

DOI: 10.20103/j.stxb.202204231115

丁莲,白羽萍,张莉金,冯喆,胡业翠,李志慧,刘伟.黄河流域城市群土地利用及生态效率时空演变分析.生态学报,2023,43(18):7610-7622.

Ding L, Bai Y P, Zhang L J, Feng Z, Hu Y C, Li Z H, Liu W. Spatio-temporal evolution of land use and eco-efficiency in urban agglomerations in the Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7610-7622.

黄河流域城市群土地利用及生态效率时空演变分析

丁 莲¹,白羽萍^{1,2,*},张莉金¹,冯 喆¹,胡业翠¹,李志慧^{2,3},刘 伟⁴

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083

2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室,北京 100101

3 中国科学院大学,北京 100049

4 山东师范大学地理与环境学院,济南 250013

摘要:黄河流域城市土地资源的合理高效利用和生态环境的治理可加强其生态保护和高质量发展进程,有效测度城市土地利用及生态效率至关重要。基于随机前沿分析(Stochastic Frontier Analysis, SFA)模型测算黄河流域 7 个城市群 59 个城市的土地利用效率(Land Use Efficiency, LUE)、生态绩效指数(Ecological Performance Index, EPI)和生态效率(Ecological Efficiency, EE),探究其时空变化规律并进行空间自相关分析。结果表明:对比分析非约束模型与约束模型的结果可知,加入生态变量后的 LUE 平均值增加 4.43%。黄河流域城市群 LUE 年平均值为 0.89,多数城市 LUE 呈增加趋势,空间上呈现出西低东高的分布特征;EPI 大于 0 的城市占比 90%以上,其对土地利用效率有正向贡献;城市群 EE 年平均值为 0.62,在空间上呈现出西高东低的分布格局,并存在显著正向的空间聚集格局特征;EE 与 LUE 呈 U 型关系变化,LUE 随 EE 增大呈现出先降低后提升的变化趋势。未来黄河流域应提高资源利用强度,优化资源配置,深化城市群跨区域交流合作,注重城市生态效率提升,构建高质量发展大格局。

关键词:黄河流域;土地利用;生态效率;随机前沿分析;空间自相关

Spatio-temporal evolution of land use and eco-efficiency in urban agglomerations in the Yellow River Basin

DING Lian¹, BAI Yuping^{1,2,*}, ZHANG Lijin¹, FENG Zhe¹, HU Yecui¹, LI Zhihui^{2,3}, LIU Wei⁴

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250013, China

Abstract: The rational and efficient use of urban land resources and ecological environment management can strengthen the ecological protection and high-quality development process in the Yellow River Basin. Therefore, it is crucial to effectively measure urban land use efficiency and eco-efficiency. Based on Stochastic Frontier Analysis (SFA) model, this study measures the Land Use Efficiency (LUE), Ecological Performance Index (EPI) and Ecological Efficiency (EE) of 59 cities in 7 urban agglomerations in the Yellow River Basin and analyzes their spatial and temporal variation patterns from 2005 to 2018. Then, this study conducts the spatial autocorrelation analysis of LUE and EE, and further explores the relationship between LUE and EE. The results of this study show that the mean land use efficiency increases by 4.43% after the addition of ecological variables when comparing the test results of the unconstrained model with those of the constrained

基金项目:国家自然科学基金项目(72104223);中国科协青年人才托举工程项目(YESS20210041);自然资源部国土空间规划研究中心外协项目(JC202303031)

收稿日期:2022-04-23; **网络出版日期:**2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baiyp@cugb.edu.cn

model. The mean value of land use efficiency of the urban agglomerations in the Yellow River Basin is 0.89, and most cities show an increasing trend of land use efficiency, with the spatial distribution characteristic of low in the west and high in the east. The percentage of cities with ecological performance index greater than 0 is more than 90%, indicating that the addition of ecological variables contributes to the improvement of land use efficiency of most cities in the Yellow River Basin. The annual mean value of ecological efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin is 0.62, which shows a spatial distribution pattern of high in the west and low in the east, and significantly positively spatial aggregation pattern characteristic. With further analysis, we find that ecological efficiency and land use efficiency change in a U-shaped relationship, indicating that land use efficiency shows a trend of first decreasing and then increasing with the increasing ecological efficiency. This study reveals the relationship among urban land use, ecological benefits and social-economic effects in the urban agglomerations of the Yellow River Basin, which can provide a reference for the development of new urbanization, efficient use of land resources, ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. Based on the empirical analysis results, we suggest that the Yellow River Basin is supposed to improve the intensity of resource utilization, optimize the allocation of various resources for cities in the basin, deepen cross-regional exchanges and cooperation among different urban agglomerations and cities, focus on the improvement of urban ecological efficiency, and build a high-quality development pattern in the future.

Key Words: the Yellow River Basin; land use; ecological efficiency; stochastic frontier analysis; spatial autocorrelation

黄河作为世界第五大长河,且是我国重要的生态功能区和经济地带,聚焦解决流域内生态环境问题且提高其城市生态效益势在必行^[1]。生态效益的测定既要考虑经济效益,又涉及环境影响施加的限制及可用资源的有效利用。随着城市化进程的发展,黄河流域内城市自然生态系统受到各种人类活动的强烈干扰^[2],而土地资源影响生态环境系统和社会经济发展,以最小生态投入提高土地利用效率获得最大经济效益可以增进区域人类福祉^[3]。2019年黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,生态文明建设成为主要目标任务^[4]。因此,定量测算土地利用及生态效率并探究其时空关系,可以为黄河流域城市扩张过程中生态环境保护提供决策参考。

目前,度量技术效率的生产前沿分析方法分为参数法和非参数法,前者主要以 SFA (Stochastic Frontier Analysis, SFA) 为代表,后者主要以数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 为代表^[5]。已有学者通过构建相关评价指标体系基于 DEA 及其改进模型进行效率值测算并探究其影响机制^[6]。Meeusen & van den Broeck 等人最早提出 SFA 模型,将其应用到计量经济方面的研究^[7-8]。近年来国内学者相继在研究中将 SFA 模型优化完善,引入区域视角的土地利用及生态效率理论概念进行效率定量测算^[9],并分析其溢出效应与影响因素之间的差异关系^[10]。对比可知,DEA 中投入与产出项对效率评价结果有决定性的影响,而 SFA 考虑了随机因素对产出的影响,其对于现实生产函数的拟合性程度要求比 DEA 方法要高,结果更加合理精确。

黄河流域地理环境特殊,上中下游在资源、经济、产业结构和技术水平等方面差异明显^[11]。新时代背景下黄河流域的自然资源环境保护与国民社会经济生产力建设已步入高质量新发展阶段^[12]。黄河流域发展的主要载体是城市群,然而伴随着我国城市化的快速发展演变,区域内发展不均衡等典型问题较为突出^[13]。以往对城市群效率研究中评价指标体系的建立较少考虑到快速推进城镇化进程中生态损耗,且多数研究选择了长三角^[14]、京津冀等地区^[15],但对黄河流域内城市群的发展质量关注不足。为均衡黄河流域典型城市群的土地资源和生态环境效益发展,本研究运用 SFA 模型从城市群尺度上测算黄河流域 7 个典型城市群中共 59 个城市 2005—2018 年的土地利用效率 (Land Use Efficiency, LUE) 及生态效率 (Ecological Efficiency, EE),探究其长时间序列时空演变规律及其空间权衡关系,揭示黄河流域典型城市群土地利用、生态效益和社会经济效益的相互关系,为实现土地资源可持续发展与流域内生态环境保护及经济发展提供一定的借鉴。

