



HONG KONG INSTITUTE
OF ENVIRONMENTAL
IMPACT ASSESSMENT
香港环境影响评估学会



河海大学
HOHAI UNIVERSITY

三区空间视角下江苏省国土空间利用 生态效率时空分异及影响因素分析

汇报人：肖卫东
指导老师：施国庆 教授
河海大学公共管理学院
2025/6/27

汇报提纲

01 引言

02 研究方法

03 研究结果

04 结论与讨论

■ 研究背景

- 随着人类需求在国土空间上增加重叠，人地矛盾不断凸显，**生态环境等系列问题突出**，粗放型经济发展方式已难以为继。国土空间是要素互动交流的载体，其生态效率高低直接关乎县域发展福祉，也是衡量人地关系是否协调的关键指标。
- **如何统筹经济发展与环境保护，构建集约高效、生态友好的国土空间体系已成为实现高质量发展与生态文明建设亟待解决的重要问题。**
- 2023年国务院印发《新时代的中国绿色发展》白皮书指出，**国土是绿色发展的空间载体**，要整体谋划国土空间开发保护，实现国土空间开发保护更高治理。江苏省南北地区发展差异性是我国东西部不平衡不充分发展的缩影，随着《江苏省国土空间规划（2021-2035年）》率先获批，系统分析其TUEE对降低国土空间利用过程中的生态环境风险，实现综合效益的统一具有重要的理论和现实意义。

■ 研究综述

- 以往对国土空间的探讨主要集中于土地这一物质载体，其利用效率则多是针对资源稀缺性开展的经济社会评价。随着环保意识提升，国土空间利用生态效率（Territory Use Eco-efficiency, TUEE）逐渐受到关注。**以资源、经济和生态协调为目标，生态效率是指资源利用过程中所表现的生态环境损耗最小化及经济产出最大化程度。**
- 基于多指标综合评价法、生产函数法、数据包络法（DEA）等，已有研究对耕地、城市建设用地、工业用地等利用效率进行了广泛探讨，研究尺度也由市、省层面扩展到城市群和流域经济带等层面。其中，非期望产出Super-SBM模型克服了传统DEA投入产出造成的拥挤或松弛现象，同时将非期望产出纳入评价，因此获得了广泛应用。
- 部分学者从自然本底、人口密度、固定资产投资、区域一体化等方面探讨了**各因素对TUEE的影响。**

■ 研究综述

➤ 对现有文献梳理后发现仍有进一步深入之处，其一，县域作为区域经济基本单元，承担着基础性的功能与作用，但囿于微观尺度环境数据的可获取性，**县域水平TUEE的研究较为有限**；其二，现有文献侧重**单一类型TUEE研究**，**无法反映国土空间整体的生态利用水平**，不利于区域协调发展目标实现。

➤ 现有文献从三区空间、三生空间、“耕地—建设用地—生态用地”、“城镇—农村”等视角系统研究国土空间，而**三区空间在划定边界等实践层面具备相对优势**，具体包含了城镇、农业、生态三类空间。

基于三区空间视角，利用多源数据和非期望产出Super-SBM模型从“城镇—农业—生态”空间综合评估江苏省2000~2020年县域尺度TUEE，运用空间自相关分析及多尺度地理加权回归模型（MGWR）探讨TUEE的时空特征及影响因素，以期为促进国土空间绿色高效利用提供理论和决策依据。

■ 研究区概况

- 江苏省是我国经济发展的重要引擎，在推动经济高质量发展与区域协调发展新格局中也占据重要地位。
- 江苏省在经济进程中仍面临着区域发展失衡、生物多样性丧失等问题，**如何利用有限资源提升生态约束下的国土空间利用水平成为关乎当地经济社会可持续发展的关键命题。**



■ 数据来源

- 固定资产投资总额、各产业从业人口、农业总产值等社会经济数据来自《江苏省统计年鉴》、《江苏省农村统计年鉴》及各市统计年鉴；
- 土地覆被数据来源于中科院资源环境科学与数据中心（<http://www.resdc.cn/>），空间分辨率为30m；
- PM2.5数据来源于大气成分分析组织借助MODIS、MISR等遥感数据反演所得栅格数据集，空间分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ （<https://sites.wustl.edu/acag/>）；
- 夜间灯光数据来源于“类DMSP-OLS”夜间灯光数据（<http://www.geodoi.ac.cn/>）。

