

基于 GeoSOS- FLUS 模型的江苏省生态福祉时空演变及其预测研究¹

付永虎^{1,4} 解文艳^{1,2*} 刘俊青¹ 魏范青^{1,3} 郭赞¹ 苏凤¹ 杨依文¹

(1. 江苏海洋大学文法学院, 江苏连云港 222005;

2. 中国地质大学公共管理学院, 湖北武汉 430074;

3. 中国矿业大学马克思主义学院, 江苏徐州 221116;

4. 香港中文大学地理与资源管理学系, 香港沙田 999077)

【摘要】:作为人类最普惠的民生福祉,生态福祉的测度与评估研究对于指导区域可持续发展具有重要意义。以江苏省为案例研究区,基于生态系统服务理论,采用生态系统贡献率模型测度1995~2020年研究区生态福祉及其时空演变特征;在此基础上,借助GeoSOS- FLUS模型预测江苏省2025年生态福祉的时空流转盈亏与空间自相关性。结果表明:(1)1995~2020年,江苏省生态福祉总量和人均生态福祉呈波动下降的态势,25年间生态-经济产出效率增幅达540.24%。(2)与2020年相比,2025年江苏省生态福祉总量增加了10.84亿元,增幅1.05%,达1039.21亿元。13个评价单元中除地处苏北的宿迁、盐城和连云港生态福祉总量略有下降外,其余地市均有不同程度的增加。(3)1995~2025年,江苏省土地利用变化导致的生态福祉亏损要大于生态福祉盈利,总体呈亏损状态。其中,水域生态系统是维持生态福祉总量的重要贡献类型,耕地转为建设用地是造成江苏生态福祉亏损的主要原因。(4)1995~2025年,江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉之间具有显著的空间依赖效应,呈显著的空间负相关性。2015年以后,研究区生态优势转换为经济发展动力有所增强,呈生态文明建设与社会经济建设协同发展的良好态势。13地市生态-经济产出效率与人均生态福祉空间关联性不高,主要为无显著空间相关性,空间聚集主要分布在苏北和苏南区域,聚集类型为低-高和高-低2种类型,未有低-低、高-高聚集类型。研究结果可为区域生态系统管理与生态文明建设提供理论与方法参考。

【关键词】:生态福祉;GeoSOS- FLUS模型;时空演变;模拟预测;江苏

【中图分类号】:X171.1 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004- 8227(2023)01- 0071- 12

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301007

¹ **【收稿日期】:**2022- 02- 14; **【修回日期】:**2022- 05- 13

【基金项目】:国家自然科学基金项目(42071284);江苏高校哲学社会科学研究基金(2021SJA1716);连云港市社会科学基金项目(21LKT0016、21LKT0047)

【作者简介】:付永虎(1982~),男,副教授,主要研究方向为自然资源管理与生态系统服务. E-mail: huhu_0902@163.com

【* 通讯作者 E-mail】: geo985211xwy@outlook.com

生态福祉是指人类从自然环境中获取或享有的、由生态系统通过初级生产和次级生产(统称为生态系统生产)提供的、与人类福祉直接相关的产品与服务的生态效益总和^[1]。作为人类最普惠的民生福祉,生态福祉的量化测度与评估始终是可持续发展领域的重要研究课题。生态福祉与生态系统服务功能、土地利用关系密切,人类通过对土地的开发与利用,改变了地表土地利用结构,深刻影响着陆表生态系统的利用结构与空间布局、生态过程与服务功能,从而改变了生态福祉为人类直接提供相关产品与服务的能力。土地利用类型与空间结构是生态福祉的内在因素;生态福祉是土地利用结构与功能的外化表征,是生态系统直接作用于人类社会环境与经济的重要价值体现。近年来,受社会经济发展需求所驱动,人类对土地利用的广度和深度持续提高,导致陆表生态系统遭受破坏,并在一定程度上损害了生态系统的功能,进而影响了生态福祉的有效供给。因此,探讨土地利用变化下生态福祉的时空演变特征已成为当前区域可持续发展量化领域的重要研究课题。

生态福祉起源于生态系统服务研究,涵盖了生态系统服务与人类福祉的双重内涵。生态福祉最初以“环境服务”“自然服务”的概念出现在相关论述中,其后生态系统服务概念被正式提出^[2,3]。以Daily^[4]和Costanza^[5]为代表的相关学者,从生态系统服务内涵、价值评估框架、类型划分等进行了系统性研究,为生态系统服务研究提供了基础研究范式^[6]。以千年生态系统评估(MA)计划为标志的相关项目的实施,将生态系统服务研究置于人类福祉视角下,开展生态系统服务与人类福祉关系研究,促进了生态系统服务在全球范围的快速发展,推动了生态系统研究由自然科学向自然与社会科学综合方向转型,并越来越多地服务于政府决策^[7,8,9]。随着相关研究的不断推进,研究视角、对象,研究方法和实践应用被不断细化与扩展。臧正等^[10,11,12]在前人研究的基础上,借鉴福祉地理学思想提出了生态福祉概念,进一步细化了生态系统服务与人类福祉的相互关系,解决了生态系统服务测度中的重复计算问题,生态福祉逐渐成为新的研究热点。目前有关生态福祉的研究主要聚焦于生态福祉的内涵与测度、空间分异、生态福祉绩效与潜力分析等方面。例如,Feng等^[13]基于生态福祉绩效,构建了全要素生产率产业结构绿色特征评估框架,测度了中国30个省份1994~2014年中国生态福祉绩效的增长情况。Zhang等^[14]为评估国家尺度人类福祉的生态效率,应用生态福祉绩效指数,测度了全球82个国家生态消费转化为人类福祉效率的能力,并提出了以生态高效方式改善人类福祉的相关建议。郑德凤等^[15,16]依据生态系统服务理论,在既有研究的基础上,考虑了生态系统本身消耗的生态系统服务价值,构建了生态系统贡献率模型,并开展了相关实证研究,有效解决了现有生态福祉测度方法测算结果偏高的问题。随着生态福祉研究的不断深入,针对不同生态系统、不同空间尺度已有大量研究成果。然而,上述研究仅停留在现状评价,从生态系统服务价值视角,基于土地利用变化,预测未来生态福祉的空间分布特征仍鲜有报道。通过对未来生态福祉的模拟预测,可增强区域生态保护、国土空间规划的前瞻性,将更有助于提升生态福祉对区域政策制定者的支撑作用。