1 数据源与方法

1.1 研究区与数据处理

黄河流域总面积约 255.05 万 km²,是我国重要的自然保护区域,在促进我国社会经济发展与生态安全格局方面占据着重要的作用。在国家“十三五”规划《纲要》明确的 19 个国家级城市群中,分布在黄河流域沿线 9 省区的有 7 个,其中,中原、关中、呼包鄂榆、兰西 4 个城市群为跨省级行政区域城市群。本文选取黄河流域内 7 个城市群所涵盖的 59 个地级市作为研究区(图 1、表 1)。

数据来源于《中国统计年鉴》、《中国区域经济统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、各市相关年份国民经济和社会发展统计公报。行政区划与 1km 空间分辨率植被指数数据由中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供。相关经济指标数据均以 2005 年为基年进行 GDP 平减消除通货膨胀处理后^[16],制备成面板序列数据作为初始数据源。

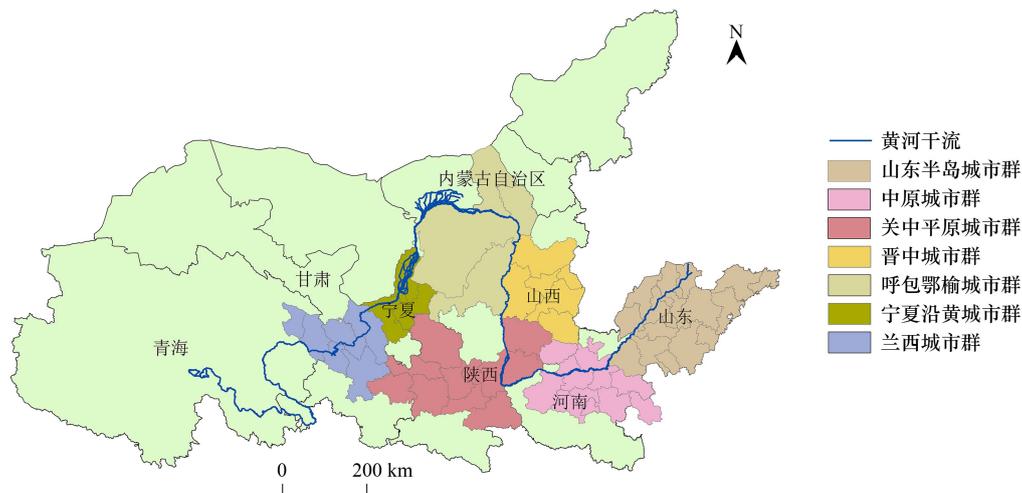


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

表 1 研究区城市群构成

Table 1 Composition of urban clusters in the study area

城市群名称 Urban Cluster	城市构成 Cities	缩写 Abbreviation
山东半岛城市群 Shandong Peninsula Urban Agglomeration	济南、青岛、淄博、枣庄、潍坊、烟台、临沂、东营、德州、济宁、菏泽、聊城、滨州、泰安、威海、日照、莱芜市	SD
中原城市群 Central Plains urban agglomeration	郑州、洛阳、开封、平顶山、新乡、焦作、许昌、漯河、鹤壁、商丘、周口、晋城、亳州市	CP
关中平原城市群 Guanzhong Plain City Group	西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、商洛、运城、临汾、天水、平凉、庆阳市	GZ
晋中城市群 Jinzhong City Group	太原、忻州、吕梁、晋中、阳泉、长治市	JZ
呼包鄂榆城市群 Hubaoeyu Urban Agglomeration	呼和浩特、包头、鄂尔多斯、榆林市	HE
宁夏沿黄城市群 Ningxia Urban Agglomeration along the Yellow River	银川、石嘴山、吴忠、中卫市	NX
兰西城市群 Lanxi Urban Agglomeration	兰州、定西、白银、西宁市	LX

城市群城市构成来源于《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中的文本

1.2 指标体系构建

投入产出指标体系的构建是 SFA 模型测算效率的基础。劳动力、土地、资本是经典生产函数中的传统投入要素^[17]。为科学测算黄河流域城市群土地利用效率及生态效率,且考虑数据的可获得性和黄河流域自然资源特征,确定选取的投入指标包括建成区面积、城镇年末从业人员、固定资产投资、城镇人均可支配收入、市辖区绿化覆盖面积^[18-19];此外,为表征城镇发展过程中生态环境资源损耗导致的生态植被覆盖度的变化情况,故研究将植被覆盖度指数作为生态投入引入到生产函数中。选取综合反映城市经济发展水平的非农产值作为产出指标,构建并确定效率测度的投入产出指标体系(表 2)。

表 2 投入产出指标体系

Table 2 Input-output indicator system

指标类别 Indicator category	指标 Indicator	符号 Symbols	指标说明 Indicator description	单元 Unit
投入指标 Input indicators	建成区面积	x_1	城市化发展的土地投入	km ²
	年末从业人员数量	x_2	劳动力要素对城市化发展的贡献	万人
	固定资产投资总额	x_3	单位投资形成的资本	万元
	植被覆盖指数	x_4	城市化发展损耗的生态资源	0—1
	绿化面积	x_5	能够用于绿化的土地面积	hm ²
	城镇人均可支配收入	x_6	居民用于安排生活的收入	元
产出指标 Output indicators	非农产值	Y	非农经济产出	万元

1.3 研究方法

1.3.1 SFA 模型构建

SFA 是一种利用随机前沿生产函数进行效率估计的参数方法。模型的原理是通过考虑估计生产函数受到的随机冲击而保证产出处于效率前沿。该方法广泛应用于经济学、自然资源效率测算^[20-22]。具体模型形式及效率定义如下:

$$y_i = f(x_i; \beta) \times \exp(v_i) \times \exp(-u_i) \quad (1)$$

式中, $f(x_i; \beta) \times \exp(v_i)$ 是随机前沿, $f(x_i; \beta)$ 反映投入与产出间确定性的技术结构关系, $\exp(v_i)$ 为随机因素, $\exp(-u_i)$ 为技术效率,具体到本研究是城市土地利用效率(LUE)。

基于面板数据构成的投入产出指标体系构建投入产出模型,在具体选择生产函数时,较为常用的有柯布道格拉斯和超越对数两类,考虑到超越对数生产函数不受替代弹性不变假设的约束,增加了二次的项数,有利于捕捉各投入要素的时变特性,更好地反映投入变量间的交互作用^[23]。因此选择采用超越对数生产函数,构建包含生态变量的 SFA 非约束模型:

$$\ln y = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \ln(x_k) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K a_{kl} \ln(x_k) \ln(x_l) + a_z \ln(x_z) + \sum_{k=1}^K a_{kz} \ln(x_k) \ln(x_z) + \frac{1}{2} a_{zz} (\ln(x_z))^2 + a_{kt} \sum_{k=1}^K x_k t + a_t t + a_u t^2 + v_i - u_i \quad (2)$$