■ 数据预处理

- 首先，**研究单元划分**。基于2020年行政区划对江苏省96个县级行政区进行了合并处理，以保证数据连续性。例如，将苏州市虎丘区、吴中区、相城区、姑苏区、吴江区合并为苏州市区，将徐州市鼓楼区、云龙区、贾汪区、泉山区、铜山区合并为徐州市区；
- 其次，**对涉及价格因素的指标数据进行处理**。基于居民消费价格指数、固定资产投资价格指数将涉及价格因素的指标换算为2000年不变价数据，并利用线性插值法补齐部分缺失数据；
- 最后，**依据主体功能将CNLUCC数据与各类空间土地投入对应**：城镇建设用地、其他建设用地对应城镇用地；耕地、农村居民点对应农业用地；林地、草地、水域、未利用地对应生态用地。

指标体系

- 通过前文定义，本文将TUEE界定为国土空间利用过程中投入一定资源所实现的经济效益最大化以及生态环境影响最小化程度。
- 参考前人研究，基于科学性、代表性及可获取性等原则，以投入产出为视角，兼顾经济产出与环境的正、负面产出，从城镇、农业和生态空间三个层面综合选取测度指标，最终构建TUEE系统性评价体系。考虑到国土空间的均衡发展，将城镇、农业和生态空间利用生态效率算术平均作为TUEE。

表 3-1 国土空间利用生态效率测度指标

Table 3-1 Eco-efficiency measurement index of land space utilization

目标层	准则层	指标层	数据来源
城镇空间利用生态效率 (U)	土地投入	城镇用地面积/千公顷 (UI-1)	LUCC 土地遥感监测数据集
	资本投入	固定资产投资总额/亿元 (UI-2)	《江苏省统计年鉴》
	劳动力投入	二、三产业从业人口数量/万人 (UI-3)	《江苏省统计年鉴》
	资源投入	能源消耗指数 (UI-4)	DMSP/OLS 夜间灯光数据
	期望产出	二、三产业 GDP/亿元 (UO-1)	《江苏省统计年鉴》
	非期望产出	PM2.5 (UO-2)	达尔豪斯大学大气成分分析组
国土空间利用生态效率	土地投入	农业用地面积/千公顷 (AI-1)	LUCC 土地遥感监测数据集
	劳动力投入	第一产业从业人口数量/万人 (AI-2)	《江苏省统计年鉴》
	资源投入	化肥/吨 (AI-3)	《江苏省农村统计年鉴》
		农膜/吨 (AI-4)	《江苏省农村统计年鉴》
		农药/吨 (AI-5)	《江苏省农村统计年鉴》
		农业机械总动力/万 kW (AI-6)	《江苏省农村统计年鉴》
农业空间利用生态效率 (A)	期望产出	农业总产值/亿元 (AO-1)	《江苏省统计年鉴》
		耕地生态系统服务价值 (AO-2)	基于 LUCC 土地遥感监测数据集与当量因子法
	非期望产出	耕地碳排放/吨 (AO-3)	碳排放系数法
	土地投入	生态用地面积//公顷 (EI-1)	LUCC 土地遥感监测数据集
	期望产出	生态用地生态系统服务价值/亿元 (EO-1)	基于 LUCC 土地遥感监测数据集与当量因子法
	非期望产出	景观破碎化 (EO-2)	景观破碎度指数
生态空间利用生态效率 (E)			

自然资源学报, 2022, 37(02): 477-93.
地理科学, 2023, 43(06): 1088-100.

■ 排放系数法

➤ 相较于面源污染，碳排放更具典型性，推动碳减排也是农业高质量发展的关键所在，因此选取耕地碳排放作为江苏农业空间利用的非期望产出。本文参考李波等的碳排放模型及测算系数，利用排放系数法对农业生产过程中化肥、农药、农膜、翻耕和灌溉等产生的碳排放进行测算。

$$E = \sum E_i = \sum T_i \cdot \delta_i$$

表 3-1 农业碳源及其碳排放系数

Table 3-1 Agricultural carbon source and carbon emission coefficient

农业碳源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.8956 kg · kg ⁻¹	T. O. west ^[76] 、美国橡树岭实验室
农药	4.9341 kg · kg ⁻¹	美国橡树岭实验室
农膜	5.18 kg · kg ⁻¹	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 ^[77]
柴油	0.5927 kg · kg ⁻¹	IPCC 联合国气候变化政府间专家委员会 ^[78]
翻耕	312.6kg · km ⁻²	中国农业大学生物与技术学院 ^[79]
农业灌溉	20.476kg · Cha ⁻¹	Dubey ^[80] 、李波等 ^[75]