作为我国社会经济最具活力的省份之一,江苏省近年来伴随着城镇化和工业化的快速推进,建设用地规模迅速扩张,区域土地利用结构发生了显著变化,从而影响了区域生态福祉和人居环境质量。基于此,本文以江苏省为案例研究区,借鉴郑德凤等人的研究成果,采用生态系统贡献率模型,分析研究区生态福祉的时空变化趋势;在此基础上,借助GeoSOS-FLUS模型预测研究区未来土地利用情况,进而评估江苏生态福祉的空间分异特征,研究成果以期经济发达地区国土空间规划编制与生态补偿政策的制定提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省地处中国东部沿海(30°45'N~35°20'N、116°18'E~121°57'E),东濒黄海,西北连安徽省、山东省,东南与上海市、浙江省接壤,下辖13个地市级,总面积约10.72万km²,约占全国国土面积的1.12%。江苏属温带向亚热带过渡气候,四季分明,气候温和,年均平均气温约13℃~16℃;雨量适中,年均降水量在800~1200mm之间。研究区地势平坦,雨热同期,土地肥沃,以平原为主,占总面积的70%。辖区内自然资源丰富多样,河湖众多,林地、草地、湿地、滩涂等生态用地类型均有分布,沿海滩涂面积资源丰富,约占全国总滩涂面积的25%。研究区土地利用类型主要以耕地和建设用地为主,耕地面积比重较高,2020年耕地面积为62701.30km²,占土地总面积的61.85%,是我国重要的粮食主产区之一。近年来,随着城镇化和工业化进程的加快,江苏土地利用与开发程度快速提高,人地矛盾愈发尖锐。丰富的自然资源,种类多样的生态环境,快速发展

的社会经济，使得该研究区具有区域生态福祉研究的典型性和代表性。为研究需要，本文将江苏省 13 个评价单元分为苏南、苏中和苏北三大区域，其中苏南涵盖南京、苏州、无锡、常州和镇江 5 个地级市，苏中为南通、泰州和扬州 3 个地级市，其余 5 市归入苏北地区。

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 生态福祉测度

针对生态福祉的计算，本研究借鉴郑德凤等相关研究成果^[16]，从生态系统服务的角度，引入生态系统贡献率模型，测度研究区生态福祉。生态系统贡献率是指某地类生态系统为人类生产生活提供产品与服务的效率，其计算公式为：



图 1 研究区示意图
Fig. 1 Location of study area

$$c_i = 1 - (1 - t) u_i / u_l \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中： c_i 为第 i 类生态系统贡献率； t 是衡量耕地生态系统服务价值转化效率的指标，代表耕地生态系统服务价值转换因子，即单位面积耕地年均生态系统服务价值与其年均产粮经济价值之比； u_i 为第 i 种生态系统类型的生态系统服务总价值的突变隶属度； u_l 为耕地生态系统服务价值的突变隶属度^[17]。根据上述方法得到生态福祉的测算公式如下：

$$ESV_i = t \times \frac{u_i}{u_1} \times v \times g \quad (2)$$

$$GEW = \sum_{i=1}^6 ESV_i \times c_i \quad (3)$$

式中：ESVi 为第 i 种地类生态系统服务价值，i=1, 2, ..., 6 为耕地、林草地、湿地、水域、裸地和建设用地 6 类生态系统；t 为单位面积粮食价值同修正后的耕地单位面积经济价值之比；v 为粮食平均价格，万元/t；g 为平均粮食产量，t/hm²；GEW 为生态福祉，万元；公式(3)中，ci 为第 i 类生态系统的生态系统服务贡献率。

为表征区域社会生产过程中消耗单位生态福祉转化为经济效益的能力、生态福祉的供给能力，本研究在此基础上，借鉴相关研究成果构建生态-经济产出效率与人均生态福祉指标^[15]。生态-经济产出效率是指在国民生产过程中消耗单位生态福祉转化为经济效益的能力，通常以地区生产总值与生态福祉的比值进行测算(公式(4))；人均生态福祉指征生态福祉的供给能力，以区域每单位人口的生态福祉表达(公式(5))。

$$EEOC = \frac{GDP}{GEW} \quad (4)$$

$$PGEW = \frac{GEW}{RP} \quad (5)$$

式中：EEOC 为生态-经济产出效率，无量纲；GDP 为统一为 2000 年不变价后的地区生产总值，万元；PGEW 为人均生态福祉，万/人；RP 为区域人口数，人。

1.2.2 土地利用变化预测

本研究采用 GeoSOS-FLUS(以下简称为 FLUS)模型，模拟研究区未来土地利用结构变化与空间分布特征。FLUS 模型采用了多层前馈神经网络算法(BP-ANN)对传统 CA 模型进行改进，通过某一时期土地利用数据和土地利用变化驱动因子(如，高程、坡度等自然地理要素和铁路、公路等社会经济数据)，测算未来土地利用变化的适宜性概率，然后基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制，得到土地利用变化的预测结果^[18, 19]。具体步骤如下：

(1) 适宜性概率和邻域因子参数

Flus 模型中多层前馈神经网络算法由输入层、隐含层和输出层共 3 层网络构成，公式如下：

$$\begin{aligned}
sg(g, k, t) &= \sum_n w_{n, k} \times \text{sigmoid}(\text{net}_n(g, t)) \\
&= \sum_n w_{n, k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_n(g, t)}} \quad (6)
\end{aligned}$$

式中： $sg(g, k, t)$ 表示第 k 种用地类型在栅格 g 时间 t 上的适宜性概率； $w_{n, k}$ 表示隐藏层和输出层的权重； $\text{sigmoid}()$ 表示隐藏层至输出层的激励函数； $\text{net}_n(g, t)$ 表示在第 n 个隐藏时间 t 上从栅格 g 接收的信号。本文采用均匀采样法 (Uniform Sampling) 对土地利用数据和驱动因子数据进行采样 (为保持行列与分辨率的一致性, 在 ArcGIS 中掩膜裁剪并设定统一分辨率为 $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$), 隐藏层设置为 12。在此基础上, 将 4 种驱动因子 (高程、坡度、铁路和公路距离) 输入到 BP-ANN 模型当中, 经人工神经网络计算, 得出各用地类型发展概率, 进而得到各类型用地的适宜性概率。针对领域因子参数, 本文参考已有研究成果, 选取 3×3 Moore 邻域模型计算^[20], 公式如下:

$$\Omega_{g, k} = \frac{\sum_{3 \times 3} \text{con}(c_g^{t-1} = k)}{3 \times 3 - 1} \times w_k \quad (7)$$

式中： $\text{con}(c_g^{t-1} = k)$ 为用地类型 k 最后一次迭代 $t-1$ 时所占有的元胞总数量； w_k 为各类用地类型的邻域因子参数； $\Omega_{t, g, k, t}$ 为元胞 g 在 t 时刻的邻域影响因子, 邻域因子取值区间为 $0 \sim 1$, 越接近 1 则表示该类用地扩张能力越强^[20]。本文认为建设用地扩张能力最强, 裸地扩张能力最弱, 分别取值 1 和 0.3, 各类用地扩张能力依次为建设用地 > 草地 > 林地 > 耕地 > 水域 > 裸地。

(2) 自适应惯性系数与地类转换概率

各用地类型的惯性系数取决于当前土地利用现状和土地需求状况的差异, 第 k 种用地 t 时间上的自适应惯性系数为 A_{itkkt} 为:

$$A_{itk}^t = \begin{cases} A_{itk}^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ A_{itk}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ A_{itk}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： D_k^{t-2} 、 D_k^{t-1} 分别为 $t-2$ 和 $t-1$ 的土地栅格数与土地需求量的差。运用 BP-ANN 模型得到每个栅格适宜性的总概

率后，通过 CA 迭代在各类用地中对其进行分配，公式如下：

$$Tp_{g,k}^t = sg(g, k, t) \times \Omega_{g,k}^t \times Ai_k^t \times (1 - sp_{p \rightarrow k}) \quad (9)$$