式中, x_k, x_l 表示除去生态变量植被覆盖指数对应的其余 K 种投入变量,包括建成区面积、城镇年末从业人员、固定资产投资、城镇人均可支配收入、市辖区绿化覆盖面积等; x_z 代表生态变量植被覆盖指数; a 为变量的弹性系数; y 代表产出变量; t 为时间序列; v_i 为随机误差项,假设独立同分布 $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)^+$; u_i 为技术无效率项,独立同分布于半正态随机变量 $u_i \sim N(u_i, \sigma_u^2)^+$, 将上述非约束模型中所有包含生态变量 x_z 去掉即为约束模型。

1.3.2 效率值构建

LUE 定义为土地利用产出与处于生产前沿上潜在最大产出的比值:

$$\text{LUE} = \frac{f(x_i, \beta) \times \exp(v_i - u_i)}{f(x_i, \beta) \times \exp(v_i)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

EPI 定义为包含生态变量的 LUE_{xeco} 与去除生态变量的 LUE_{xeco} 差的比值:

$$EPI = \frac{LUE_i(xeco, y) - LUE_i(x, y)}{LUE_i(x, y)} \quad (4)$$

进一步,本研究中生态效率(EE)指在其他投入和产出都不变的情况下,最小可行植被覆盖指数与实际投入植被覆盖指数的比值。为了测算 EE,假设特定经济产出保持一定时当生态投入最小时生态效率最高,故分别将 x_z, u_i 替换为最小生态投入 x_z' 及其对应的技术无效率项 u_i' ,即为假设的最小植被覆盖投入对应的最优生态效率生产函数,其表达形式如下:

$$\ln y = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \ln(x_k) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K a_{kl} \ln(x_k) \ln(x_l) + a_z \ln(x_z') + \sum_{k=1}^K a_{kz} \ln(x_k) \ln(x_z') + \frac{1}{2} a_{zz} (\ln(x_z'))^2 + a_{kt} \sum_{k=1}^K x_k t + a_l t + a_u t^2 + v_i - u_i' \quad (5)$$

将替换式(5)减式(2),得到如下形式:

$$\frac{1}{2} a_{zz} (\ln(x_z') - \ln(x_z))^2 + (a_z + a_{zz} \ln(x_z) + \sum_{k=1}^k a_{kz} \ln(x_k)) (\ln(x_z') - \ln(x_z)) - u_i' + u_i = 0 \quad (6)$$

令上式 $a = \frac{1}{2} a_{zz}$, $b = (a_z + a_{zz} \ln(x_z) + \sum_{k=1}^k a_{kz} \ln(x_k))$, $c = -u_i' + u_i$ 。

当地区土地利用效率达到最高值和生态效率达到最优状态时得出生态效率 $EE = \frac{x_z'}{x_z}$,推出 $\ln EE = \ln(x_z') - \ln(x_z)$,可以得到生态效率 EE 如下:

EE 定义为

$$EE = e^{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (7)$$

1.3.3 空间相关性检验

全局 Moran's I 可以反映变量在整个空间上是否存在空间自相关^[24]:

$$\text{Moran's } I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=0}^n z_i^2} \quad (8)$$

$$S_0 = \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j \quad (9)$$

局部 Moran's I 进一步探究区分局部区域与其相邻区域之间的空间连接模式^[25]:

$$I = \frac{n^2 z_j \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{i=0}^n z_i^2} \quad (10)$$

式中, n 为样本总量; w_{ij} 为 i 与 j 间的空间权重, z_i, z_j 为 i, j 与其均值的差。

2 结果与分析

2.1 模型结果检验

对模型结果进行最大似然估计(Maximum Likelihood Estimate, MLE)检验(表3)。在95%置信水平上,非约束模型中多数参量较约束模型显著水平均有所提高。似然比检验(Likelihood Ratio, LR)的实质是比较约束与非约束条件下的似然函数最大值之比,赤池信息量准则(Akaike Information criterion, AIC)可以有效权衡所估计模型的复杂度及其拟合数据的优良性。比较可得:非约束模型的 LR 为 16.82,且在1%显著水平上拒绝原假设,因此在模型估计时控制无效率影响因素是必要的,约束模型的 LR 为 11.71,前者数值大于后者,说

明非约束模型的结果更显著;非约束模型中 AIC 为-761.081,约束模型的 AIC 为-689.440,前者数值小于后者,拟合效果更好。因此,本研究对土地利用无效率项的非约束模型模拟更优,后续 LUE、EPI 和 *EE* 等分析均选取非约束模型测算的结果展开。

表 3 土地利用效率的 MLE 结果

Table 3 The MLE results of land use efficiency

变量 Variables	非约束模型 Unconstrained	约束模型 Constraint	变量 Variables	非约束模型 Unconstrained	约束模型 Constraint
$\ln(x_1)$	1.601 [*] (1.41)	-0.006 (-0.01)	$\ln(x_2) \times \ln(x_6)$	0.172 (0.89)	-0.138 (-0.84)
$\ln(x_2)$	-0.820 [*] (-0.64)	1.239 (1.21)	$\ln(x_3) \times \ln(x_4)$	-0.164 (-1.87)	
$\ln(x_3)$	2.702 ^{***} (1.33)	0.486 (0.47)	$\ln(x_3) \times \ln(x_5)$	-0.082 (-1.57)	-0.244 ^{***} (-5.65)
$\ln(x_4)$	4.547 ^{***} (-3.29)		$\ln(x_3) \times \ln(x_6)$	-0.117 (-0.74)	0.006 (0.04)
$\ln(x_5)$	-2.277 ^{**} (-2.63)	-1.419 (-1.68)	$\ln(x_4) \times \ln(x_5)$	0.266 ^{***} (3.64)	
$\ln(x_6)$	11.192 ^{***} (3.82)	10.994 ^{***} (3.92)	$\ln(x_4) \times \ln(x_6)$	-0.353 (-1.52)	
$0.5 \times (\ln(x_1))^2$	0.236 [*] (2.22)	0.145 (1.45)	$\ln(x_5) \times \ln(x_6)$	0.481 ^{***} (3.75)	0.599 ^{***} (4.61)
$0.5 \times (\ln(x_2))^2$	-0.176 ^{***} (-3.46)	-0.186 [*] (-2.06)	t	-1.121 ^{***} (-4.11)	-1.051 ^{***} (-4.11)
$0.5 \times (\ln(x_3))^2$	-0.059 (0.23)	0.055 (0.66)	t^2	-0.006 (-1.85)	-0.006 (1.77)
$0.5 \times (\ln(x_4))^2$	0.494 ^{**} (2.68)		$t \ln(x_1)$	0.043 ^{***} (2.92)	0.037 [*] (2.53)
$0.5 \times (\ln(x_5))^2$	-0.853 ^{***} (-1.82)	-0.068 (-1.79)	$t \ln(x_2)$	-0.040 ^{***} (-2.56)	-0.020 (-1.51)
$0.5 \times (\ln(x_6))^2$	-1.266 ^{**} (-2.68)	-1.438 ^{**} (-3.01)	$t \ln(x_3)$	0.042 ^{***} (3.14)	0.030 [*] (2.28)
$\ln(x_1) \times \ln(x_2)$	0.273 ^{***} (-2.37)	-0.248 ^{***} (-3.42)	$t \ln(x_4)$	0.022 (1.00)	
$\ln(x_1) \times \ln(x_3)$	-0.147 ^{***} (0.50)	0.157 [*] (2.39)	$t \ln(x_5)$	-0.042 ^{***} (-3.73)	-0.041 ^{***} (-3.56)
$\ln(x_1) \times \ln(x_4)$	0.111 ^{**} (1.60)		$t \ln(x_6)$	0.072 ^{***} (1.76)	0.078 (1.93)
$\ln(x_1) \times \ln(x_5)$	-0.341 ^{***} (-0.42)	-0.039 (-0.71)	_cons	-50.274 ^{***} (-4.02)	-44.554 ^{***} (-4.36)
$\ln(x_1) \times \ln(x_6)$	0.267 [*] (-1.50)	-0.243 (-1.44)	lnsig2v_cons	-4.291 ^{***} (-20.74)	-4.157 ^{***} (-21.99)
$\ln(x_2) \times \ln(x_3)$	-0.023 (-0.08)	0.027 (0.34)	lnsig2u_cons	-3.933 ^{***} (-9.29)	-3.988 ^{***} (-8.81)
$\ln(x_2) \times \ln(x_4)$	-0.274 ^{***} (-2.39)		N	826	826
$\ln(x_2) \times \ln(x_5)$	0.136 ^{***} (3.32)	0.237 ^{***} (5.40)	LR	16.82	11.71
			AIC	-761.081	-689.440

