

引用格式: 文博, 徐聪, 孟霖, 等. 苏南地区生态用地破碎度时空演变及其对建设用地扩张的响应: 基于环境库兹涅茨曲线视角[J]. 资源科学, 2023, 45(8): 1676–1691. [Wen B, Xu C, Meng L, et al. Spatiotemporal evolution of ecological land fragmentation and its response to construction land expansion in southern Jiangsu Province: An environmental Kuznets curve perspective[J]. Resources Science, 2023, 45(8): 1676–1691.] DOI: 10.18402/resci.2023.08.14

# 苏南地区生态用地破碎度时空演变及其 对建设用地扩张的响应 ——基于环境库兹涅茨曲线视角

文博<sup>1</sup>, 徐聪<sup>2</sup>, 孟霖<sup>3</sup>, 邹伟<sup>2</sup>, 夏敏<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学风景园林学院, 南京 210037; 2. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095;  
3. 山东师范大学公共管理学院, 济南 250014)

**摘要:**【目的】生态用地破碎化严重影响生态系统结构完整和功能发挥, 建设用地扩张与生态用地破碎化的矛盾是寻求人与自然和谐共生的国土空间开发与保护过程中亟需解决的问题之一。【方法】本文以苏南地区为例, 在分析生态用地时空变化的基础上, 构建综合破碎度指标体系, 研究生态用地破碎度的时空特征, 并基于环境库兹涅茨曲线理论, 考察生态用地破碎度对建设用地扩张的响应。【结果】①2000—2020年苏南地区生态用地发生了复杂变化, 共增加了24.2483 km<sup>2</sup>, 其中有64.8241 km<sup>2</sup>耕地和5.1043 km<sup>2</sup>建设用地转为生态用地; 而生态用地转为非生态用地面积为49.9059 km<sup>2</sup>, 主要去向为建设用地和耕地。②生态用地破碎度呈现先增加后减少的状态, 长江沿线, 太湖、固城湖、溧湖等重要水体周边区域破碎化程度增加明显。③建设用地规模与生态用地破碎度存在倒U型关系, 随着建设用地面积增加, 生态用地破碎度先增加后减少。【结论】生态用地破碎度对建设用地扩张的时空响应符合环境库兹涅茨假说, 苏南多数城市建成区已到达拐点。建议通过探索生态用地占补平衡, 生态规划先行, 提升建设用地与生态用地的布局协调性, 最终实现“精明增长”与绿色发展协同共进。

**关键词:** 生态用地; 破碎化; 建设用地扩张; 环境库兹涅茨曲线; 苏南地区

DOI: 10.18402/resci.2023.08.14

## 1 引言

改革开放以来, 中国的现代化水平得到了飞速发展。持续高强度的人类活动驱使土地资源在短期内发生剧烈变化, 尤其在经济发达地区, 城镇化、工业化以及承载各项社会事业发展的用地需求使建设用地快速扩张<sup>[1,2]</sup>。在耕地用途管制的长期约束下, 建设用地扩张不得不以消耗湿地、草地、林地等生态用地作为代价, 生态用地不断萎缩和破碎化, 严重影响生态系统结构和功能<sup>[3-5]</sup>。党的二十大报告提出的“尊重自然、顺应自然、保护自然”“站在

人与自然和谐共生的高度谋划发展”为妥善处理发展与保护指明了方向。随着社会经济发展步伐的加快, 建设用地扩张在一定时期内还将持续, 在此过程中生态用地破碎化的加剧不利于区域的可持续发展<sup>[6,7]</sup>。如何在建设用地扩张与生态用地破碎互动过程中将生态用地破碎化控制在与社会经济发展相适应的范围, 寻求人与自然和谐共生的国土空间开发与保护策略, 是实现区域绿色高质量发展的有效途径。因此, 正确认识生态用地破碎度的时空演变过程及其对建设用地扩张的响应, 对探索经

收稿日期: 2023-01-14 修订日期: 2023-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071221; 72003090); 江苏省高校哲学社会科学研究一般项目(2023SJYB0149)。

作者简介: 文博, 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为国土整治与生态修复。E-mail: wenbo2019@njfu.edu.cn

通讯作者: 夏敏, 女, 江苏南京人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土地可持续利用。E-mail: xm@njau.edu.cn

2023年8月

济社会绿色化发展路径具有重要意义。

林地、水域、草地等各种以发挥生态效用为主要功能的自然和人工生态用地的破碎化是导致区域生态系统服务功能退化的主要原因<sup>[8,9]</sup>。生态用地的持续破碎化将导致生物多样性减少、生态空间隔离、核心生境面积缩小以及生境质量下降等生态安全问题的出现,威胁人类的可持续发展<sup>[10,11]</sup>。破碎化程度通常使用图斑的形态特征、单位面积内的图斑数量以及景观格局指标来刻画,其中斑块类型面积、边缘密度、斑块密度、景观形状指数以及聚集度等指标常用于景观破碎度的定量表征<sup>[12-14]</sup>。借助地理探测器、相关性分析、主成分分析、地理加权回归、空间自相关分析等方法针对流域<sup>[15]</sup>、都市边缘地区<sup>[16-18]</sup>、山区<sup>[19]</sup>以及草地<sup>[20]</sup>景观破碎度的影响因素开展研究,结果表明,自然因素如气候变化与地形条件等因素能够驱动林地、草地与湿地景观破碎度在水平和垂直方向发生时空变化<sup>[21-24]</sup>;人口增长、经济发展、城镇建设等社会经济因素也能够驱动生态用地时空变化<sup>[25-28]</sup>。建设用地作为人口增长、产业集聚、文化发展等各项事业的载体,其扩张是人类活动在时空上的重要表征<sup>[29,30]</sup>,会对生态用地的规模、形态以及结构和功能的完整性产生剧烈的影响,进而导致生态用地的破碎化。