式中：(1-spp→k)为土地利用类型 p 转换为类型 k 的难易程度。

1.2.3 生态福祉时空流转盈亏分析

为反映土地类型变化引起的生态福祉价值变化，测度生态福祉在空间上的损益情况，本研究以土地面积转移矩阵为基础，分析生态福祉的时空流转盈亏状况。公式如下：

$$P_{ij} = (E_j - E_i) \times A_{ij} \times C_i \quad (10)$$

式中：Pij 为第 i 种用地类型转换为第 j 种用地类型时造成生态福祉的盈亏情况；Ej 为修正后的 j 种地类的单位面积的经济价值；Ei 为修正后的 i 种地类的单位面积的经济价值；Aij 为第 i 种地类转换为第 j 种地类的转移面积^[21]，Ci 第 i 种地类转换为第 j 种地类后的生态系统贡献率。

1.2.4 双变量空间自相关分析

空间自相关是对空间属性数据间的关联程度的度量，旨在分析空间数据分布与其相邻数据间的关系，包括全局和局部空间自相关，表示为 Moran' s I 和 Local Moran' s I，计算公式如公式(11)和公式(12)所示。为进一步分析多个变量之间的相关性，有学者将其拓展为双变量自相关^[22, 23, 24]，具体计算方法见公式(13)。

$$I = \frac{\sum_{b=1}^n \sum_{i \neq 1}^n W_{bd} (Y_b - \bar{Y}) \cdot (Y_d - \bar{Y})}{S^2 \sum_{b=1}^n \sum_{i \neq 1}^n W_{bd}} \quad (11)$$

$$I_b = \frac{Y_b - \bar{Y}}{S^2} \sum_{b=1}^n \sum_{d \neq 1}^n (Y_b - \bar{Y}) \quad (12)$$

$$I_{lm}^p = z_l^p \cdot \sum_{q=1}^n W_{pq} \cdot z_m^q \quad (13)$$

式中： $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y})^2$ ， $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k$ ， Y_k 和 Y_d 分别为空间单元 b、d 的评价指标；n 为评价地区总数； I_{lm}

$$z_l^p = \frac{X_l^p - \bar{X}_l}{\sigma_l}, \quad z_m^q = \frac{X_m^q - \bar{X}_m}{\sigma_m}, \quad X_l^p$$

为空间单元 p 的双变量(评价指标 l 和 m); 其中是空间单元 p 的评价指标 l 的值; X_{lmmq} 是空间单元 q 的评价指标体系 m 的值; σ_l 、 σ_m 分别代表相应评价指标的均值和方差; Wbd 为基于空间邻近关系建立的权重。双变量空间自相关指数能准确刻画两个变量在空间上的聚类关系, 空间自相关指数 I 值若大于 0, 则表明 2 个变量在空间上呈正相关性, 且值越大, 聚集性越强; 若小于 0, 则呈负相关性, 且值越小, 空间差异性越大, 离散性越强; 若值为 0, 则呈空间独立的随机性特征[25]。包括: 高-高聚集(HH)、高-低聚集(HL)、低-高聚集(LH)和低-低聚集(LL), 不显著区域表示为空间单元的独立关系。

1.2.5 数据来源

本文选取 1995、2000、2005、2010、2015 和 2020 年江苏土地利用和社会经济数据。其中, 1995、2000、2005、2010 与 2015 年土地利用栅格数据、高程、NPP、降雨量数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(网址: <https://www.resdc.cn/>), 2020 年土地利用数据来自地理国情监测云平台(网址: www.dsac.cn/)。为研究需要, 将研究区用地类型重归类为耕地、林草地、湿地、水域、裸地和建设用地 6 类。社会经济统计数据来自《江苏统计年鉴》(2016-2020 年)和《全国农产品成本收益资料汇编》(2020 年)。其中, 1995~2020 年各地市 GDP 按照 2000 年不变价列入计算。

2 结果与分析

2.1 生态福祉的时空变化特征

2.1.1 年际变化

在用地类型汇总与统计的基础上, 根据公式(1)-公式(5), 得到江苏省 1995~2020 年生态福祉、生态经济产出效率与人均生态福祉(图 2)。1995~2020 年, 江苏省生态福祉总价值呈波动下降的态势。从 1995 年的 1 124.40 亿元减少至 2020 年的 1 028.37 亿元, 减少 96.03 亿元, 降幅 8.54%。城市规模的扩张与无序蔓延, 导致了建设与工业生产用地的急剧增加, 大量高生态福祉地类转为建设用地, 生态福祉总量持续减少。受人口总数的持续增加与生态福祉总量减少双重因素叠加的影响, 人均生态福祉从 1995 年的 1 647.71 元/人减少至 2020 年的 1 213.09 元/人, 降幅达 26.38%。然而作为我国经济强省, 江苏一直保持较高且稳定的生态经济产出效率, 25 年间 EEOC 增幅达 540.24%。社会经济的不断发展, 城市化水平的稳步提升, 有助于提高国民生产过程中消耗的生态福祉转换为经济效益的能力。

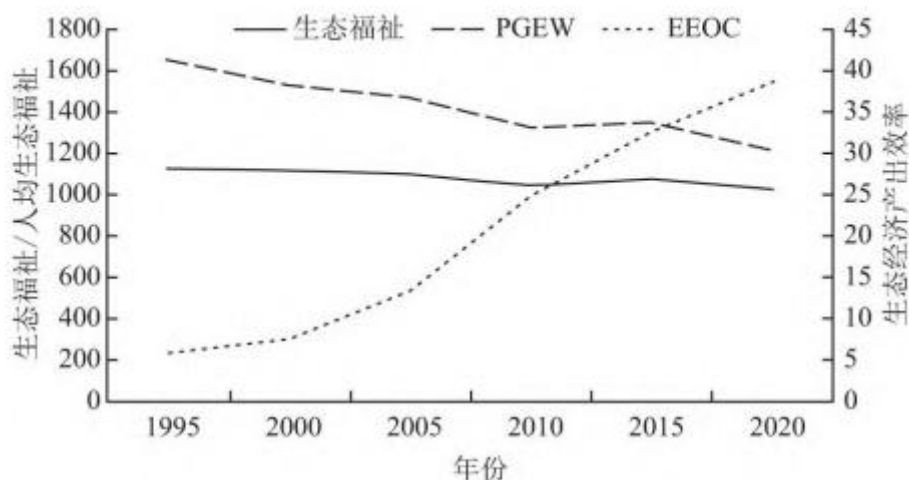


图 2 1995~2020 年江苏省生态福祉、人均生态福祉和生态经济产出效率的年际变化

Fig. 2 Interannual changes of ecological well-being, per capita ecological well-being and eco-economic output efficiency in Jiangsu province from 1995 to 2020