■ 当量因子法

表 3-1 江苏省各类用地生态系统服务价值当量因子

Table 3-1 Equivalent factors of ecosystem service value of various land types in Jiangsu Province

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	湿地	水域	裸地
供给服务	食物生产	2193.49	564.05	565.74	754.33	1588.05	0.00
	原料生产	486.34	1287.71	1290.89	1111.63	456.56	0.00
	水资源供给	-2590.50	664.10	665.59	615.37	16456.15	0.00
调节服务	气体调节	1766.70	4233.24	4243.66	3910.57	1528.50	39.70
	气候调节	923.05	12675.30	12707.37	10342.16	4545.79	0.00
	净化环境	267.98	3752.95	3764.86	3414.30	11017.08	198.50
	水文调节	2967.98	9047.51	9113.61	7582.93	202952.50	59.55
支持服务	土壤保持	2967.67	5165.82	5179.22	4764.15	1846.11	39.70
	维持养分循环	1032.23	391.06	357.31	357.31	138.95	0.00
	生物多样性	307.68	4699.13	4711.14	4327.43	5061.90	39.70
文化服务	美学景观	148.87	2065.25	2070.81	1905.66	3751.76	19.85
合计		7840.99	44546.13	44704.74	39085.84	249343.40	397.00

➤ 以谢高地等确定的中国陆地生态系统服务价值当量表为基础，结合学者关于江苏省的相关研究成果，计算江苏省生态空间生态系统服务价值。

➤ 首先，结合江苏实际，选取稻谷、小麦和玉米作为主要农作物，以平均粮食产量和平均粮食价格计算得到1个标准当量的经济价值量。

➤ 其次，结合江苏省实际情况修正生态系统服务价值系数，得到江苏省生态空间用地生态系统服务价值当量因子表。

■ 景观格局指数、主成分分析

- 本文从**破碎化的空间密度、聚散性、景观多样性层次**选取斑块数（NP）指数、斑块密度（PD）指数、景观形状（LSI）指数、景观多样性（SHDI）指数、景观分离度（DIVISION）指数五种景观指数。
- 为降低各指数间的**信息重叠度**，参考前人研究，基于主成分分析将这些原始景观格局指数综合为景观破碎度指数（F）。根据主成分分析检验结果（表4），各时点KMO值均大于0.6，sig值均小于0.05，表明所选取景观指数之间相关性较强，主成分分析具有可行性，F值可靠。

表 3-1 景观格局指数主成分分析检验

Table 3-1 Principal component analysis test of landscape pattern index

	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
KMO 值	0.641	0.623	0.621	0.621	0.607
Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

■ 非期望产出Super-SBM模型

➤ Super-SBM模型是一种改进的数据包络分析（DEA）模型，相较于传统DEA方法，其不仅能考虑到**非期望产出**，还能有效**解决SBM模型中多个评估对象效率为1时无法进一步比较大小的问题**，使得模型适用于多种复杂情况。因此本文采用非期望产出Super-SBM模型对TUEE进行测算。

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1 + r_2} (\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{qk}^u)}$$

$$\begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j \\ \bar{x} \geq x_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u \\ \lambda_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, j \neq 0 \\ s = 1, 2, \dots, r_1; q = 1, 2, \dots, r_2 \end{cases}$$