环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)反映了经济发展与环境质量之间的关系,认为经济发展初期,经济增长以牺牲生态环境质量为代价,然而当经济发展到一定水平时,经济增长反而有益于生态环境质量的改善。众多国内外学者从不同国家或地区、不同时间段对环境库兹涅茨曲线进行大量实证研究,发现人均GDP与碳排放、雾霾污染、城市生活垃圾等环境指标之间呈倒U型关系<sup>[31-33]</sup>,并且还发现了不同形式的EKC曲线如N型、倒N型、线型等关系<sup>[34,35]</sup>。生态用地作为环境要素的重要组成部分之一,因受到建设用地快速扩张等人类活动的剧烈干扰,其破碎化不断加剧。随着近年来社会经济快速发展、人民群众对美好生活的不懈追求以及绿色发展理念的深入贯彻,生态用地的破碎度是否也会遵循环境库兹涅茨曲线,随建设用地扩张呈现先增加后下降的非线性关系,值得研究。

江苏省长江以南地区是长江三角洲的中心,地

处长江下游,水网发达,生态用地占比相对较高。自改革开放以来经历了城镇化、工业化的飞速发展,是中国经济最发达、现代化程度最高的区域之一,苏州、无锡等地土地开发强度已达到30%,建设用地快速扩张导致生态用地破碎化加剧,资源环境承载压力逐年上升<sup>[36]</sup>。以苏南地区的南京、无锡、常州、苏州、镇江等5个城市为研究区域,基于Landsat遥感影像,系统分析2000—2020年生态用地时空演化过程,从斑块特征、景观异质性、空间相互关系3个层面选取指标构建综合破碎度指数,并剖析生态用地综合破碎度的演变特征,基于环境库兹涅茨曲线,运用面板数据回归模型探讨生态用地破碎度对建设用地扩张的响应过程,不仅能够为快速城镇化地区协调建设用地利用与生态用地保护提供决策参考,也是对绿色高质量发展理念下人与自然和谐共生的发展方式的积极探索。

## 2 理论分析和研究假说

### 2.1 生态用地破碎度时空演变驱动因素作用机理

关于生态用地的分类,学术界尚没有形成统一论,根据本文研究需要,参考高吉喜等<sup>[5]</sup>的研究成果,认为生态用地是指城乡生产用地和生活用地以外,能够满足人类及其他生物生存活动所需的自然环境条件,具有保护生物多样性、土壤保持、维持生态系统服务、保护生态安全格局等重要生态功能的土地利用类型。因此,本文将林地、草地、水域3类用地认定为生态用地进行研究。生态用地破碎化作为生态用地时空变化的结果同样受到了自然因素、社会经济因素以及政策因素的驱动,生态用地破碎度时空演变驱动因素作用机理如图1所示。长时间尺度下的气候变化以及垂直梯度的环境变化形成了生态系统生境适宜性的时空差异,生态用地破碎度会随着其承载的生态系统的生境适宜性改变而发生时空变化<sup>[36,37]</sup>。而社会经济发展主要表现为人口增长、产业集聚、交通延伸、文化繁荣等内容,这些内容均以建设用地为承载,建设用地的扩张在时间和空间维度上表征为建设用地规模的增加<sup>[38,39]</sup>。短期内建设用地的快速扩张导致了城镇及交通沿线周边农业用地、生态用地的被占用。

### 2.2 绿色发展理念下生态用地破碎度对建设用地扩张的响应过程

根据上述分析可知,建设用地扩张以及由于建

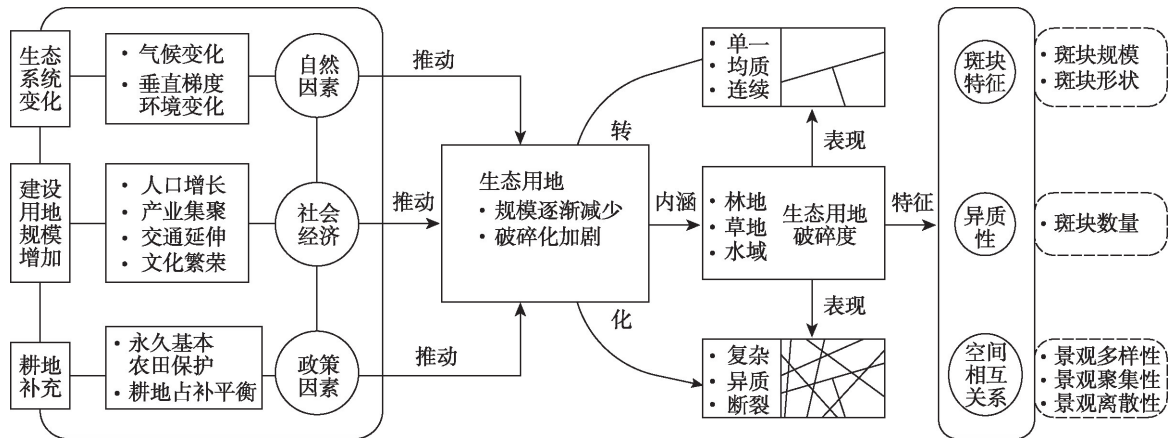


图1 生态用地破碎度时空演变驱动因素作用机理

Figure 1 Mechanisms driving the spatial and temporal evolution of ecological land fragmentation

设占用实施的耕地占补平衡项目导致了生态用地规模的减少、破碎化水平的增加。自2012年全国生态红线划定工作开展以来,具有重要生态功能的自然保护区、森林公园,以及生态环境脆弱区被纳入国家级生态红线,不仅对红线内的建设用地扩张形成制约,而且对以红线内生态用地开发为耕地以满足占补平衡的耕地补充路径也形成了约束,有效保护了生态用地的数量与质量<sup>[40]</sup>。近10余年间,部分地区生态红线内部及周边生态基础较好区域的生态用地破碎度呈现下降趋势<sup>[15]</sup>,建设用地扩张对生态用地结构和功能发挥的不利影响得到有效控制。

同时,土地利用的过程中也更加注重人居环境的品质提升<sup>[41]</sup>,以新增建设用地精明增长,城市更新、城镇低效用地再开发等存量建设用地利用效率提升工作的开展进一步控制了建设用地扩张对生态用地破碎化的驱动作用,强化了建设用地扩张的有序性<sup>[38]</sup>。此外,随着绿色发展理念深入人心,不仅针对流域、生态脆弱地区陆续实施了生态修复工程,对生态规划尤其是区域生态基础设施与生态屏障的重视程度也上升到新的高度,一系列生物多样性保护、海岸带修复、生态治理、矿山修复工程项目的实施有效补充了生态用地的规模,减缓了生态用地向建设用地等非生态用地转变的进程<sup>[5]</sup>,提升了生态用地的空间连续性。“生态优先”的发展理念推动了建设用地扩张与生态用地之间的良性互动,最终呈现建设用地规模的增加与生态用地破碎度下降的发展趋势<sup>[42]</sup>。基于上述理论分析,面对建设用地扩张即建设用地面积的增加,生态用地破碎度将