2.1.2 空间变化特征

从 13 个地市来看,江苏省各评价单元生态福祉总量整体呈现“北高南低”的空间分布格局。总体上,1995~2020 年苏北和苏南的盐城与镇江市生态福祉价值量始终为研究区 13 个地市的最高值和最低值(图 3)。变化趋势上,受生态用地数量和结构变化的影响,1995~2020 年 13 个地市生态福祉均呈负向变化,其中 2005~2010 年降幅最大。除镇江市一直处于持续减少的趋势外,其余各市均呈“下降-上升-下降”的变化态势。变化幅度上,受地理区位、经济发展与城市化水平的影响,25 年间苏南 5 市生态福祉的下降幅度最为明显,平均减少了 16.43%,其中苏州降幅最高,研究期内降幅达 22.56%。在此阶段苏北 5 市生态福祉变化较为平稳,平均减少仅 3.72%。作为苏北沿海重要地级市,盐城拥有国家级湿地自然保护区,是我国处于暖温带到亚热带过渡区的唯一且面积最大的沿海滩涂湿地保护区,生态调节功能突出,同时区域湿地保护管控力度较强,有效维持了区域生态福祉的供给,其变幅在 2.2%以下。

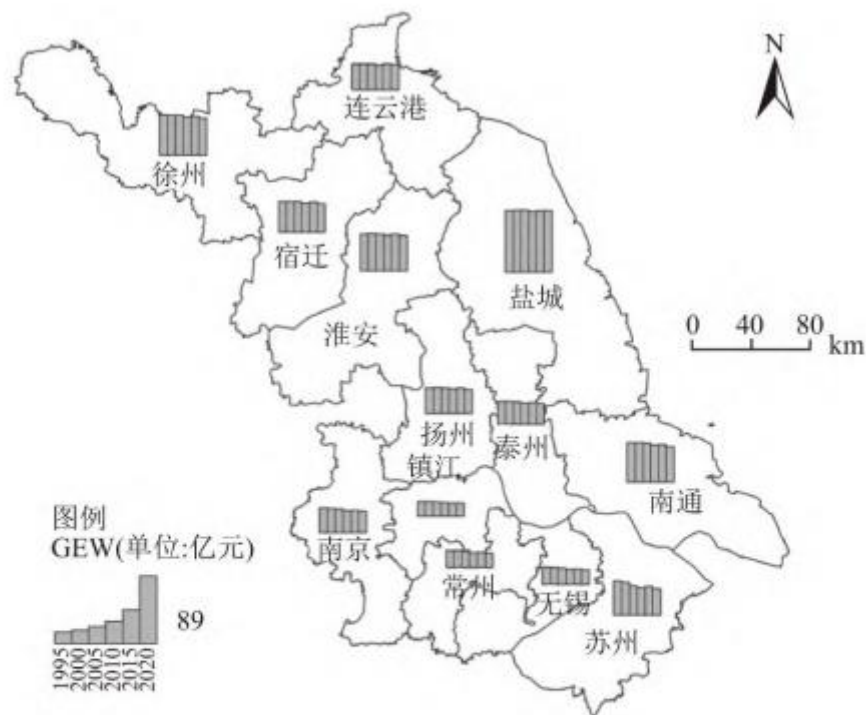


图 3 1995~2020 年江苏省生态福祉的空间变化

Fig. 3 Spatial changes of ecological well-being in Jiangsu province from 1995 to 2020

从生态-经济产出效率(EEOC)上看(图 4),江苏省 13 地市总体呈现“自南向北,逐渐递减”的梯度化空间分布特征,且随时间推移各评价单元 EEOC 呈不断上升的态势。整体上看,苏南生态-经济产出效率相对高于苏中和苏北地区,苏北 5 市最低。无锡 EEOC 值为 13 个评价单元最高,并一直保持较高且稳定的增长态势,生态-经济产出效率自 1995 年的 19.10 增长至 2020 年 114.03,研究期内增加了 497.07%。地处苏北沿海的盐城由于生态福祉总量基数较高,EEOC 值在 1995 年处于 13 地市最低,受经济增速加快的驱动,其生态-经济产出效率增幅较快,到 2020 年 EEOC 为 12.74,与 1995 年相比,生态-经济产出效率增加了 15 倍,但 EEOC 排名仍处于江苏省 13 地市的末位。1995~2005 年,江苏省各地市 EEOC 均低于 40,2005 年以后 13 地市经济发展进入高速增长期,所有评价单元生态-经济产出效率均有不同程度的增长,其中苏南 5 市 EEOC 增速加快,生态福祉和经济效益实现了良性转化。苏中地区次之,苏北由于生态福祉基数过高,尽管后期经济不断发展,其生态经济产出效率增速仍旧缓慢,该地区生态福祉的利用效率具有很大地潜在提升空间。2015~2020 年江苏多数地市 EEOC 值均呈正向增加,仅有镇江由于经济增长放缓导致其在该阶段生态-经济产出效率值出现小幅下降。