■ 多尺度地理加权回归模型

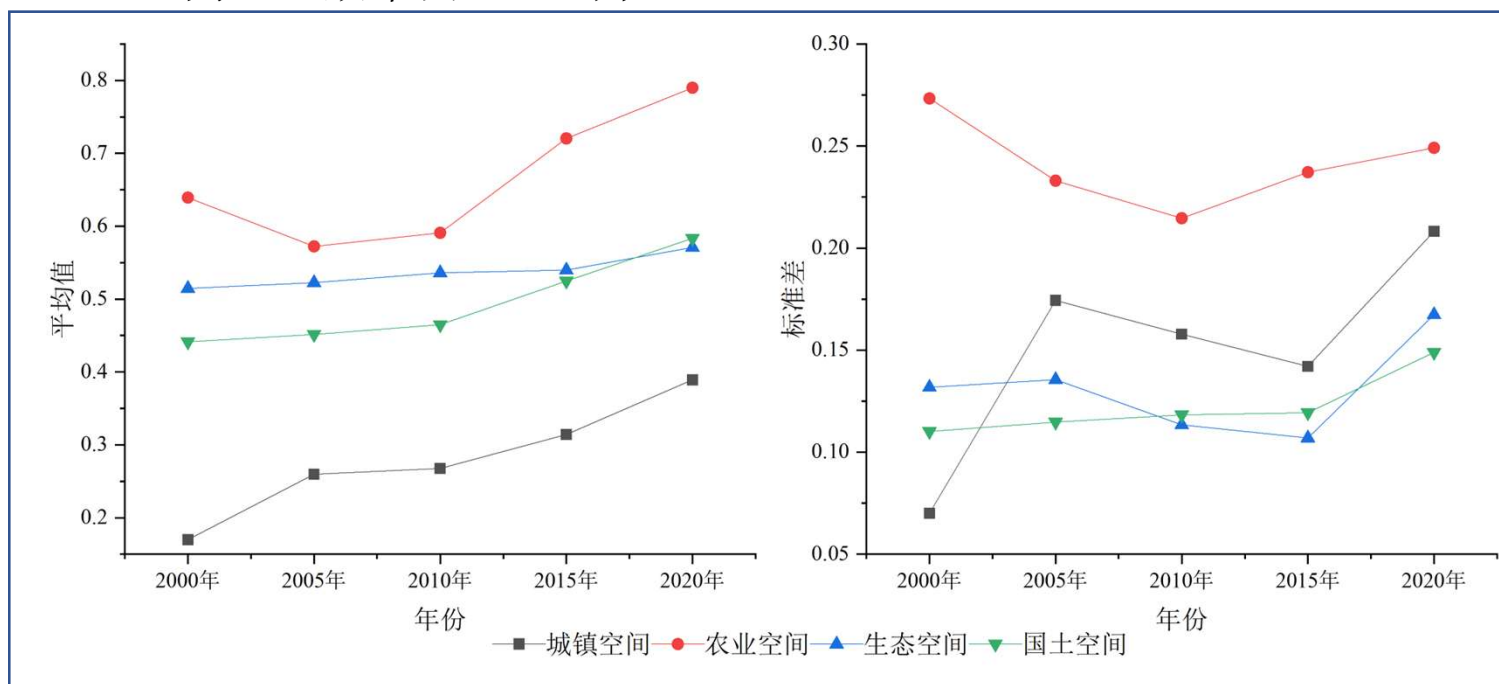
➤ 多尺度地理加权回归模型（MGWR）是地理加权回归模型（GWR）改进和拓展，在有效探测驱动因素的空间非平稳性的基础上，**顾及了驱动因素的差异化尺度效应**，从而使得模型更具稳健性与解释力。其基础表达式为：

$$y_i = \beta_{bw0}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_{bwk}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$

式中： y_i 是因变量 TUEE； $\beta_{bw0}(u_i, v_i)$ 为具有特定带宽的截距项； $\beta_{bwk}(u_i, v_i)$ 为具有特定带宽的空间位置 i 的第 k 个回归参数； x_{ik} 为第 i 个空间位置 (u_i, v_i) 上第 k 个变量的观测值； ε_i 为随机误差项。由于本文样本量相对较少，核函数选择 Fixed Gaussian 准则，带宽选择 AICc 准则。