出现先上升后下降的趋势,如图2所示。生态用地破碎度对建设用地扩张的响应过程理论上符合环境库兹涅茨曲线的倒U型关系特征,本文后续将对此进行验证。

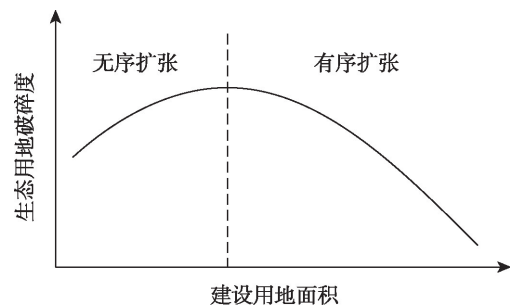


图2 建设用地与生态用地破碎度的倒U型关系概念图

Figure 2 Conceptual diagram of the inverted U-shaped relationship between building land and ecological land fragmentation

### 3 研究区概况、数据来源与研究方法

#### 3.1 研究区概况

本文以江苏省长江以南的苏南地区为研究区域,主要包括南京、苏州、无锡、常州、镇江5个设区市的全域空间,研究区位于东经118°22'—121°20',北纬30°47'—32°37',国土面积28085.36 km<sup>2</sup>,东靠上海,西接安徽,南连浙江,北通长江(图3)。地处长三角核心区域,是长江经济带东部城市群的重要组成部分。2020年底,GDP总量达到5.94万亿,人均GDP超过15万元,是中国社会经济发展水平处于前列的城市群之一。气候类型属于典型的亚热带湿润季风气候,四季分明。地貌类型以平原和低山丘陵为主,土地资源以耕地为主,河流、湖泊分布

2023年8月

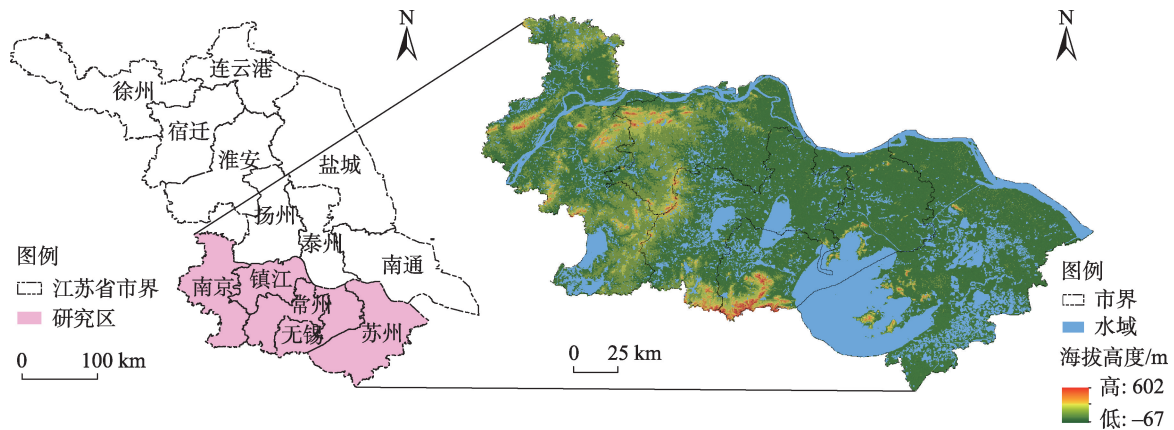


图3 研究区区位图

Figure 3 Location of the study area

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号标准地图制作,底图未做修改。

广泛,水网密集,生态本底较好。随着城镇化、工业化的进程加快,苏南地区人口密度快速增长、人地关系紧张,旺盛的建设用地扩张需求促使生态空间被分割、蚕食,生态用地的破碎化程度加剧。因此,在人与自然和谐共生的发展理念下,开展生态用地破碎度的时空演化研究,引导生态用地合理利用,对苏南地区实现绿色高质量发展具有重要意义。

### 3.2 数据来源

#### 3.2.1 遥感影像数据

2000年江苏省委、省政府对城镇化发展作出了决策部署,苏南地区由于经济基础较好,优先进入城镇化快速发展新阶段<sup>[43]</sup>。过去20余年中,苏南地区建设用地扩张迅速,土地开发强度快速增长,致使生态用地破碎化加剧。本文以苏南地区2000—2020年为研究时段,以2000、2005、2010、2015以及2020年共5期Landsat TM/ETM和Landsat 8 OLI遥感影像为数据源(分辨率为30 m,云量小于10%)开展研究,数据来源为中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/search>)。通过辐射校正和几何校正以及裁剪等方式进行预处理,参考已有研究成果<sup>[13,20]</sup>,结合苏南地区土地利用实际情况和本文研究需要,按照中国科学院土地利用覆盖分类体系,将研究区土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地等6个土地利用类型,并采用支持向量机方法进行监督分类,5期解译数据分类总体精度均高于85%。参考高吉喜等<sup>[9]</sup>关于生态用地

的研究成果,将解译获得的林地、草地、水域等3类直接或间接提供生态系统服务功能的用地认定为生态用地;此外,本文建设用地包括城乡建设用地、工矿用地、交通用地等各类人工硬化土地<sup>[20]</sup>。

#### 3.2.2 气象数据

参考生态用地时空变化影响因素研究相关成果,降水量、气温、日照等气象因素在较长时期内能够对生态用地的时空分布形成影响,从而进一步影响生态用地的破碎度。本文通过收集2000、2005、2010、2015以及2020年江苏省范围的地面气象观测站点数据(国家气象信息中心,<http://data.cma.cn>),统计各年度平均降雨量、平均气温以及日照时长,借助ArcGIS 10.3空间插值工具,生成苏南地区30 m精度的年平均降雨量、平均气温以及日照时长等指标的栅格数据。