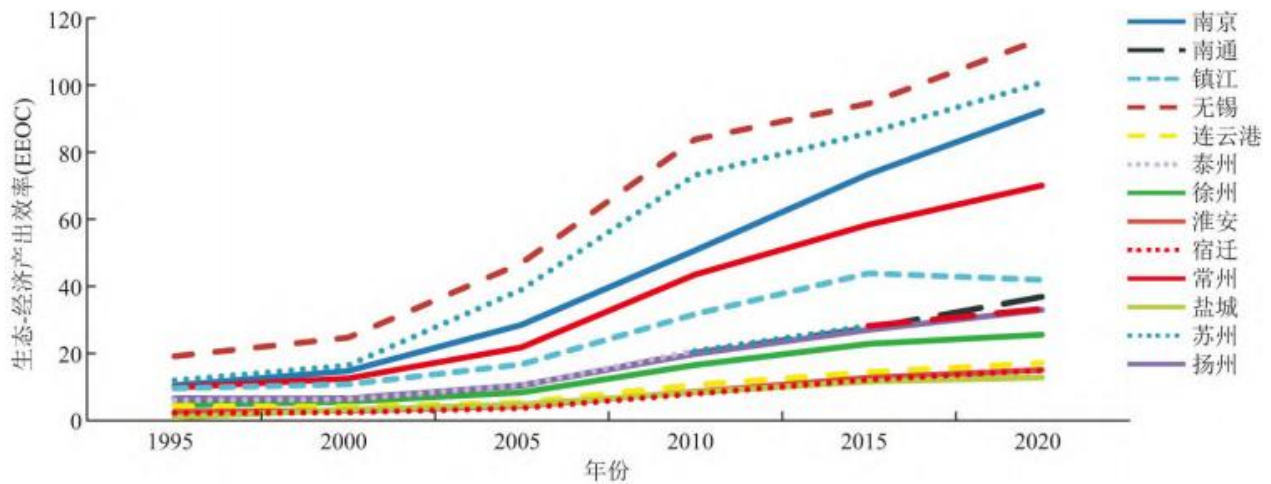


图 4 1995~2020 年江苏省生态-经济产出效率指数

Fig. 4 Eco-economic efficiency index in Jiangsu province from 1995 to 2020

从人均生态福祉上看(PGEW)(图 5),其空间分布呈现“自北向南、逐渐递减”的空间分布格局。1995~2020 年,各评价单元 PGEW 年均值最高的地市位于苏北的盐城,达 2 372.31 元/人,最低值为苏南的无锡,人均生态福祉仅为 810.43 元/人。随时间推移,各评价单元 PGEW 呈差异化的空间演化特征。1995 年研究区人均生态福祉较高,其中 7 个地市人均生态福祉大于 1 500 元/人,占总数的 53.85%;除苏州外,主要位于苏中和苏北地区,其中最高值位于苏北的淮安, PGEW 值达 2 481.36 元/人。2000 年研究区人均生态福祉超过 1 500 元/人的地市减少至 6 个。除位于苏中的南通与泰州略有涨幅外,其他地市 PGEW 均呈不同程度的下降趋势,苏州与镇江 PGEW 值分别由 1995 年的 1 696.25、1 622.52 元/人减少至 2000 年的 1 387.98、1 481.49 元/人。其中无锡降幅最高,达 18.68%。2000~2010 年,伴随苏南经济崛起、城市空间扩张,人口、产业的大量聚集导致了生态福祉的供给能力持续下降,空间分化进一步加速。在此阶段,苏南 5 市 PGEW 降幅均在 10%以上,其中苏州降幅达 32.06%,除镇江外,其他 4 市人均生态福祉值均落入 1 000 元/人以内。2010 年以后,研究区人均生态福祉进入动态调整阶段,苏南 5 市 PGEW 继续下降但速率放缓;位于苏北的淮安与盐城持续增加,其他地市波动较为平稳。至 2020 年,研究区 PGEW 值超过 1 500 元/人的评价单元进一步减少至 5 个;除位于苏中的扬州外,其余均位于苏北地区。苏中 3 市由沿海向内陆人均生态福祉依次增加。受上海产业转移与经济辐射的影响,南通人均生态福祉为 3 市中最低,仅 1 327.74 元/人。苏南地区除镇江 PGEW 超过 1 000 元/人外,其余地市均在 800 元/人以下,其中无锡仅为 547 元/人。

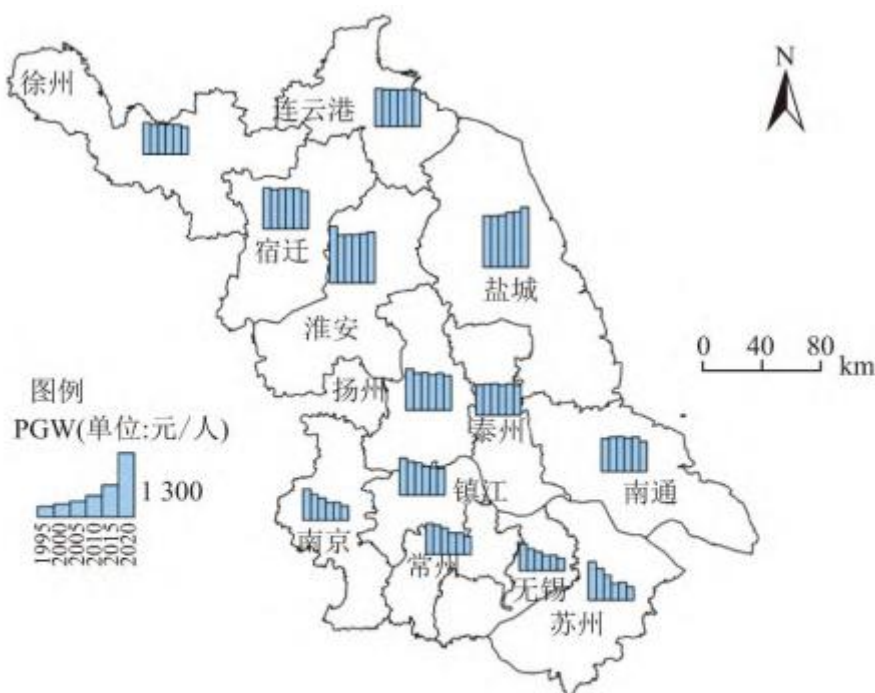


图 5 1995~2020 年江苏人均生态福祉
Fig. 5 Per capita ecological well-being in
Jiangsu 1995–2020

2.2 江苏省生态福祉预测

本文以江苏省 2015 年土地利用现状数据作为初始数据,将 ArcGIS 经过归一化处理的驱动力因子数据输入 BP-ANN 模型;通过均匀采样方法提取 20%的栅格像元作为训练样本得到区域土地利用类型适宜性概率。在此基础上,将土地利用数据提取的水域类型设置为限制发展区域,进而得到各地类 CA 参数,用于 2020 年土地利用数据模拟;再将模拟结果与 2020 年江苏省土地利用数据进行精度验证。采用 FOM 指数及 Kappa 指数验证模型的有效性,经验证 Kappa 系数结果为 0.76, FOM 指数为 0.005,均在良好范围之列,表明模型预测结果可信。2025 年江苏省仍以耕地和建设用地为主,占比分别为 61.85%、19.93%,裸地占比最小,仅占全省面积的 0.06%。与 2020 年相比,2025 年江苏省各地类除耕地、湿地面积有不同程度的增加外,其余地类均呈下降的态势,其中裸地面积下降最为明显,降幅 52.63%,其次为林草地,降低了 10.59%。

在 FLUS 模型模拟的基础上,得到江苏省 2025 年土地利用空间布局。根据公式(1)–公式(3),得到江苏省 2025 年生态福祉(图 6)。2025 年江苏省生态福祉总量为 1 039.21 亿元;与 2020 年相比,2025 年江苏省生态福祉总量增加了 10.84 亿元,增幅 1.05%。从空间上看,13 个评价单元中生态福祉最大值和最小值的地市分别为位于苏北的盐城(171.84 亿元)和苏南的镇江(39.66 亿元)。生态福祉超过 100 亿元的地市分别为位于苏北的盐城、徐州、淮安与苏中的南通 4 个地市;低于 50 亿元的评价单元均地处苏南地区,分别为常州、无锡和镇江,其他地市在 60~85 亿元之间波动。与 2020 年相比,13 个评价单元中除地处苏北的宿迁、盐城和连云港生态福祉总量略有下降外,其余地市均有不同程度的增加。



图 6 2025 年江苏省生态福祉、生态经济产出效率和人均生态福祉的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ecological well-being, eco-economic output efficiency and per capita ecological well-being in Jiangsu province in 2025

为测度 2025 年江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉水平，本研究以年际序列数据为依据，采用离散型灰色预测模型 (Discrete grey model) DGM(1, 1) 分别预测人口和国内生产总值 GDP。灰色系统理论是一种研究小样本、贫信息的不确定性系统分析方法。针对传统灰色预测模型精度较低的问题，离散型灰色预测模型更能保障预测的可信性^[26]。本研究基于灰色系统理论建模软件 GSTA V7.0 应用 DGM(1, 1) 分别预测 2025 年研究区各地市人口总量和地区生产总值 GDP。通过平均相对误差 α 进行检验，人口和 GDP 平均相对误差分别为 $\alpha < 0.05$ 、 $\alpha < 0.10$ 。根据邓聚龙的相关研究成果，预测精度满足本研究的需要^[27]。