■ 国土空间利用生态效率时间演变

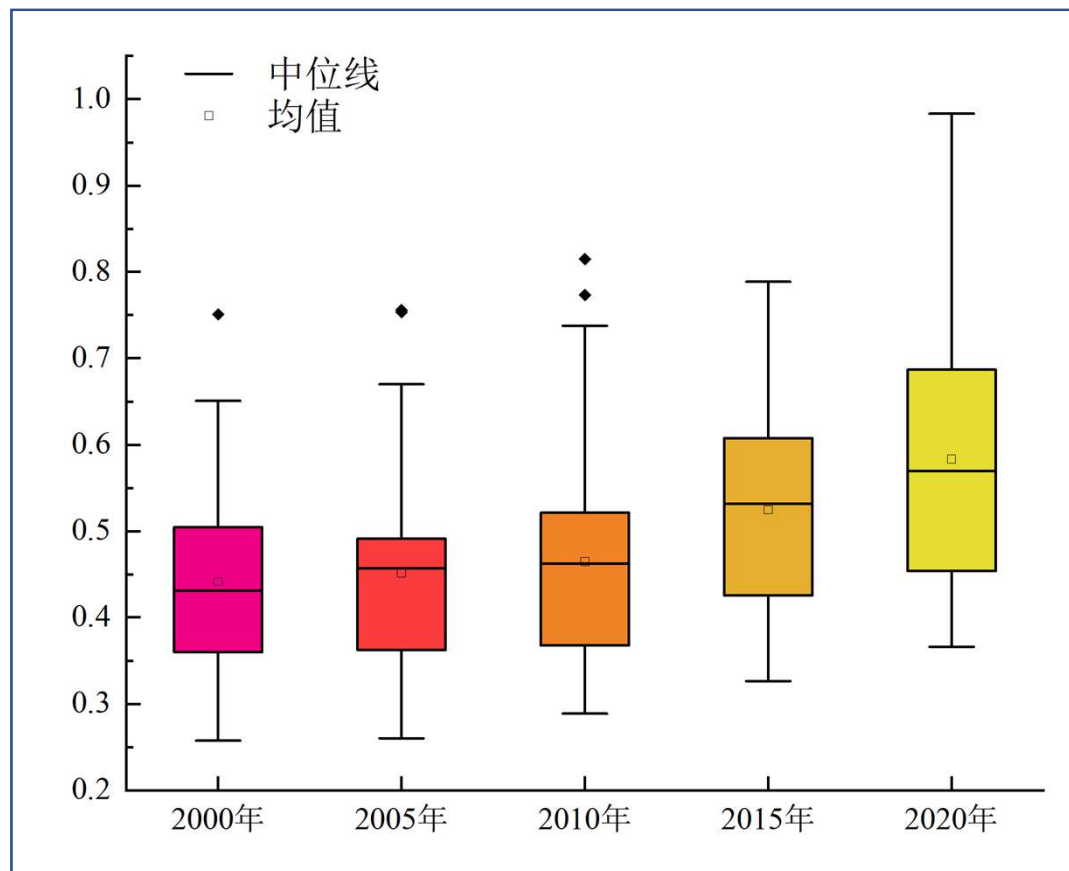
➤ 基于非期望产出Super-SBM模型测算江苏省2000-2020年城镇、农业和生态空间生态效率，总体趋势见图2。从平均值来看，城镇空间生态效率由0.17增长至0.39，农业空间生态效率由0.63增长至0.79，生态空间生态效率由0.51增长至0.57，国土空间生态效率由0.44增长至0.58。



■ 国土空间利用生态效率时间演变

➤ 总的来看，江苏省国土空间利用生态效率变化具有**明显的时间趋势**，其最大值、最小值和平均值均有不同程度的增长。表明江苏省整体国土空间生态利用水平有所提升，国土空间利用**呈现集约、高效和生态化趋势**。