#### 3.2.3 社会经济数据

本文所使用社会经济数据如人口、公共预算收入、工业增加值、第三产业增加值、固定资产投资等来源于历年《江苏省统计年鉴》和苏南5市统计年鉴。由于2000—2020年间,江苏省部分地区行政区划所有调整,且无锡市与苏州市统计年鉴中仅有市区数据,为了保证2000—2020年5期数据的可比性和样本的充分性,以调整后的行政区划作为研究单元,并将无锡市与苏州市市区社会经济数据赋值到市区的各区(县)级行政单元,最终形成39个单元,借助ArcGIS 10.3将各年度社会经济数据赋值到不

同单元的矢量图层,汇总统计数据以开展后续分析。

### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 土地利用变化分析

##### (1) 土地利用动态度

土地利用动态度,即土地利用变化率,能够在一定层面上直观反映土地面积在数量上的变化速度,表现出土地利用的程度和差异。公式如下:

$$K_i = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $K_i$ 为 $T$ 研究期( $T=b-a$ )内第 $i$ 种土地利用动态度; $U_a$ 和 $U_b$ 分别为研究期初和期末该土地用途的面积。

##### (2) 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵 $S_{ij}$ ,表示一定时间段内数量和面积之间的转变过程,即区域土地利用变化的结构特征,揭示了各个不同用地之间的转移方向和转移性质。公式如下:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $S_{ij}$ 为研究期内土地用途 $i$ 转变为土地用途 $j$ 的总面积; $i$ 和 $j$ 分别为研究期初、期末的土地用途; $n$ 为土地用途的数量。

##### (3) 土地利用扩张综合指数

土地利用扩张综合指数从土地利用动态度和土地利用扩张强度两个方面衡量土地利用的扩张程度<sup>[44]</sup>。其中,扩张强度指数表示某一土地用途在某一时间内的扩张数量在土地总数量中的占比,其数值的大小表示土地利用扩张的速度,值越大,扩张速度越快。土地利用扩张强度计算公式如下:

$$ES = \frac{|LU_2 - LU_1|}{LU_0} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $ES$ 为某一时期某一土地用途的扩张强度指数; $LU_1$ 、 $LU_2$ 分别为研究期初、期末该土地用途的面积; $LU_0$ 为研究地区的土地总面积。

土地利用扩张综合指数计算公式如下:

$$ED = \sqrt{\frac{K^2 + ES^2}{2}} \quad (4)$$

式中: $ED$ 表示土地利用扩张综合指数,即某一土地用途的扩张程度。

#### 3.3.2 综合破碎度分析

##### (1) 指标选取

利用 ArcGIS 10.3 软件对解译后的景观类型分布数据进行叠加处理,运用 Fragstats 4.2 软件对研究区类型(class)级别和景观(landscape)级别的景观指数进行计算。基于已有文献的数量分析方法<sup>[23]</sup>,从斑块特征、景观异质性、空间相互关系3个层面,选取斑块规模、斑块形状、斑块数量、景观多样性、景观聚集性、景观离散性等6个指标类型8个指标(表1)进行标准化,等权叠加后得到综合破碎度指数。各指标的生态学意义和公式在 Fragstats 4.2 软件中有明确说明。综合考虑 Fragstats 4.2 数据测算能力、后续定量模型以及研究区生态用地斑块面积大小,以5 km×5 km 网格大小测算生态用地综合破碎度。

数据标准化采取 min-max 规范化方法,使之落入区间[0, 1],去除单位限制,转化为无量纲的纯数值,方便不同单位的指标加权求和。对于正向指标,其公式为:

$$y_i = \frac{x_i - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_i\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i\}} \quad (5)$$

式中:序列 $y_1, y_2, \dots, y_n \in [0, 1]$ ,且无量纲。

对于负向指标,其公式为:

$$y_i = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_i\} - x_i}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_i\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i\}} \quad (6)$$

式中:序列 $y_1, y_2, \dots, y_n \in [0, 1]$ ,且无量纲。本文对各项指标进行等权叠加,得到生态用地综合破碎度指数。

#### 3.3.3 面板数据模型构建

建设用地扩张是随着时间和空间变化表现出

表1 综合破碎度选取的景观格局指数

Table 1 Landscape pattern indices for comprehensive fragmentation evaluation

| 类型     | 指标    | 景观指数   | 缩写      |
|--------|-------|--------|---------|
| 斑块特征   | 斑块规模  | 景观变异系数 | AREA_CV |
|        | 斑块形状  | 斑块内缘比  | PARA    |
|        |       | 斑块形状指数 | LSI     |
| 景观异质性  | 斑块数量  | 斑块密度   | PD      |
|        |       | 边缘密度   | ED      |
|        | 景观多样性 | 多样性    | SHDI    |
| 空间相互关系 | 景观聚集性 | 邻接指数   | PROX    |
|        | 景观离散性 | 分散指数   | SPLIT   |

2023年8月

来的规模差异,因此本文采用面板数据模型从时间和空间两个维度考察生态用地破碎度对建设用地扩张的响应。面板数据同时拥有时间维度和截面维度,相较时间序列数据和截面数据容纳更多的有效信息。面板数据模型的选择通常由3种形式:固定效应模型、随机效应模型和混合回归模型。一般采用 $F$ 检验判别采取固定效应模型还是混合模型,使用Hausman检验判别选择固定效应模型还是随机效应模型。如果检验存在显著的时间虚拟变量,则可以通过加入时间效应项建立双向固定效应模型。

借鉴Grossman等<sup>[45]</sup>的经验EKC模型方程和国内外学者已有研究,加入建设用地面积的平方项,面板数据模型设置如下:

$$frag_{jt} = \alpha jsyd_{jt} + \beta jsyd_{jt}^2 + \gamma Z_{jt} + \mu_j + \varepsilon_{jt} \quad (7)$$

式中: $frag$ 为生态用地破碎度,通过Fragstats 4.2计算得出生态用地破碎度; $jsyd$ 为建设用地面积,快速扩张的建设用地能够反映产业结构转型、人口增长、居民生活水平提升、投资增加等要素的相互作用; $Z$ 表示一系列控制变量,主要包括社会经济方面的耕地面积、常住人口、公共预算收入、工业增加值、固定资产投资,以及自然方面的年平均降水量、年平均温度、年日照时长; $j$ 为地区; $t$ 为时间; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为待估参数;不可观测的随机变量 $\mu_j$ 为个体异质性的截距项; $\varepsilon_{jt}$ 为随个体和时间而改变的扰动项。上述变量解释及统计特征见表2所示。