通过预测数据，结合公式 (4) 与公式 (5) 得到 2025 年江苏省及各地级市生态-经济产出效率和人均生态福祉指标 (图 6)。2025 年，江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉分别为 42.73、1 221.33 元/人；与 2020 年相比，EEOC 与 PGEW 分别提升了 11.45%、0.68%。从空间上看，13 个评价单元中生态-经济产出效率最大值和最小值的地市分别位于苏南的无锡 (126.67) 和苏北的盐城 (14.98)。EEOC 指数超过 80 的地市均为地处苏南的无锡、南京 (100.04)、苏州 (95.26) 和常州 (80.29) 4 个地市；其余地市 EEOC 指数值均在 50 以下，其中低于 30 的评价单元均位于苏北地区，仍旧保持典型的由南到北逐渐递减的梯度化空间分布特征。受此影响，各地市人均生态福祉的最高值与最低值分别为盐城 (2 529.19 元/人) 和无锡 (570.91 元/人)。PGEW 超过 2 000 元/人的评价单元分别为盐城和淮安 2 个地市；位于苏南的常州、南京、苏州和无锡 PGEW 值均在 1 000 元/人以下，其余地市在 1 100~1 700 元/人之间波动。总体上，与 2020 年相比，江苏省 2025 年 EEOC 除苏州略有降低外，其他地市均有大幅提升，其中连云港增幅较高，达 28.19%。连云港近几年经济发展势头强劲，2018 年以来该市实施“以港兴市、产业强市、创新驱动、绿色发展、协调共进”五大战略，以“高质发展、后发先至”为主线，借助后发优势，注重产业规划与布局，形成了生态保护与经济产出的良性互动；受人口规模的影响，PGEW 在此阶段波动较为平稳，除苏北的连云港、淮安、盐城和宿迁略有下降外，其余地市均

有小幅增加。

2.3 江苏省 1995~2025 年生态福祉时空流转盈亏分析

1995~2025 年,江苏省生态福祉呈波动减少的趋势,总体上减少了 7.58%。在土地利用转移矩阵的基础上利用公式(10)得到研究期内生态福祉在空间上的盈亏状况。如图 7 所示,1995~2025 年江苏省生态福祉的增加主要源自于建设用地转水域、林草地和耕地,而水域、耕地和林草地向其他地类的转变是导致生态福祉减少的主要原因。具体来说,1995~2005 年,江苏生态福祉减少 2%。受苏南经济与城镇化快速提升所驱动,城乡建设用地急剧扩张,尤其是地处苏南的苏州中部,生态环境质量下降对生态系统服务的供给能力造成了负面影响,是造成苏南生态福祉偏低的重要原因。2005 年以后江苏省生态福祉的变动情况较为剧烈。总体来看,土地利用变化导致的生态福祉亏损要大于生态福祉盈利,总体呈亏损状态。其中,水域生态系统是维持生态福祉总量的重要贡献类型,2005~2025 年贡献率提升了 2.17%。苏南地区退田还湖政策的稳步实施是引起此变化的重要原因,为苏南地区生态福祉的提升有着重要意义。耕地转为建设用地是造成江苏生态福祉空间上亏损的主要原因,从空间上看,2005~2025 年该地类单向转换态势呈全域散布趋向苏北聚集的特征,在此阶段耕地转为建设用地对全域生态福祉的负面贡献率提升了 4.27%。

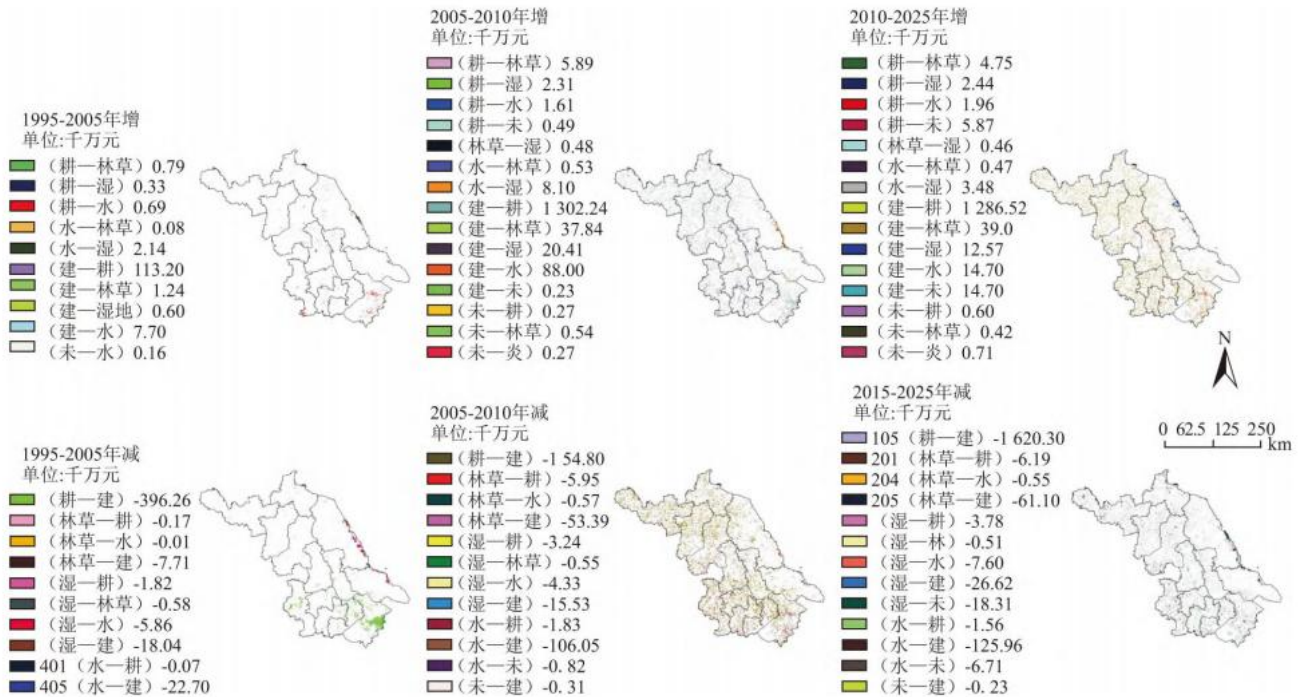


图 7 江苏省 1995~2025 生态福祉时空流转盈亏

Fig. 7 Space-time circulation profit and loss of ESV in Jiangsu province from 1995 to 2025

2.4 生态福祉与经济发展权衡与协同关系特征

为进一步探究生态-经济产出效率与人均生态福祉在空间上的权衡与协同关系,本研究借助 GeoDa 软件,采用双变量空间自相关分析方法进行全局和局部空间自相关分析。

2.4.1 全局空间自相关

本研究依据公式(11)–公式(13),采用 Queen contiguity 空间矩阵,运用双变量空间自相关分析方法,测度生态-经济产出效率和人均生态福祉的全局空间相关系数 Global Moran’ s I (表 1),分别为 -0.406、-0.436、-0.453、-0.474、-0.489、-0.462 和 -0.459,并通过 Z 值 5%显著性检验 ($P<0.005$)。1995~2025 年,研究区生态-经济产出效率与人均生态福祉之间具有显著的空间依赖效应,呈现显著的空间负相关性,即生态-经济产出效率越高人均生态福祉越低。在变化趋势上,研究期内 Global Moran’ s I 绝对值呈先增大后减小的变化趋势。1995~2015 年江苏省生态福祉转换为经济效益的能力持续下降,2015 年以后,随着 Global Moran’ s I 绝对值的减少,地区生态本底优势转换为经济发展动力有所增强,江苏呈现生态文明建设与社会经济建设协同发展的良好态势。