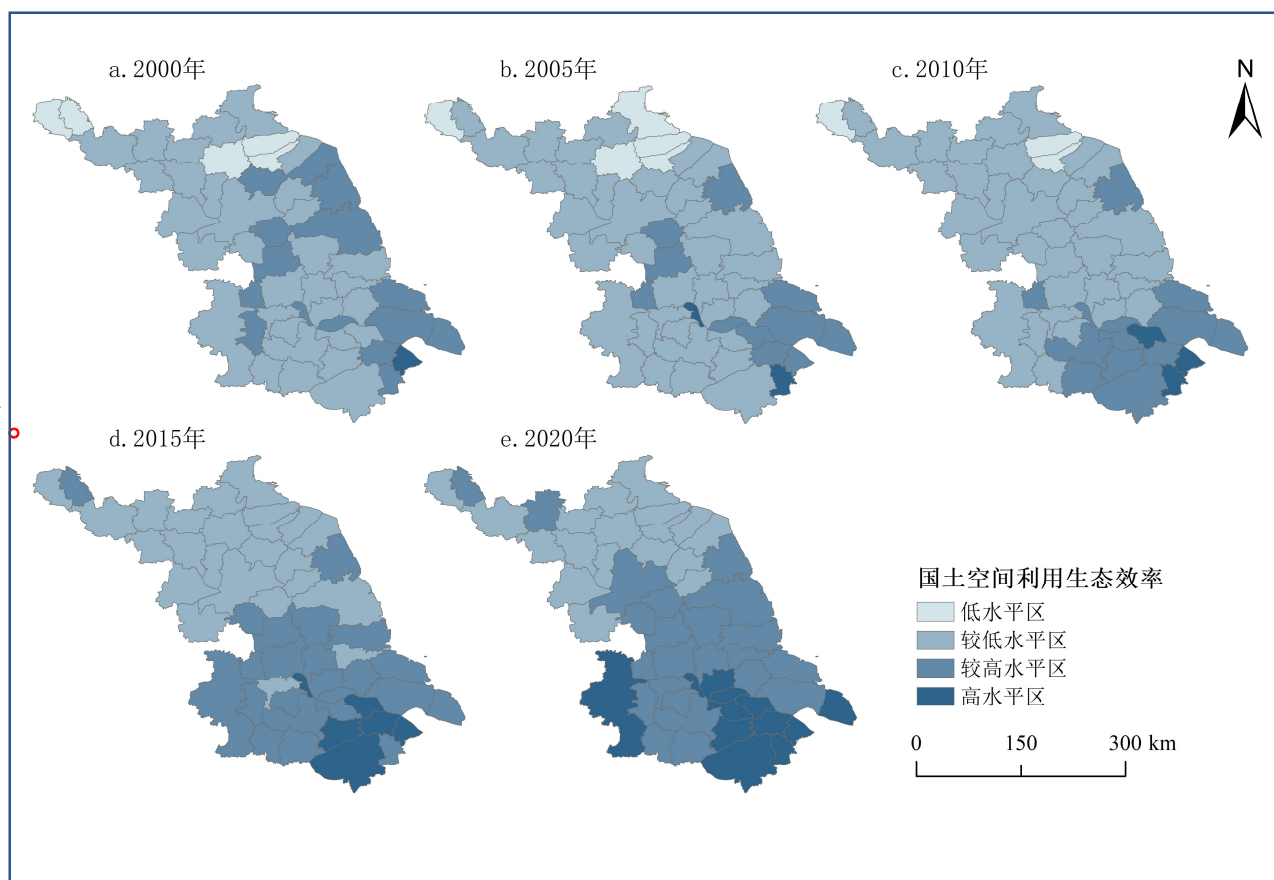
➤ TUEE最大值与最小值的差距逐渐扩大，从2000年的0.49提升到了2020年的0.62。