为了保持研究尺度的统一,借助ArcGIS 10.3将2000—2020年5期建设用地面积、耕地面积、社会经济统计数据、气象数据提取或者赋值到5 km×5 km网格中,以网格为单元参与模型测算。在模型构建的基础上,需要通过变量的系数、显著性以及变量的取值范围来综合判断建设用地规模和生态用地破碎度之间的倒U型关系,即:建设用地面积的一次项系数大于0,平方项系数小于0,且均在统计学上显著;同时,建设用地面积的取值范围内,存在 $jsyd^*$ 使得破碎度达到最高,在该点之前生态用地破碎度随建设用地面积增加呈现正向响应,在此点后呈现负向响应,拐点(也是函数的最大值)处的建设用地面积计算公式为:

$$jsyd_u^* = -\frac{\hat{\alpha}}{2\hat{\beta}} \quad (8)$$

式中: $jsyd^*$ 为拐点处的建设用地面积值; $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 分别为估计得到的系数值。

## 4 结果与分析

### 4.1 生态用地时空格局及其演变特征

#### 4.1.1 生态用地时空变化

##### (1)数量变化特征

2000—2020年苏南地区生态用地共计增加24.2483 km<sup>2</sup>,其中水域面积增加最多,为27.6990 km<sup>2</sup>;草地面积增加5.4245 km<sup>2</sup>;而林地面积则减少8.8752 km<sup>2</sup>(表3)。就变化过程而言,林地面积持续减少,草地面积呈现先减少后增加的趋势,而水域

表2 变量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of variables

| 变量     | 变量含义    | 单位              | 观测数  | 平均值     | 标准差    | 最小值     | 最大值      |
|--------|---------|-----------------|------|---------|--------|---------|----------|
| $frag$ | 生态用地破碎度 | —               | 6285 | 0.39    | 0.11   | 0.11    | 0.56     |
| $jsyd$ | 建设用地面积  | km <sup>2</sup> | 6285 | 4.70    | 5.11   | 0.00    | 25.00    |
| $gd$   | 耕地面积    | km <sup>2</sup> | 6285 | 11.30   | 7.40   | 0.00    | 24.47    |
| $gdp$  | 国民生产总值  | 百亿元             | 6285 | 11.90   | 14.82  | 0.06    | 74.94    |
| $rp$   | 人口      | 百万人             | 6285 | 1.27    | 1.14   | 0.07    | 5.48     |
| $gbr$  | 公共预算收入  | 百万元             | 6285 | 1.46    | 2.42   | 0.01    | 12.40    |
| $iav$  | 工业增加值   | 百万元             | 6285 | 6.54    | 8.74   | 0.01    | 69.70    |
| $ti$   | 第三产业产值  | 百万元             | 6285 | 5.88    | 8.35   | 0.04    | 39.13    |
| $fai$  | 固定资产投资  | 百万元             | 6285 | 24.41   | 564.97 | 0.02    | 16923.17 |
| $js$   | 降水      | mm              | 6285 | 1175.72 | 260.04 | 706.51  | 1845.45  |
| $qw$   | 气温      | ℃               | 6285 | 17.26   | 1.17   | 15.80   | 22.22    |
| $rz$   | 日照      | 小时              | 6285 | 1864.52 | 145.85 | 1540.00 | 2214.62  |

面积呈现先增加后减少的势态。通过土地利用动态度的对比发现,生态用地中草地变化相对更为剧烈。从变化速度来看,水域、林地、草地依次降低,而水域、林地、草地的扩张程度依次增加,苏南地区生态用地变化复杂。

根据2000—2020年苏南地区土地利用类型转移矩阵(表4),2000—2020年苏南地区生态用地转为非生态用地的面积为45.9059 km<sup>2</sup>,其中,水域转为非生态用地27.9222 km<sup>2</sup>,占总转出为非生态用地的60.82%;其次为林地,共有15.6970 km<sup>2</sup>林地转为非生态用地,占总转出为非生态用地的34.20%;草地转为非生态用地的总面积为2.2867 km<sup>2</sup>,占总转出为非生态用地的4.98%。2000—2020年苏南地区其他用地类型转为生态用地的面积共计70.1542 km<sup>2</sup>,其中有64.8241 km<sup>2</sup>耕地和5.1043 km<sup>2</sup>建设用地转化为生态用地。非生态用地转为水域的面积

为61.1809 km<sup>2</sup>,占非生态用地转入的87.20%;转为林地的面积为7.2309 km<sup>2</sup>,占非生态用地转入的10.31%;转为草地的面积为1.7424 km<sup>2</sup>。

从苏南地区生态用地减少的结果进行分析,主要去向为建设用地和耕地。由于城镇快速扩张导致人口向城镇集聚,城镇人口密度不断增加,对建设用地的需求进一步增强,城镇周边的林地、水域等生态用地开发为建设用地。同时,由于土地用途管制和耕地占补平衡等耕地保护的政策,以及城乡建设用地增减挂钩政策的实施,部分适宜复垦、开发为耕地的农村建设用地、林地、水域等转为耕地;也有少量的耕地由于退耕还湖、生态修复等政策影响转为生态用地,由此可见在建设用地需求不断上升、耕地保护政策以及生态保护政策实施等因素作用下,形成了生态用地的复杂变化结果。

(2)空间变化特征

通过将2000年、2020年苏南地区土地利用数据进行空间叠加分析可知(图4),2000—2020年间,苏南地区的各行政区域均出现了不同程度的生态用地与非生态用地相互转换的现象。生态用地转出规模较大的区域主要为苏州吴中区、吴江区、苏州工业园区、昆山市、常熟市,无锡宜兴市,镇江句容市,南京江宁区等地;而苏州姑苏区,常州钟楼区,南京秦淮区,镇江新区以及扬中市等地的生态用地转出规模相对较低,生态用地转出以生态用地转为建设用地和耕地为主。在城镇化、工业化的过程中