表 1 生态-经济效率与人均生态福祉双变量空间自相关情况

年份	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Moran’ s I	-0.406	-0.436	-0.453	-0.474	-0.489	-0.462	-0.459
P-value	0.004	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.003

2.4.2 局部空间自相关

为更直观地分析研究区各评价单元生态-经济产出效率与人均生态福祉的空间关联情况。本研究在全局空间自相关的基础上,对 1995 和 2025 年 2 期进行双变量局部空间自相关分析,在 z 值检验的基础上 ($P<0.05$),绘制人均生态福祉与生态-经济产出效率的 LISA 聚类图(图 8)。

研究时段内,江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉空间关联性不高,主要为无显著空间相关性,空间异质性突出。总体上,空间聚集主要分布在苏北和苏南区域,聚集类型为低-高和高-低 2 种类型,未有低-低、高-高聚集类型。1995 年,位于苏北的连云港和淮安呈低-高的空间特征;其中,淮安通过 $P<0.01$ 显著性检验,显著性较高。该区域社会生产力较低,经济发展相对滞后,生产方式较为粗放,消耗单位生态福祉产生的经济效益较低。但两市自然资源禀赋优越,生态福祉供给较高,形成低生态-经济产出效率与高人均生态福祉聚集区。同期,受社会经济发展与城镇空间规模的影响,位于苏南的常州与苏州两市社会经济发展水平较高,产业基础较好,产业结构较为完整,城镇化水平较高,完善的产业链条提升了资源利用效率,吸纳了大量人口迁入,在 1%的显著性水平下形成了高-低聚集的空间分布特征。

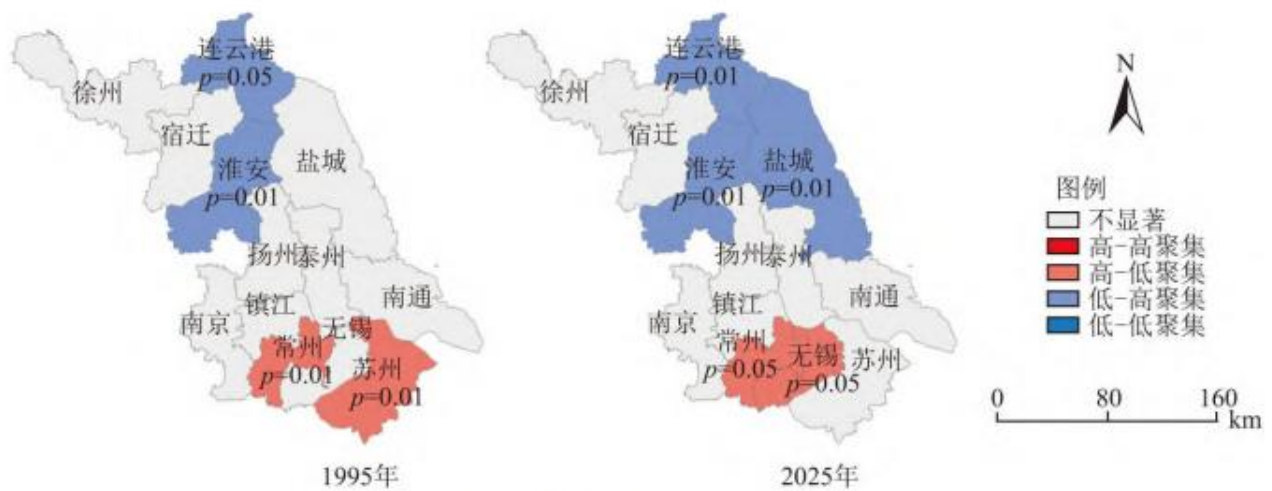


图 8 研究区 LISA 聚集图

Fig. 8 LISA aggregation map of study area

2025 年, 江苏省各研究区生态-经济产出效率和人均生态福祉的空间关系基本保持稳定。苏北的盐城进入了低-高聚集区域, 苏北低-高聚集的评价单元增至 3 个; 地处苏南的苏州退出了高-低聚集区域, 无锡由无显著空间关联性进入高-低聚集区域。研究表明, 2025 年江苏生态-经济产出效率和人均生态福祉在空间上的聚集效应将得到进一步提升。针对苏北区域尤其是生态-经济产出效率与人均生态福祉呈低-高聚集的地市, 在践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念下, 应坚持生态优先的发展原则, 要立足当地资源本底, 科学制定国土空间规划, 引导产业结构调整与优化, 充分利用生态资源发展生态产业, 挖掘生态产业的发展潜力, 更迭技术提升资源利用率, 从而增强地区生态优势转换为经济发展的能力。针对苏南区域尤其是 EEOC 与 PGEW 呈高-低聚集的地市, 人口密集, 社会经济发展水平较高, 人均生态用地面积较少, 人地矛盾尖锐, 人均生态福祉较低, 该类地区对生态福祉的利用率较高, 生态效益与经济效益转化能力强。应将发展重点转到改善人居环境质量和提升发展质量上来, 进一步提升城市建设用地节约集约利用水平, 加大生态用地供给, 加强城市生态环境保护, 注重生态文明建设与社会经济建设协同发展。同时, 随着长三角区域经济一体化发展、生态文明一体化的加快推进。未来, 长三角地区生态-经济产出效率将会进一步提升, 有力地推进了长三角一体化发展战略下的生态文明建设一体化。

3 结论和讨论

3.1 结论

本文以江苏省 13 地市为案例研究区, 基于生态系统服务理论采用生态系统贡献率模型测度 1995~2020 年研究区生态福祉及其时空演变特征; 在此基础上, 借助 GeoSOS-FLUS 模型预测江苏省 2025 年生态福祉的时空流转盈亏与空间自相关性。主要结论如下:

(1) 1995~2020 年, 江苏省生态福祉总量和人均生态福祉呈波动下降的态势, 25 年间生态-经济产出效率增幅达 540.24%。位于苏北和苏南的盐城与镇江市生态福祉价值量始终为江苏省 13 个地市的最高值和最低值。在空间分布上, 江苏省 13 地市生态-经济产出效率呈典型的自南向北逐渐递减的梯度化空间分布特征, 且随时间推移各评价单元生产-经济产出效率呈不断上升的态势; 人均生态福祉则呈自北向南逐渐递减空间分异特征。

(2) 与 2020 年相比, 2025 年江苏省生态福祉总量增加了 10.84 亿元, 增幅 1.05%, 达 1 039.21 亿元。13 个评价单元中生态福祉最大值和最小值的地市分别为位于苏北的盐城(171.84 亿元)和苏南的镇江(39.66 亿元)。2025 年, 13 个评价单元中除地处

苏北的宿迁、盐城和连云港生态福祉总量略有下降外，其余地市均有不同程度的增加。江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉分别为 42.73、1 221.33 元/人；与 2020 年相比，分别提升了 11.45%、0.68%。

(3) 1995~2025 年，江苏省土地利用变化导致的生态福祉亏损要大于生态福祉盈利，总体呈亏损状态。其中，水域生态系统是维持生态福祉总量的重要贡献类型，耕地转为建设用地是造成江苏生态福祉空间上亏损的主要原因。

