护指标的比重，提升地区生态效率。

(3) 基于全流域视角优化三峡库区人口产业布局。三峡库区生态效率在空间分布上呈现“西高东低”的非均衡性，即库尾区域经济、生态环境均明显优于库首区域。因此，应建立“大流域三峡库区”，重构三峡库区经济骨架，系统布局库区人口和产业^[29]。例如，可以将宜昌市全境纳入库首区域，在库首区域形成一个强大的经济中心，集聚人口和产业，并辐射带动库腹区域发展。

参考文献

- [1] STEFAN S, ANDREAS S. Okologische rationalitat[R]. Die unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.
- [2] WBCSD. Eco-efficient leadership for improved economic and environmental performance[R]. Geneva: WBCSD, 1996: 3-16.
- [3] OECD. Organization for economic co-operation and development. Eco-efficiency. [R], 1998: 7-11.
- [4] 陈傲. 中国区域生态效率评价及影响因素实证分析：以2000—2006年省际数据为例[J]. 中国管理科学, 2008, 16(S1): 566-570.
- [5] 杨斌. 2000—2006年中国区域生态效率研究：基于DEA方法的实证分析[J]. 经济地理, 2009, 29(7): 1197-1202.
- [6] 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[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 443-450.
- [7] 邓波, 张学军, 郭军华. 基于三阶段DEA模型的区域生态效率研

- 究[J]. 中国软科学, 2011(1): 92-99.
- [8] 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[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 47-54.
- [9] KUOSMANEN T, KORTELAINEN M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. *Journal of industrial ecology*, 2005, 9(4): 59-72.
- [10] 陈浩, 陈平, 罗艳. 基于超效率 DEA 模型的中国资源型城市生态效率评价[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2015(2): 34-40.
- [11] CASU B, GIRARDONE C. Integration and efficiency convergence in EU banking markets[J]. *Omega*, 2010, 38(5): 260-267.
- [12] 吴振华, 雷琳. 基于三阶段 DEA 模型的农业土地生态效率研究——以河南省为例[J]. 生态经济, 2018, 34(10): 76-80.
- [13] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. *Journal of productivity analysis*, 2002, 17(1-2): 157-174.
- [14] 杨佳伟, 王美强. 基于非期望中间产出网络 DEA 的中国省际生态效率评价研究[J]. 软科学, 2017, 31(2): 92-97.
- [15] 曹俊文, 李湘德. 长江经济带生态效率测度及分析[J]. 生态经济, 2018, 34(8): 174-179.
- [16] 顾程亮, 李宗尧. 中国经济发展的生态效率研究——基于 FA-DEA 组合模型的面板数据实证分析[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(8): 932-937.
- [17] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. *Economic geography*, 1970, 46(S1): 234-240.
- [18] 李成宇, 张士强. 基于 DEA-Malmquist 指数和 Tobit 模型的区域生态效率评价及影响因素研究——以山东省为例[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2019, 21(3): 78-86.
- [19] 邢贞成, 王济干, 张婕. 长江经济带全要素生态效率的时空分异与演变[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 793-799.
- [20] 张新林, 仇方道, 王长建, 等. 长三角城市群工业生态效率空间溢出效应及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1791-1800.
- [21] 肖新成, 何丙辉, 倪九派, 等. 三峡生态屏障区农业面源污染的排放效率及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 60-68.
- [22] 黄娟, 刘玥. 三峡库区农业生态效率测度及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2018, 34(7): 123-127.
- [23] ANDERSON D. Energy efficiency and the economists: The case for a policy based on economic principle[J]. *Annual review of energy and the environment*, 1995, 20(1): 495-511.
- [24] 王艳秋, 姜冰玉, 赵天明, 等. 油气资源型城市生态工业园产业耦合共生网络生态效率评价[J]. 科技管理研究, 2019, 39(5): 51-58.
- [25] 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[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 444-450.
- [26] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 169-175.
- [27] 李在军, 姚云霞, 马志飞, 等. 中国生态效率的空间格局与影响机制分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(11): 4208-4217.
- [28] 陆砚池, 方世明. 基于 SBM-DEA 和 Malmquist 模型的武汉城市圈城市建设用地生态效率时空演变及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1575-1586.
- [29] 文传浩, 秦方鹏, 王钰莹, 等. 从库区管理到流域治理: 三峡库区水环境管理的战略转变[J]. 西部论坛, 2017, 27(2): 58-62.

Ecological Efficiency Evaluation and Spatial Evolution Pattern Analysis of the Three Gorges Reservoir Area Based on Super Efficiency DEA Model

XIE Yali¹, KE Xiaoling^{1,2*}, MIN Yuanyuan¹, GUO Haixiang¹, WANG Deyun¹

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Resources Environmental Economic Research Center of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To explore the space mechanism of regional difference variation of ecological efficiency in the three gorges reservoir area, based on the statistical data of 2010-2017, the ecological efficiency of 26 counties and cities in the three gorges reservoir area was calculated using super efficiency DEA model in this article. And then the empirical analysis for the ecological evolution pattern of ecological efficiency in this area was carried on using the spatial auto correlation analysis method, to explore the spatio-temporal dynamic evolution characteristics of ecological efficiency in local area. The results showed that the average ecological efficiency of the three gorges reservoir area was between 0.5601 and 1.1920 during 2010-2017, showing a fluctuating trend. The ecological efficiency had been improved to some extent, but the overall level was still low. From the regional level, the level of ecological efficiency among various counties and cities was unbalanced, which is higher in the west and lower in the east. Local spatial auto correlation analysis showed that the three gorges reservoir area integration had a gradually weakening trend during 2010-2016, the spatial heterogeneity was gradually increased, the ecological efficiency of the overall difference was larger, in 2017 to enhance spatial agglomeration effect, the ecological efficiency of counties and cities in neighboring counties and cities promoting effect was enhanced, low efficiency of ecological counties and cities also did not make full use of their own advantages, there was no maximum benefits of the resource. Finally, based on the results of empirical research, the paper put forward some policy suggestions on how to improve the ecological efficiency of the three gorges reservoir area.

Keywords: the three gorges reservoir area; super efficiency DEA; spatial correlation