表3 2000—2020年苏南土地利用数量变化

Table 3 Quantitative changes in land use in southern Jiangsu Province, 2000-2020

| 土地利用类型 | 面积变化/km <sup>2</sup> | 土地利用动态度/% | 年均扩张强度指数/% | 扩张综合指数/% |
|--------|----------------------|-----------|------------|----------|
| 耕地     | -418.3332            | -1.10     | 0.60       | 0.88     |
| 林地     | -8.8752              | -0.23     | 0.02       | 0.16     |
| 草地     | 5.4245               | 1.47      | 0.01       | 1.04     |
| 水域     | 27.6990              | 0.20      | 0.04       | 0.14     |
| 建设用地   | 387.3619             | 4.24      | 0.55       | 3.02     |
| 未利用地   | 6.7230               | 22.38     | 0.01       | 15.82    |

表4 2000—2020年苏南地区土地利用类型转移矩阵(km<sup>2</sup>)

Table 4 Land use type transfer matrix in southern Jiangsu Province, 2000-2020 (km<sup>2</sup>)

| 2000年        | 2020年     |          |         |          |          |        | 总计        | 2000—2020年减少 | 转为非生态用地 |
|--------------|-----------|----------|---------|----------|----------|--------|-----------|--------------|---------|
|              | 耕地        | 林地       | 草地      | 水域       | 建设用地     | 未利用地   |           |              |         |
| 耕地           | 1378.9319 | 5.7683   | 1.6797  | 57.3761  | 378.9919 | 2.0151 | 1824.7630 | 445.8311     | —       |
| 林地           | 1.8617    | 203.3260 | 0.0140  | 0.7971   | 10.4288  | 3.4065 | 219.8341  | 16.5081      | 15.6970 |
| 草地           | 0.5907    | 0.1554   | 13.4905 | 0.9747   | 1.5654   | 0.1306 | 16.9073   | 3.4168       | 2.2867  |
| 水域           | 8.5526    | 0.2466   | 7.0849  | 577.6046 | 19.0958  | 0.2738 | 612.8583  | 35.2537      | 27.9222 |
| 建设用地         | 16.4867   | 1.3216   | 0.0621  | 3.7206   | 412.3748 | 1.2538 | 435.2196  | 22.8448      | —       |
| 未利用地         | 0.0062    | 0.1410   | 0.0006  | 0.0842   | 0.1248   | 1.0815 | 1.4383    | 0.3568       | —       |
| 总计           | 1406.4298 | 210.9589 | 22.3318 | 640.5573 | 822.5815 | 8.1613 | 3111.0206 | —            | 45.9059 |
| 2000—2020年增加 | 27.4979   | 7.6329   | 8.8413  | 62.9527  | 410.2067 | 7.0798 | —         | —            | —       |
| 转为生态用地       | —         | 7.2309   | 1.7424  | 61.1809  | —        | —      | 70.1542   | —            | —       |

2023年8月

a. 生态用地转出



b. 生态用地转入



图4 2000—2020年苏南地区生态用地空间变化

Figure 4 Changes of ecological land in southern Jiangsu Province, 2000–2020

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号标准地图制作,底图未做修改。

城镇扩张迅速,城镇周边部分林地与水域转变为建设用地,同时在耕地占补平衡制度的作用下,将部分宜耕性较高的生态用地复垦为耕地,以完成耕地补充任务。在此过程中,生态用地转出致使生态用地逐步萎缩,规模下降、破碎化加剧。2000—2020年间,生态用地转入数量较大的区域集中在南京高淳区、江宁区、六合区,苏州吴江区、吴中区、昆山市、常熟市,常州金坛区、溧阳市,无锡宜兴市等地;南京建邺区、秦淮区、鼓楼区,镇江京口区、镇江新

区,无锡新吴区,苏州姑苏区等地生态用地转入规模相对较低,生态用地转入主要为林地、湿地的恢复带来的生态用地数量增加。生态用地的补充能够有效提升生态用地的连片性,促进生态系统更好地发挥各种生态系统服务功能。

#### 4.1.2 生态用地综合破碎度时空变化

通过对苏南地区2000—2020年生态用地综合破碎度时空变化进行分析,以行政边界提取网格的生态用地综合破碎度得到各行政区的生态用地综

合破碎化水平。2000年苏南地区生态用地综合破碎度为0.23~0.42,整体破碎化程度最低;2005年、2010年、2015年、2020年综合破碎度为0.31~0.47,生态用地破碎化水平整体增加,部分地区破碎化加剧明显。由图5可知,2000年南京雨花区、建邺区、江宁区、玄武区、栖霞区、溧水区、镇江句容市、常州溧阳市等地生态用地破碎度相对较高;苏州吴中区、姑苏区、太仓市、张家港市、无锡滨湖区等地生态用地破碎度相对较低。2005年南京江宁区、雨花台区、六合区、浦口区、镇江京口区、常州天宁区、溧

阳市、无锡梁溪区、锡山区、苏州相城区、吴江区等地区的生态用地破碎度水平增加明显。2010—2015年苏南各行政区生态用地破碎度变化较小,南京市六合区、江宁区、镇江京口区、溧阳市、无锡惠山区、锡山区、苏州相城区、吴江区、昆山市等地的生态用地破碎度处于相对较高的水平,且较2005年有所增加;而随着非生态用地转入为生态用地的作用下,南京建邺区、玄武区、秦淮区、镇江润州区、常州钟楼区、无锡梁溪区、苏州虎丘区和姑苏区等地出现了生态用地破碎化水平下降的趋势。2020年