MLE: 最大似然估计 Maximum Likelihood Estimate; * $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$, 括号内数值表示 t 统计量

2.2 影响因素分析

在构建的生产函数指标体系中,除绿化覆盖面积和年末从业人员数量外,其他投入要素均与非农产值呈极显著正相关,为 1% 水平显著。年末从业人员数量和绿化覆盖面积分别在 10% 和 5% 水平上与非农产值呈

显著负相关,就黄河流域城市经济体实际背景和人口分布情况而言,劳动力密集型产业是地区产值的主要来源,可能是劳动力数量的不均衡会导致生产率下降进而影响地区产值。建成区面积在 10%置信水平上与非农产值正相关,可见增加城市土地资源的开发对单位面积土地产出的提高有直接正向影响,固定资产投资总额、城镇人均可支配收入和植被覆盖指数与非农产值呈极显著正相关,在黄河流域多数城市经济实际发展背景下,投资对于多数城市仍可以作为一种促进经济发展的手段,城市扩张占用的耕地、林地、草地等生态资源短时间内会大幅增加经济收益,城镇居民收入增加带动生产生活水平的提升,推动地区经济产出的发展,但在今后城镇化发展转型中应不断提升全要素生产率、增强产业科技化水平。

2.3 效率值测算

2.3.1 LUE 测算与分析

基于 Stata 平台运行编写的 SFA 效率算法,得到黄河流域 59 个城市的 LUE 值,并绘制其频率分布直方图(图 2),结果满足地统计学中要求的负偏态分布。进一步,汇总 2005—2018 年黄河流域 7 个城市群的 LUE 动态变化特征(图 3)。

时间上,2005—2018 年黄河流域城市群土地利用效率平均值为 0.89。其中,山东半岛城市群、晋中城市群、呼包鄂榆城市群、宁夏沿黄城市群、兰西城市群总体上 LUE 呈上升趋势,中原城市群、关中平原城市群 LUE 稍有降低。到 2018 年 7 个城市群的 LUE 均达到 0.90

以上。具体而言,晋中城市群、兰西城市群增幅最为明显,山东半岛城市群、中原城市群、关中平原城市群起点较高,而宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆城市群起点较低,整体 LUE 也实现较快增长。兰西城市群 LUE 具有波动式特征,土地利用效率阶段式下降后逐渐提升,2013 年下降程度较大,虽然在西部大开发战略推动下城市群发展趋势向好,但固定资产投资的降低对区域发展高新技术产业、完善基础设施建设等有较明显的负面影响,

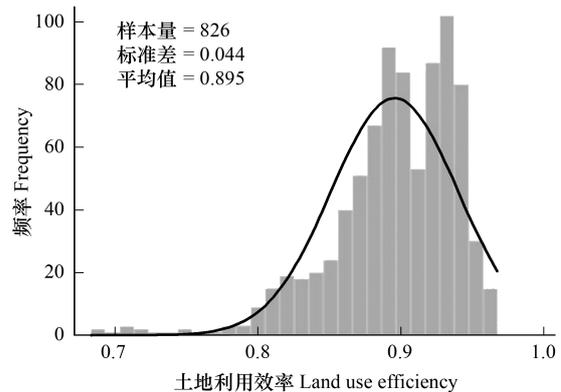


图 2 土地利用效率频率分布直方图

Fig.2 Histogram of frequency distribution of land use efficiency

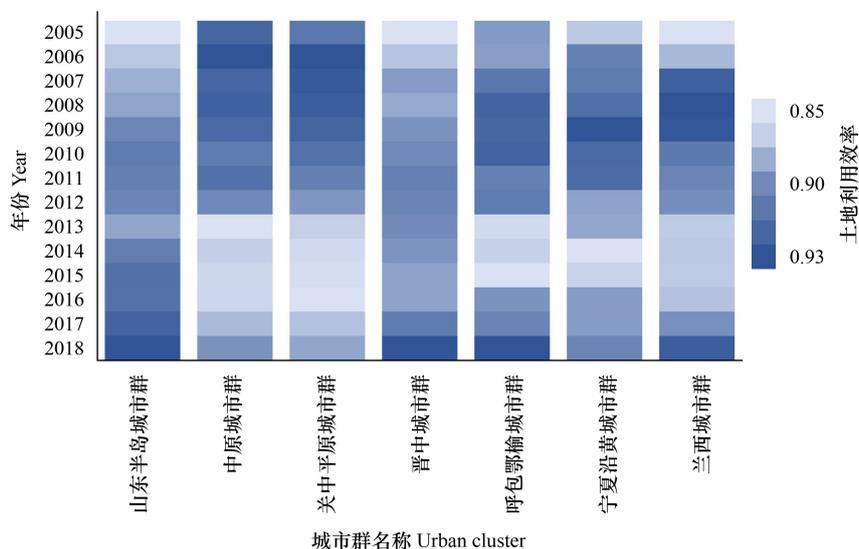


图 3 黄河流域城市群 LUE 热力图

Fig.3 Heat map of LUE of urban agglomerations in the Yellow River Basin

LUE: 土地利用效率 Land use efficiency

且存在土地利用不集约、不充分等问题。中原城市群 2013 年以来承接大量东部沿海地区转移的产业,城市化推进速度加快,城市空间盲目扩张造成了土地粗放利用,对环境和居民生活产生一系列的负面影响,土地利用效率有所下降。关中平原城市群中小城市建设分散了大中城市的建设资源,城市承载力有限且规模体系不完整,对人口、产业、资本等要素的集聚能力较弱,2013 年后工业化进程中侵占了大量耕地,造成土地利用效率降低。