(4) 1995~2025 年，江苏省生态-经济产出效率与人均生态福祉之间具有显著的空间依赖效应，呈显著的空间负相关性。2015 年以后，研究区生态优势转换为经济发展能力有所增强，呈生态文明建设与社会经济建设协同发展的良好态势。在空间上，13 地市生态-经济产出效率与人均生态福祉空间关联性不高，主要为无显著空间相关性，空间聚集主要分布在苏北和苏南区域，聚集类型为低-高和高-低 2 种类型，未有低-低、高-高聚集类型。

3.2 讨论

土地利用状况与生态福祉关系密切，从土地利用变化出发，通过生态福祉定量测度及预测研究可有效促进区域环境保护和人类福祉的提升。生态系统贡献率模型考虑了生态系统本身消耗的生态系统服务价值，实现了对生态福祉的测度，为全面、准确地反映人类从自然环境中享有的生态福祉提供了可行途径。作为土地利用变化预测模拟的主流工具，GeoSOS-FLUS 模型成功耦合了神经网络算法(ANN)、系统动力学(SD)与元胞自动机(CA)，能有效处理多种土地利用类型在自然与人类活动共同影响下发生相互转化时的复杂性和不确定性。本研究借助 GeoSOS-FLUS 模型的优势，结合离散型灰色预测模型，通过 1995~2020 历史数据尝试探讨了江苏省 2025 年生态福祉的空间格局特征。该研究方法为区域生态福祉预测研究提供了一个思路参考。江苏省作为长三角经济一体化的重要组成部分，其经济社会发展同人类福祉的同步提高是实现区域高质量发展的关键。从全省层面来看，江苏在率先实现社会主义现代化目标的指引下，需重视国土空间规划对区域协调发展的引领作用，鼓励发展新产业、新业态，推进产业生态化和生态产业化，从而实现经济高质量发展与居民生态福祉协同提升的目标。此外，需要指出的是，囿于数据所限本研究未考虑生态福祉在地市间流入与流出问题。同时，该文利用 GeoSOS-FLUS 模型对土地利用情况进行预测，仅考虑了历史与现势外推情景下土地利用情景的空间演变情况，未进行不同情境下(如生态保护情景、经济发展情景、规划情景等)生态福祉的空间模拟。进一步扩展生态福祉的预测研究，将更有助于加强生态福祉对区域政策制定者的支撑作用。今后，需选取更多社会经济驱动因子，进一步开展更为精细的多情景预测与模拟，细化生态福祉类型，例如通过环境福祉和资源福祉的时空演化与驱动因素分析，以便为研究区未来国土空间规划制定与生态安全的继续提供更为精准的决策依据。

参考文献

- [1] 臧正, 邹欣庆. 基于生态系统服务理论的生态福祉内涵表征与评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4):1085-1094. ZANG Z, ZOU X Q. Connotation characterization and evaluation of ecological well-being based on ecosystem service theory[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4):1085-1094.
- [2] HELLIWELL D. Valuation of wildlife resources[J]. Regional Studies, 1969(1):41-47.
- [3] WESTMAN W E. How much are nature's services worth?[J]. Science, 1977, 197(4307):960-964.
- [4] EHRLICH P R, MOONEY H A. Extinction, substitution, and ecosystem services[J]. Bioscience, 1983, 33(4):248-254.
- [5] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [6] COSTANZA R, ARGE, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural

capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15):253-260.

[7] COSTANZA R, GROOT R D, BRAAT L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? [J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28:1-16.

[8] ASSESSMENT M E. *Ecosystems and human well-being: synthesis* [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.

[9] WOLFF S, SCHULP C J E, VERBURG P H. Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 55:159-171.

[10] BRAAT L C, GROOT R D. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy [J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1):4-15.

[11] 杨雪婷, 邱孝枰, 徐云, 等. 典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征——以川西山区为例 [J]. *生态学报*, 2021, 41(19):7555-7567. YANG X T, QIU X P, XU Y, et al. Spatial heterogeneity and dynamic features of the ecosystem services influence on human wellbeing in the West Sichuan Mountain Areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19):7555-7567.

[12] BIAN J, ZHANG Y, SHUAI C Y, et al. Have Cities effectively improved ecological well-being performance? empirical analysis of 278 Chinese Cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245:118913.

[13] FENG Y J, ZHONG S Y, LI Q Y, et al. Ecological well-being performance growth in China (1994-2014): from perspectives of industrial structure green adjustment and green total factor productivity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236:117556.

[14] ZHANG S, ZHU D J, SHI Q H, et al. Which countries are more ecologically efficient in improving human well-being? An application of the Index of Ecological Well-being Performance [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129:112-119.

[15] 郑德凤, 王燕燕, 曹永强, 等. 基于生态系统服务的生态福祉分类与时空格局——以中国地级及以上城市为例 [J]. *资源科学*, 2020, 42(6):1110-1122. ZHENG D F, WANG Y Y, CAO Y Q, et al. Classification and spatiotemporal patterns of ecological well-being based on ecosystem services: Taking China's prefecture-level and above cities for example [J]. *Resources Science*, 2020, 42(6):1110-1122.

[16] 郑德凤, 王燕燕, 刘晓星, 等. 基于生态系统服务的中国生态福祉划时空格局与潜力分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5):645-653. ZHENG D F, WANG Y Y, LIU X X, et al. Temporal-spatial pattern and potential analysis of China's ecological well-being zone based on ecosystem services [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(5):645-653.

[17] 郑德凤, 臧正, 孙才志. 改进的生态系统服务价值模型及其在生态经济评价中的应用 [J]. *资源科学*, 2014, 36(3):584-593. ZHENG D F, ZANG Z, SUN C Z. An improved ecosystem service value model and application in ecological economic evaluation [J]. *Resources Science*, 2014, 36(3):584-593.

-
- [18] LIU X, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168:94-116.
- [19] JI Z, WEI H, XUE D, et al. Trade-off and projecting effects of land use change on ecosystem services under different policies scenarios: A case study in central China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(7):3552.
- [20] LIANG X, LIU X, LI D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(11):2294-2316.
- [21] 王庭辉, 王喜, 秦耀辰, 等. 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2):330-341. WANG T H, WANG X, QIN Y C, et al. Spatial-temporal correlation analysis of ecosystem services value and human activities in Danjiangkou Reservoir area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(2):330-341.
- [22] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9):249-256. YAO X W, ZENG J, LI W J. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9):249-256.
- [23] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析 [J]. *生态学报*, 2019, 39(7):2366-2377. LEI J R, CHEN Z Z, WU T T, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan Island [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7):2366-2377.
- [24] ANSELIN L, REY S. New tools for spatial data analysis: proceedings of the specialist meeting [M]. Santa Barbara: University of California, 2002.
- [25] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系 [J]. *生态学报*, 2021, 41(15):6134-6145. ZHOU T, CHEN W X, LI J F, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15):6134-6145.
- [26] 付永虎, 刘黎明, 起晓星, 等. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10):152-160. FU Y H, LIU L M, QI X X, et al. Environmental effects evaluation for grain production based on grey water footprint in Dongting Lake area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10):152-16.
- [27] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及应用(5版) [M]. 北京: 科学出版社, 2000. LIU S F, DANG Y G, FANG Z G, et al. Grey system theory and application (5th Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2000.