■ 国土空间利用生态效率空间演化

➤ 江苏省TUEE空间分布总体**保持稳定**的“**南高北低**”格局且**不断强化**。首先，苏南地区是TUEE相对高值区，苏北地区为TUEE相对低值区。

➤ **沿海地区TUEE相对于内陆地区较高**。江苏省沿海地区有着相对丰富的生态系统类型，生态保育、生态系统服务等功能较为完善。



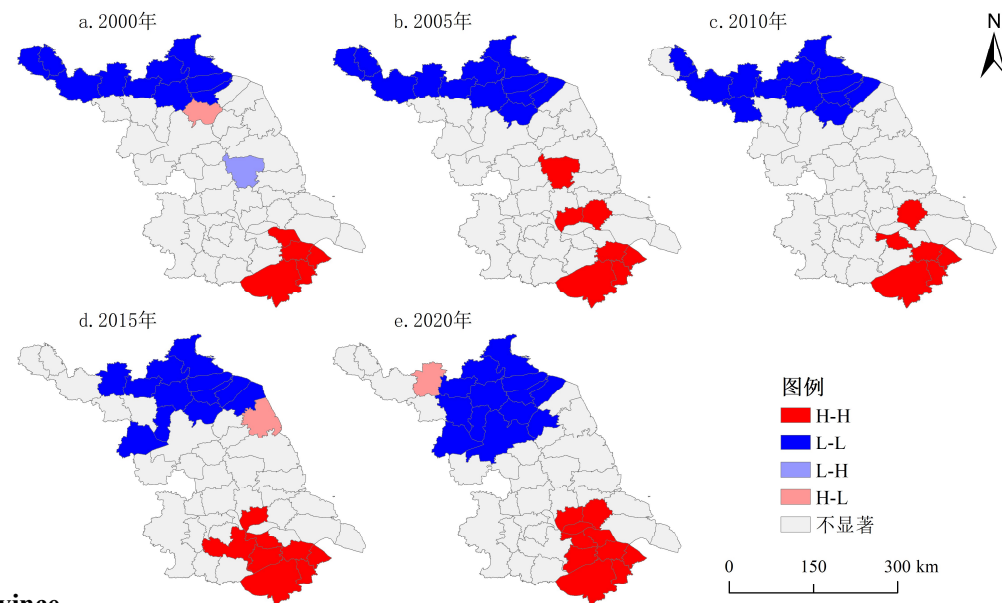
■ 国土空间利用生态效率空间分异

➤ 研究期内，江苏省县域国土空间利用生态效率水平的Moran's I统计值均大于0，且均通过1%的显著性检验，表明江苏省县域国土空间利用生态效率具有显著的空间正相关特征。

表 3-1 江苏省县域国土空间利用生态效率 Moran's I

Table 3-1 Eco-efficiency Moran's I of county territory space utilization in Jiangsu Province

年份	Moran' I	Z(I)	P(I)
2000 年	0.535	5.234	0.001
2005 年	0.497	5.137	0.001
2010 年	0.631	6.177	0.001
2015 年	0.606	5.866	0.001
2020 年	0.608	5.938	0.001



■ 国土空间利用生态效率影响因素分析

- 参考已有研究，选取气温、高程、人口密度、经济发展水平、对外开放程度、产业结构、政府支持7个解释变量。分别以年均气温、平均高程、人口密度、人均GDP、第二产业生产总值占GDP比重、实际使用外资占GDP比重和一般公共预算支出表征，并进行数据标准化处理。经多重共线性检验，解释变量VIF均小于7，说明变量间不存在多重共线性问题。
- 江苏省TUEE具有明显的空间集聚现象，需考虑影响因素的空间异质性。下表的模型拟合效果也表明，相较于OLS模型，MGWR模型的拟合优度更高，残差平方和与赤池信息准则有所下降，模型更为稳健。因此本文选择MGWR模型深入探究江苏省TUEE的影响因素。

模型	OLS	MGWR
R^2	0.734	0.755
调整后 R^2	0.693	0.705
残差平方和	14.078	12.977
AICc	102.333	100.072

■ 国土空间利用生态效率影响因素分析

➤ 从MGWR回归系数的统计指标来看，气温均值的绝对值最大，其次是经济发展水平、高程、对外开放水平、人口密度、政府支出和产业结构。从影响因素带宽上看，高程影响因素对于TUEE的作用尺度是局部范围的，说明相较于气温、人口密度等全局变量而言，TUEE空间分布随高程分布变化在空间上的差异较大。