空间上,基于 ArcGIS 平台中对 LUE 在 2005 年、2009 年、2014 年、2018 年的分布做可视化处理(图 4)。从总体来看,空间上呈现出西低东高的分布特征。2005—2018 年间,流域内城市 LUE 由西向东均呈现出不同程度的增长趋势,其中,上、中游城市由于其土地利用效率基数较小,土地利用效率增长变化较为明显,而下游城市由于投入要素空间配置相对合理,土地利用效率增长变化较为平缓。呼和浩特、包头、榆林市和东营市等城市具有较高且稳定的 LUE 值,呼和浩特、包头矿产资源丰富,使得劳动力和经济要素得以加速跨区域流动,劳动力、资本集聚效应不断显现,产生了良好的土地利用经济效益,但与下游同级别城市相比,仍有一定差距。榆林市作为陕北国家级高端能源化工基地,近年来经济产值、就业人口提升明显,促进地区建设用地的土地开发强度增加。东营市凭借其在山东半岛城市群的优势区位条件,作为胶东半岛经济区的交通枢纽,是我国重要的石油基地,经济发展迅速,土地集约利用水平较高,2018 年 LUE 值达到 0.950。铜川、太原、商洛等城市的 LUE 一直处于低速发展状态。铜川市是典型的资源型城市,产业结构较为单一,严重制约经济发展,产业结构调整 and 布局优化刻不容缓,同时受地形地貌条件影响,其土地质量较低,城区面积不足进而城市空间发展受到约束。太原市较低 LUE 值表明,在一定投入水平和技术条件下,其土地利用的实际产出与期望产出之间存在较大差距,其劳动力、资本和建设用地等投入要素的空间配置尚未达到最优化,现有技术尚未得到充分利用,未能有效利用其地理位置优势发挥经济作用。商洛 LUE 值较低的原因是农村贫困问题严重,产业发展滞后,应进行产业升级促进非农产业的发展。

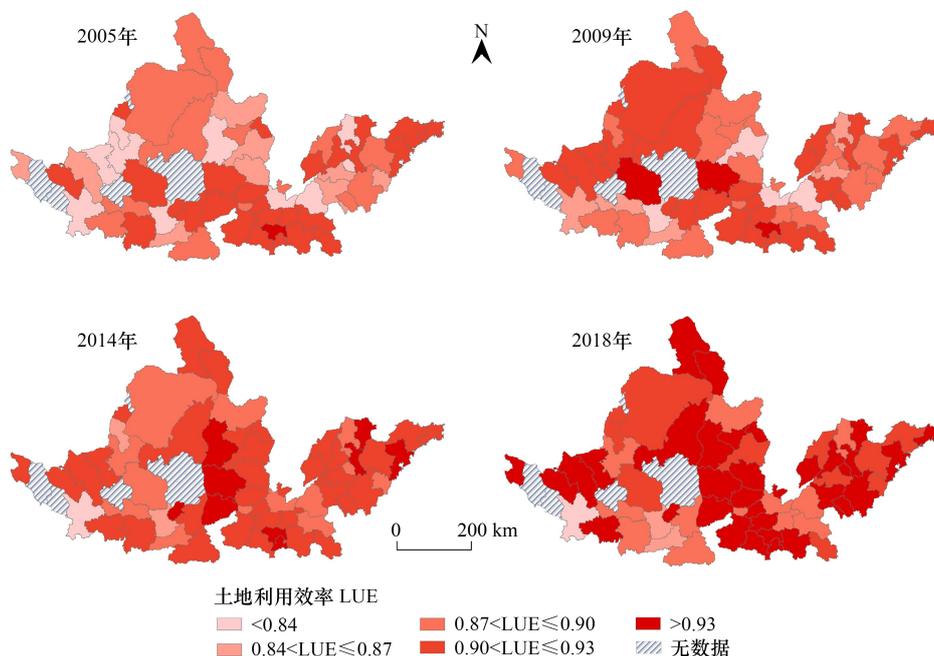


图 4 黄河流域城市 LUE 时空分布

Fig.4 Spatial and temporal distribution of urban LUE in the Yellow River Basin

计算黄河流域 59 个城市 2005—2018 年 EPI 正负占比,EPI>0 代表投入生态变量对提高土地利用、促进经济发展有正向贡献,EPI<0 则对其有负向贡献。其中,黄河流域城市群 59 个城市中 EPI 大于 0 占比 90%以

上(表4),表明绝大多数城市的生态投入可以提升区域资源利用,EPI 小于 0 的城市表明尽管在城市建设过程中消耗一定的植被资源,却对城市土地利用效率提升没有显著贡献。2009 年后,EPI 大于 0 的城市占比 98%以上,总体上黄河流域多数城市生态资源的投入对产生的土地利用及经济价值贡献显著,生态资源的绿色发展充分转化为相应的社会经济价值。

表 4 2005—2018 年 EPI 值正负占比情况

Table 4 Percentage of positive and negative EPI values, 2005—2018

年份 Year	小于 0 <0	占比/% Proportion	大于 0 >0	占比/% Proportion	年份 Year	小于 0 <0	占比/% Proportion	大于 0 >0	占比/% Proportion
2005	4	6.78	55	93.22	2012	1	1.70	58	98.30
2006	4	6.78	55	93.22	2013	1	1.70	58	98.30
2007	2	3.39	57	96.61	2014	1	1.70	58	98.30
2008	2	3.39	57	96.61	2015	1	1.70	58	98.30
2009	1	1.70	58	98.30	2016	2	3.39	57	96.61
2010	1	1.70	58	98.30	2017	2	3.39	57	96.61
2011	1	1.70	58	98.30	2018	2	3.39	57	96.61

EPI: 生态绩效指数 Ecological Performance Index

2.3.2 EE 测算与分析

对非约束模型下的 EE 进行统计整理,得到 7 个城市群分 2005—2018 年 EE 变化规律(图 5)。值得注意的是,本研究中 EE 值与快速城市化建设过程中对生态植被资源的开发利用有关,其值越小代表城市化发展进程中付出的生态代价越高。