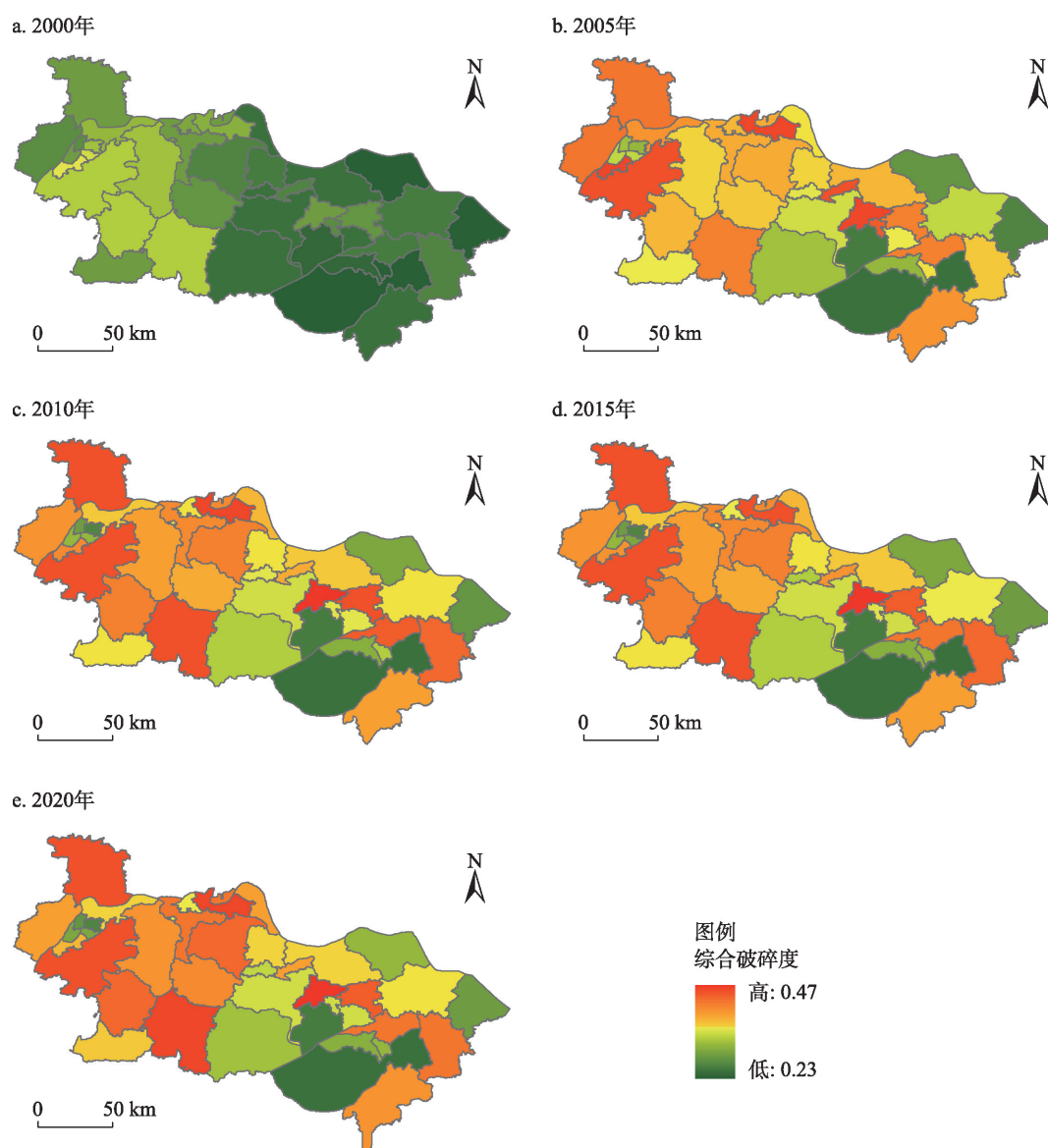


图5 2000—2020年苏南地区生态用地综合破碎度格局

Figure 5 Fragmentation pattern of ecological land in southern Jiangsu Province, 2000–2020

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号标准地图制作,底图未做修改。

2023年8月

南京溧水区,常州金坛区、溧阳市,镇江句容市,苏州张家港市等地的生态用地破碎度仍呈现上升趋势;但是,南京建邺区、雨花区、鼓楼区、浦口区,无锡宜兴市,苏州昆山市等地的生态用地破碎化呈现改善趋势。

#### 4.2 生态用地破碎度对建设用地扩张的响应

在双向固定效应基准回归的基础上,对模型进行了异方差检验、截面相关检验和序列相关检验,检验结果显示存在异方差与截面相关,故使用Driscoll-Kraay标准误处理异方差与截面相关,最终回归结果如表5所示。

表5结果显示,核心变量建设用地面积的一次项及其二次项系数均通过显著性检验( $P<0.01$ ),且一次项系数为正,二次项系数为负,本文建设用地面积取值范围为每 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 网格范围内 $0\sim 25\text{ km}^2$ ,拐点约为每 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 范围内建设用地面积 $7.8\text{ km}^2$ ,拐点处于建设用地面积取值范围内,即随着时间和空间变化,建设用地面积与生态用地综合破碎度存在倒U型关系,符合环境库兹涅茨曲线特

征(图6)。从各区县来看,南京市区,镇江市区,无锡市区,苏州市区、昆山市等市建成区核心地带建设用地面积已过拐点(图7),这些区域生态用地综合破碎度将随建设用地面积的增加呈下降趋势;从各市建成区核心地带向外推移,随着时间和空间的变化,建设用地面积与生态用地破碎度的关系尚未越过拐点,随着建设用地规模的增加,生态用地破碎度的响应仍表现为上升的势态。

苏南地区城镇化初始阶段,建设用地利用较为粗放,地方政府希望通过建设用地的投入换取社会经济与城镇化快速发展,大量林地、水域、草地等生态用地被建设占用,建成区扩张的过程导致生态用地破碎化严重。2000—2010年间生态用地破碎度增加较大的区域主要集中于苏州、无锡、常州市域范围内长江沿线,太湖、太湖等流域,以及宁镇山脉周边生态用地较为丰富、社会经济基础较好的行政单元内,这些区域期望通过增加建设用地投入以获得城镇化和经济发展水平的进一步提升,建设用地扩张在时空上表现出一定的优先性,大量住宅、商