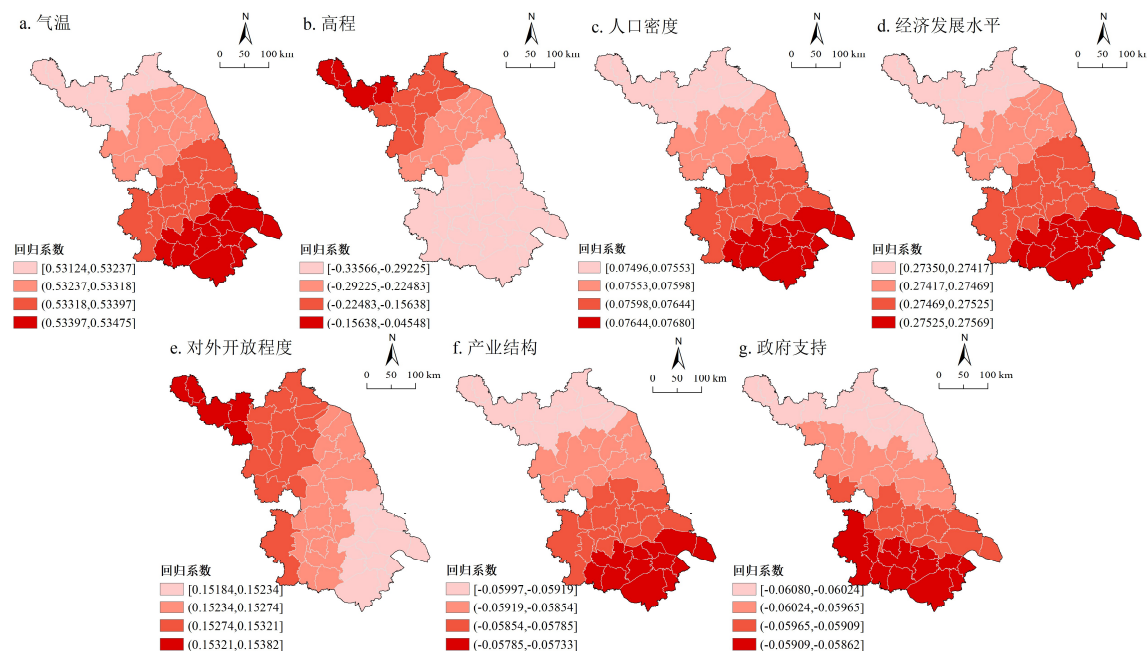


表 6 江苏省 TUEE 影响因素 MGWR 模型回归系数描述性统计

变量	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值	带宽/km	P 值
气温 X1***	0.533	0.001	0.531	0.534	0.535	1135	0.002
高程 X2**	-0.265	0.073	-0.336	-0.297	-0.045	170	0.019
人口密度 X3	0.076	0.001	0.075	0.076	0.077	1135	0.304
经济发展水平 X4	0.275	0.001	0.274	0.275	0.276	1135	0.129
对外开放水平 X5*	0.153	0.000	0.152	0.153	0.154	1135	0.082
产业结构 X6	-0.058	0.001	-0.060	-0.058	-0.057	1135	0.605
政府支出 X7	-0.060	0.001	-0.061	-0.060	-0.059	1135	0.485

注：***，**，*分别代表在 1%，5%和 10%水平上显著

■ 讨论

- 与既有研究相比，**本文从三区视角构建了较为系统的TUEE评价体系**，在评价指标选取时除了考虑二三产业增加值、农业总产值等传统经济产出外，还将生态系统服务价值、景观破碎化等指标作为生态期望产出纳入其中，有助于综合认识区域国土空间利用的生态环境损益。
- 本文得到的测度结果**与市级层面相关研究总体一致，存在细微差异的原因可能在于研究尺度上的细化。**
- 在自然与社会经济因素共同作用下，江苏省TUEE会呈现空间集聚现象，**本文在探究其影响因素空间异质性的基础上，一定程度揭示了高程影响因素的尺度效应。**

■ 讨论

- 本研究仍存在一定局限：首先，针对狭义农业即种植业的分析忽视了林渔业等方面数据，而渔业养殖等也是农业经济收入和污染的重要来源；考虑到生态空间的生态保育功能实现需要一定的资本、劳动力等要素投入，未来需结合多样化数据构建更为全面的评价体系。
- 其次，由于TUEE的影响因素作用机制复杂，本文虽基于前人研究，结合共线性诊断筛选了7个影响因素，但仍无法完全避免变量的内生性问题。
- 除本文选择的影响因素外，政府对国土空间利用行为的政策约束亦会对TUEE造成影响，囿于数据可得性，未能将环境规制等因素纳入模型。

■ 研究结论

- 从时序演化看，江苏省TUEE水平整体呈上升趋势，其平均值从0.44增加到0.58，虽然大部分县域呈现提升态势，但县域间TUEE最大值与最小值的差距仍逐渐扩大，近20年从0.49增至0.62；
- 从空间上看，江苏省TUEE“南高北低”空间格局保持稳定且不断增强，沿海地区相较于内陆县域而言TUEE更高；
- 江苏省TUEE存在显著正相关性。高高（H-H）集聚区主要集中在苏南地区，低低（L-L）集聚区主要集中在苏北地区。
- 江苏省TUEE影响因素存在空间异质性。气温和对外开放水平对江苏省TUEE具有显著的促进作用，高程因素对江苏省TUEE具有显著的抑制作用，人口密度和经济发展水平对江苏省TUEE具有促进作用但不显著。

■ 政策建议

- 遵循空间集聚趋势，促进县域协同发展。
- 因地制宜，因城施策。在国土空间双评价基础上开展各类社会经济活动。
- 加大科研创新和教育投入，提升对外开放水平。
- 调整产业结构，优化政府投入。



河海大学
HOHAI UNIVERSITY



敬请各位老师批评指正！