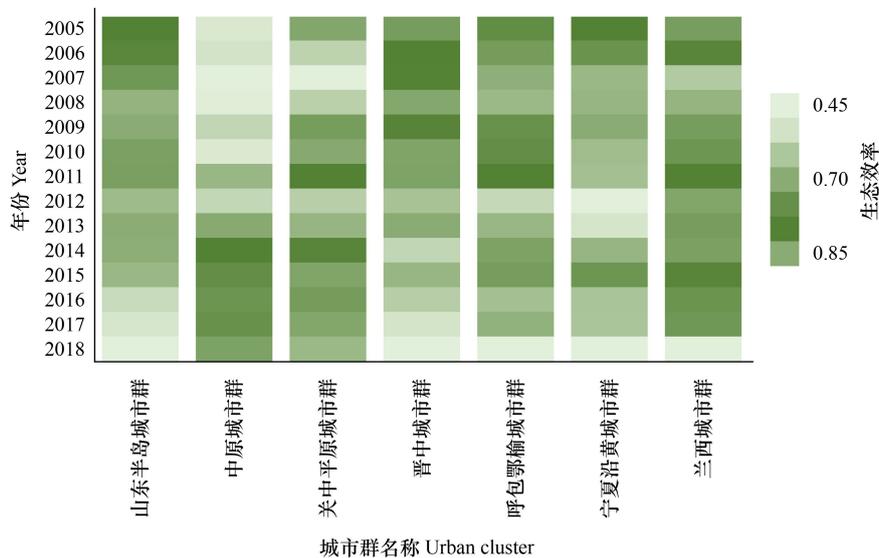


图 5 黄河流域城市群 EE 热力图

Fig.5 Heat map of EE of urban agglomerations in the Yellow River Basin

EE: 生态效率 Ecological Efficiency

时间上,山东半岛城市群、晋中城市群 EE 总体上呈由高到低下降趋势,中原城市群 EE 平稳增加,关中平原城市群、呼包鄂榆城市群、宁夏沿黄城市群、兰西城市群 EE 呈波动式上升后下降变化趋势。整体上黄河流域城市群原始自然资源条件不尽相同,但城市化发展进程中土地利用导致地区付出的生态代价越来越大,多数地区存在过度消耗生态植被资源的情况。EE 高低分部存在明显差异,呼包鄂榆城市群、宁夏沿黄城市群、兰西城市群的 EE 值在高值区(0.7 以上)。山东半岛城市群 EE 值总体为下降趋势,生态植被资源作为投入

要素转化为经济产值的效率低。晋中城市群 EE 短暂上升后呈下降趋势,城市群内大部分城市由于生产技术革新速度慢、生态资源保护措施薄弱等原因,生态效率没有出现明显转机。呼包鄂榆城市群 EE 先上升,到 2012 年后有所降低,这是由于上游的经济实力相对较弱,创新动力不足,绿色治理技术落后,且区位条件所限,城市间互动交流较少,生态要素不能实现合理有序流动,生态投入未能有效为土地资源和经济要素提供较强价值贡献。宁夏沿黄城市群 EE 波动式上升后下降,区域经济基础相对薄弱,加之自然因素制约下生态环境脆弱, EE 在 2014 年、2015 年稍有增加,这可能与被依托为生态文明先行区等一系列政策措施实施有关。中原城市群 2012 年后 EE 逐年增加,这与《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》、《“十三五”生态环境保护规划》出台的实施成效密不可分。兰西城市群 EE 较高但呈波动变化,兰西城市群紧靠黄河发源地,生态环境容量的有限性对城市有较强约束力,核心城市兰州带动周围生态水平较低的城市。

空间上,2005 年、2009 年、2014 年、2018 年的黄河流域城市 EE 等级空间分布如图 6 所示。总体上 EE 呈现西高东低、逐年降低的变化趋势。具体而言,西部地区呼包鄂榆城市群、宁夏沿黄城市群城市与晋中城市群部分城市的 EE 较东部地区城市群城市高。说明就生态环境方面,西部地区城市城镇化速度相对较慢,同时生态环境未被过度破坏且开发程度较低,中原地区城市的生态用地转化为建设用地后,导致植被覆盖损耗增加,这些城市区位条件相对更好,新增建设用地的产出率和利用率更高,但与此同时由于快速发展经济带来较多生态环境问题,这与山东半岛城市群、中原城市群人口基数大劳动力多、土地资源相对紧张等联系密不可分。呼包鄂榆城市群的中心城市鄂尔多斯、包头 EE 较高,生态本底较好,这与其被批准为国家森林城市的推进和发展有关,随着生态资源的开发利用消耗加快,包头市于 2016 年出台加快生态文明建设林业行动的计划,补偿植被损耗的付出的生态代价。银川市作为宁夏沿黄城市群核心区、西北生态文明先行区,依托自身优势资源发展旅游产业,加强市内和周边生态建设,注意维系生态环境的良性发展,打造建设成为自然环境优美、人文环境和谐的宜居城市,但其土地粗放式利用导致的植被损耗问题仍不容忽视。

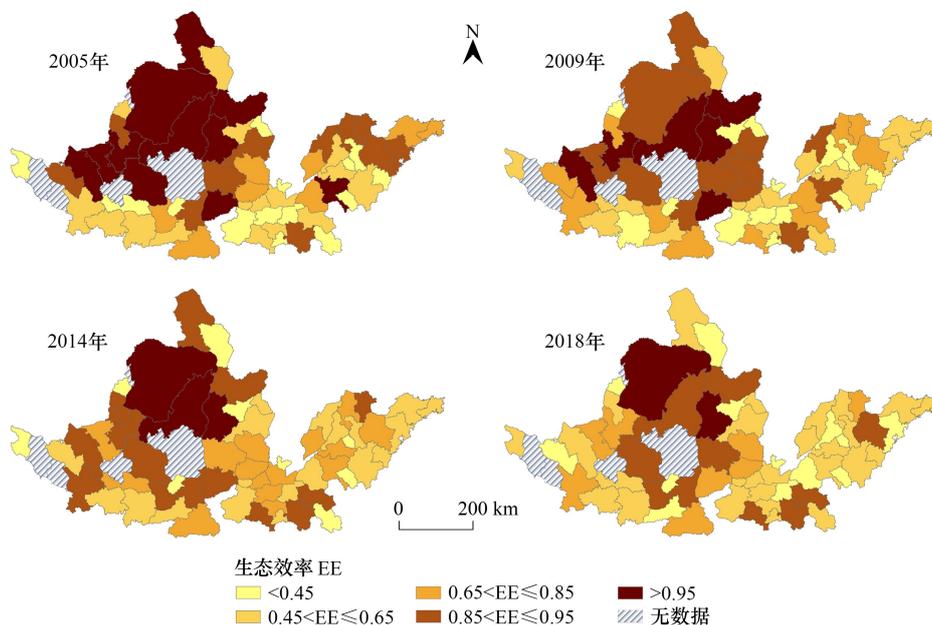


图 6 黄河流域城市 EE 时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of urban EE in the Yellow River Basin

2.4 空间自相关分析

选择全局莫兰指数(Moran's I)对 LUE、 EE 进行空间自相关分析(表 5)。4 个时间点中,LUE 未均通过 Z 值、 P 值检验, EE 均通过相关检验且全局 Moran's I 均为正,各年均通过显著性检验。由此可见,2005—2018

年黄河流域城市生态效率存在空间聚集特征,从总体看,全局 Moran's I 指数呈现下降趋势,表明研究期内黄河流域城市生态效率呈现出由强向弱相关演变。因此对研究区 EE 展开局部空间格局演变探究,并得到城市 LISA 聚集图(图 7)。

表 5 全局 Moran's I 指数
Table 5 The global Moran's I

年 Year	LUE			EE		
	全局 Moran's I 指数 Global Moran's I	Z	P	全局 Moran's I 指数 Global Moran's I	Z	P
2005	-0.062	-0.5193	0.3140	0.357	12.052	0.0350
2009	0.024	0.5715	0.2660	0.314	9.9155	0.0010
2014	-0.046	-0.3948	0.3650	0.301	6.2767	0.0010
2018	0.059	0.9864	0.1690	0.363	4.8712	0.0020

LUE: 土地利用效率 Land use efficiency; EE: 生态效率 Ecological efficiency

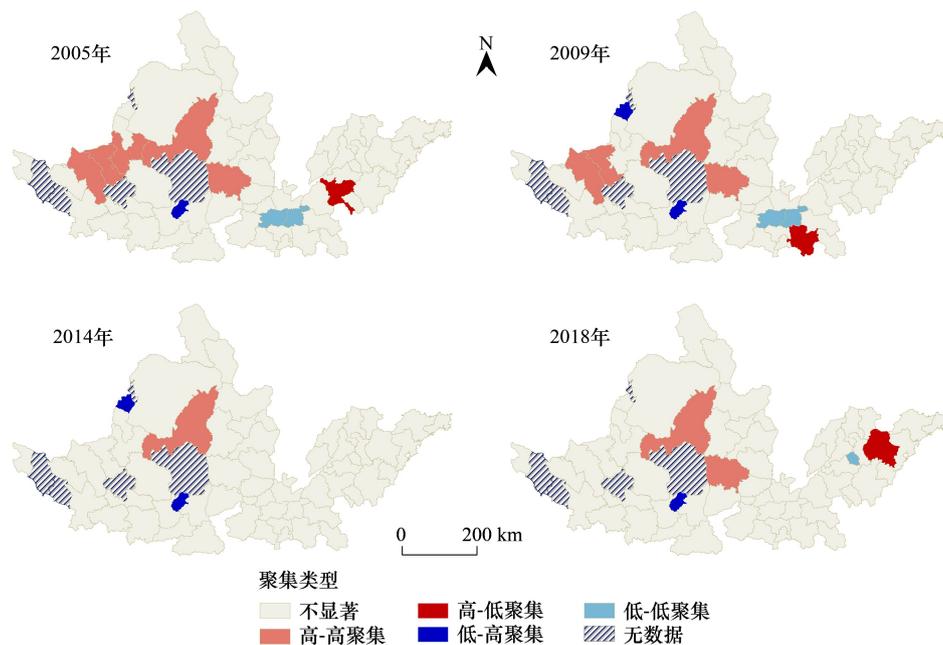


图 7 EE 的 LISA 聚类图

Fig.7 LISA spatial cluster of EE

Lisa: 局部空间关联图 Local indicators of spatial association

高-高集聚城市最多,2005 年集中在黄河上游和中游,到 2018 年逐渐向黄河中游城市转移。从分布格局看,高-高集聚、低-低集聚呈现集中连片式分布,高-低集聚、低-高集聚呈现发散式分布。从数量看,高-高集聚 > 低-低集聚 > 低-高集聚 > 高-低集聚。

总体上看,白银市、中卫市、吴忠市、榆林市 EE 处于高-高聚集区,表明聚集区城市与周边城市 EE 较高且差异较小。近年来,榆林市把生态环境保护摆在全局工作的突出位置,持续推进生态文明建设,是黄土高原生态文明示范区。宁夏是我国生态环境脆弱区,为保护和恢复宁夏生态环境,国家大力推进生态工程建设,把坚持打造生态林带等生态修复工程与城市建设结合起来,实现生态与经济效益的结合。济宁市处于高-低聚集,周边城市 EE 较济宁市低,济宁市地理位置具有一定辐射带动作用,近年来济宁市实施市区“绿亮清”工程使其公共绿地面积不断增加,生态环境逐渐得以改善,较周边中原城市群生态效率高。郑州市、开封市处于 EE 低-低聚集区,这是由于这些城市都是资源型城市,资源投入产出比低,绿色生产体系尚未建成,限制了其生态

效益发展。铜川市处于 *EE* 低-高聚集区,由于矿业开采等活动忽视生态文明建设,生态环境治理滞后,地区生态平衡及可持续发展能力有待提高。

3 讨论

进一步,分析 *LUE* 与 *EE* 之间的相互关系(图 8)可知,黄河流域城市群 *LUE* 随着 *EE* 的增加出现先减少后增加的 U 型变化,*EE* 低于平均水平时,*LUE* 越大则 *EE* 越低,当跨过 *EE* 平均门槛后时,*EE* 便随着 *LUE* 的增大而提高。说明在城市建设进程中,提高土地利用效率势必在一定程度上对生态资源产生相应损耗,但跨过生态效率门槛后,生态效率高的地区植被资源对生活生产功能和土地利用效率有更显著的正面影响,这主要是由于

经济发展水平较高、区位条件更好的城市在生态投入一定时,新增建设用地的产出率和利用率更高,促进地区生产总值等国民经济提升和社会发展,从而带动土地利用、社会效益的提高。因此在城市发展进程中,土地和生态资源都需要在合理范围内进行投入生产,需贯彻土地资源节约、环境保护的可持续发展理念,促进生态效率越过拐点,进入土地资源、经济发展与生态高效率模式,使得城市土地、资本、劳动力和生态资源得以充分利用,达到合理提高土地利用效率、促进经济发展、保护生态环境的目的。

预计未来一段时间里,黄河流域城市群城市化发展将进一步加快,随着《黄河流域生态环境保护规划》的推进,结合黄河流域土地资源利用和生态保护发展现状,提出以下对策建议:首先,制定差异化建设与产业布局。黄河流域各城市群应结合区位条件、经济发展条件,精确制定科学合理的产业发展措施。上中下游通过产业带动非农人口迁移、经济流动,加强与其他地区的先进产业技术合作^[26],秉持土地资源可持续发展的重要理念,注重单位土地面积产出率,带动城市化发展,促进土地集约节约效率提升。其次,加强城市群综合生态治理与修复^[27]。黄河流域城市生态环境安全水平亟待提高^[28],应以维护生态系统稳定性为前提,实时系统保护修复建设^[29]。上游城市群应加强草地退化等生态修复,中游突出抓好水土保持和生态保护,下游注重植被的保护与修复,尽可能维护城市生态系统的完整性。再次,发挥城市群间的相互交流、辐射作用,优化城市间聚集效应。各城市充分发挥自身优势及区位特征,强化本地城市对周围城市的正向聚集效应,通过决策者的资源调配和政策引导促进城市高质量发展水平。

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济核心地带,定量测算流域内城市群的土地利用效率和生态效率可为其高质量发展提供参考^[30-31]。通过对黄河流域城市群 59 个城市长时间序列的土地利用及生态效率时序演变、空间上集聚特征与变化规律的详细分析,发现城市群生态保护和高质量发展过程中遇到的问题,弥补目前我国黄河流域地理经济特区研究的不足。从研究方法上看,本研究将植被覆盖度指数作为生态变量引入到 SFA 生产函数中,试图揭示生产要素投入、土地利用效率提升和生态损耗之间的关系,为黄河流域城市群可持续发展研究提供新视角;从研究结果的政策导向来看,对黄河流域城市群力求提出切实可行的政策建议,为有效衔接流域城市群经济社会发展、用地协调、生态环境提升提供科学参考。未来将深入研究中国黄河流域城市群之间的合作关系,同时,将深化对土地开发利用与社会经济、生态环境效益达到均衡的研究。

4 结论

本文以黄河流域 7 个城市群 59 个城市为研究对象,构建投入产出指标体系并尝试将多个生态变量加到投入指标中,运用 SFA 模型对其 2005—2018 年 *LUE*、*EPI* 和 *EE* 进行测度和分析,探究区域的土地利用、生态质量与经济系统之间关系,为推进城市化土地资源的合理利用和生态环境保护对黄河流域高质量保护与发展提供参考依据。

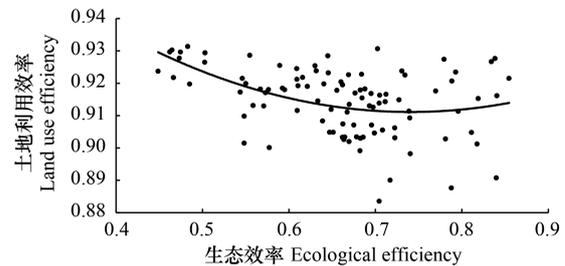


图 8 *LUE* 与 *EE* 关系散点图

Fig.8 Scatter diagram between *LUE* and *EE*

结果表明:对比分析非约束模型与约束模型的结果可知,加入生态变量后的 LUE 平均值增加 4.43%。非约束模型下,黄河流域城市群 LUE 年平均值为 0.89,多数城市群 LUE 总体呈增加趋势,空间上呈现出西低东高的分布特征;EPI 平均值大于 0 的城市占比 90%以上,其对土地利用效率有正向贡献;多数城市群 EE 总体呈逐年下降趋势,EE 年平均值为 0.62,空间上 EE 呈现出西高东低特征,分布格局差异特征明显。LUE 与 EE 呈 U 型关系变化,当跨过 EE 平均门槛后,LUE 随着 EE 的增加而提高;EE 存在显著正向的空间聚集格局特征分布特征。未来黄河流域在高质量发展进程中应提高资源利用强度,优化城市资源配置,深化城市群跨区域交流合作,注重城市生态空间可持续发展,构建高质量发展大格局。

参考文献 (References):

- [1] 薛澜,杨越,陈玲,董煜,黄海莉. 黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 1-7.
- [2] 刘晶晶,王静,戴建旺,翟天林,李泽慧. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异. 自然资源学报, 2021, 36(1): 148-161.
- [3] 宋洋, YEUNG Godfrey, 朱道林, 徐阳, 赵江萌. 京津冀城市群县域城市土地利用效率时空格局及驱动因素. 中国土地科学, 2021, 35(3): 69-78.
- [4] 刘琳轲, 梁流涛, 高攀, 范昌盛, 王宏豪, 王瀚. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应. 自然资源学报, 2021, 36(1): 176-195.
- [5] 成金华, 孙琼, 郭明晶, 徐文赞. 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.
- [6] Karlaftis M G. A DEA approach for evaluating the efficiency and effectiveness of urban transit systems. European Journal of Operational Research, 2004, 152(2): 354-364.
- [7] Aigner D, Lovell C A K, Schmidt P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. Journal of Econometrics, 1977, 6(1): 21-37.
- [8] Meeusen W, van Den Broeck J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. International Economic Review, 1977, 18(2): 435.
- [9] 金贵, 吴锋, 李兆华, 郭柏枢, 赵晓东. 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.
- [10] 王良健, 李辉, 石川. 中国城市土地利用效率及其溢出效应与影响因素. 地理学报, 2015, 70(11): 1788-1799.
- [11] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 秦胜利, 王艳华, 苗长虹. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素. 资源科学, 2020, 42(1): 159-171.
- [12] 李达, 林龙翔, 林震, 张绍文, 安黎哲. 黄河流域生态保护和高质量发展的 EKC 检验. 生态学报, 2021, 41(10): 3965-3974.
- [13] 邓祥征, 杨开忠, 单菁菁, 董锁成, 张文鸽, 郭荣星, 谈明洪, 赵鹏军, 李宇, 苗长虹, 崔耀平. 黄河流域城市群与产业转型发展. 自然资源学报, 2021, 36(2): 273-289.
- [14] 常新锋, 管鑫. 新型城镇化进程中长三角城市群生态效率的时空演变及影响因素. 经济地理, 2020, 40(3): 185-195.
- [15] 海霞, 李伟峰, 王朝, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系. 生态学报, 2018, 38(12): 4245-4256.
- [16] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. 经济研究, 2004, 39(10): 35-44.
- [17] 刘书畅, 叶艳妹, 肖武. 基于随机前沿分析的中国城市土地利用效率时空分异研究. 中国土地科学, 2020, 34(1): 61-69.
- [18] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素. 自然资源学报, 2021, 36(1): 223-239.
- [19] Liu S C, Xiao W, Li L L, Ye Y M, Song X L. Urban land use efficiency and improvement potential in China: a stochastic frontier analysis. Land Use Policy, 2020, 99: 105046.
- [20] Lu X H, Zhang Y W, Li J J, Duan K F. Measuring the urban land use efficiency of three urban agglomerations in China under carbon emissions. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(24): 36443-36474.
- [21] 杨勇, 邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域差异. 地理科学, 2019, 39(7): 1111-1118.
- [22] Huang W, Bruemmer B, Huntsinger L. Incorporating measures of grassland productivity into efficiency estimates for livestock grazing on the Qinghai-Tibetan Plateau in China. Ecological Economics, 2016, 122: 1-11.
- [23] 曾雅婷, 李宾, 吕亚荣. 中国粮食生产技术效率区域差异及其影响因素——基于超越对数形式随机前沿生产函数的测度. 湖南农业大学学报: 社会科学版, 2018, 19(6): 13-21, 36.
- [24] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [25] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [26] 李裕瑞, 潘玮, 王婧, 刘彦随. 中国地级区域高质量发展格局与影响因素. 生态学报, 2022, 42(6): 2306-2320.
- [27] 杨玉珍, 闫佳笑, 杨洋, 杨阳. 黄河流域旅游生态效率时空演变及空间溢出效应——基于 73 个城市数据的分析. 生态学报, 2022, 42(20): 8202-8212.
- [28] 杜霞, 孟彦如, 方创琳, 李聪. 山东半岛城市群城镇化与生态环境耦合协调发展的时空格局. 生态学报, 2020, 40(16): 5546-5559.
- [29] 孙久文, 崔雅琪, 张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1673-1690.
- [30] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. 生态学报, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [31] 徐维祥, 徐志雄, 刘程军. 黄河流域地级城市土地集约利用效率与生态福利绩效的耦合性分析. 自然资源学报, 2021, 36(1): 114-130.