表5 生态用地破碎度对建设用地扩张响应模型的回归结果

Table 5 Regression results of the effect of construction land on ecological land fragmentation

| 变量                       | 系数         | 标准误       | <i>t</i> 值 | <i>P</i> 值 |
|--------------------------|------------|-----------|------------|------------|
| <i>jsyd</i>              | 0.0150***  | 0.0013    | 11.40      | 0.000      |
| <i>jsyd</i> <sup>2</sup> | -0.0010*** | 0.0001    | -18.74     | 0.000      |
| <i>gd</i>                | -0.0060*** | 0.0011    | -5.48      | 0.005      |
| <i>gdp</i>               | 0.0004     | 0.0002    | 1.72       | 0.161      |
| <i>rp</i>                | 0.0009     | 0.0006    | 1.47       | 0.215      |
| <i>gbr</i>               | 0.0009     | 0.0009    | 0.96       | 0.389      |
| <i>iav</i>               | 0.0003     | 0.0002    | 1.06       | 0.349      |
| <i>ti</i>                | -0.0012    | 0.0006    | -1.97      | 0.120      |
| <i>fai</i>               | 0.0000     | 0.0000    | 0.74       | 0.498      |
| <i>js</i>                | -0.0000    | 0.0000    | -0.16      | 0.879      |
| <i>qw</i>                | -0.0011    | 0.0014    | -0.86      | 0.436      |
| <i>rz</i>                | -0.0000    | 0.0000    | -0.27      | 0.799      |
| <i>year</i>              |            |           |            |            |
| 2005                     | 0.0741***  | 0.0032    | 23.29      | 0.000      |
| 2010                     | 0.0679***  | 0.0050    | 13.51      | 0.000      |
| 2015                     | 0.0649***  | 0.0115    | 5.64       | 0.005      |
| 2020                     | 0.0683***  | 0.0081    | 8.46       | 0.001      |
| 常数项                      | 0.4068***  | 0.0220    | 18.48      | 0.000      |
| <i>F</i> 检验              |            | 522.47*** |            |            |
| <i>R</i> <sup>2</sup>    |            | 0.5438    |            |            |

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示变量回归系数在1%、5%、10%水平下通过显著性检验。

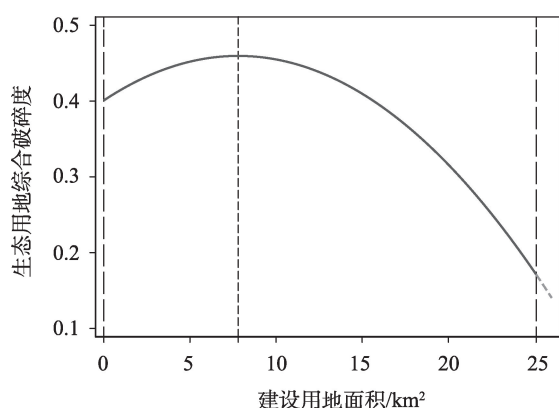


图6 建设用地面积与生态用地破碎度的倒U型关系图

Figure 6 The inverted U-shaped relationship between construction land and ecological land fragmentation

业和基础设施的落地导致这些区域范围内原本连片性较好的生态用地由于建设用地扩张,优先被蚕食、割裂,从而出现生态用地破碎化加剧的时空响应结果。

2010—2020年间,面对建设用地扩张,生态用地破碎化明显好转,苏州、无锡、常州市域范围内的部分行政单元生态用地破碎度出现下降趋势,主要因为苏南地区在过去20年快速城镇化的发展背景

下,建设用地总量已经达到或者接近规划确定的临界水平,建设用地不再继续快速扩张,土地利用方式也以控制增量、挖掘存量的方式有序提升利用效率,实现建设用地的精明增长,生态用地破碎化对建设用地扩张的负向响应也在逐渐缓解。同时,随着生态文明建设和绿色发展理念贯彻落实,人民群众对“绿色”需求的日益增长,苏南地区逐渐朝着生态优先、以人为本的发展方式转变,长江沿线、太湖等重要水体周边划定了一系列生态保护红线,红线范围内不能继续实施耕地占补平衡项目,加之退耕还湖、还湿等政策逐步实施,生态用地得到有效补充,生态用地斑块逐渐扩张,连片性不断增强,生态保护成效显著,面对建设用地扩张,生态用地破碎度呈现下降的时空响应结果,从而形成了库兹涅茨曲线的关系。此外,表5的回归结果显示,在其他条件不变的情况下,生态用地破碎度对耕地面积的增加呈现负向响应,即耕地面积的增加将促进生态用地破碎化程度的下降,这也从侧面反映了生态文明理念的进一步贯彻落实,使得耕地保护和生态用地保护协同推进。

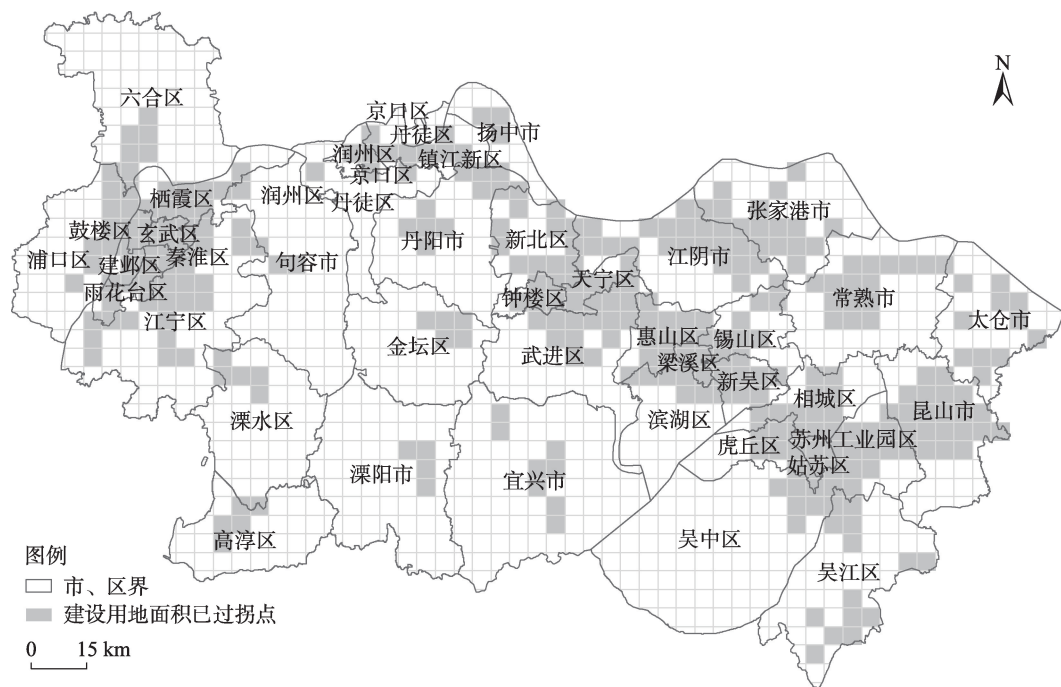


图7 2020年苏南地区已过拐点建设用地面积的空间分布图

Figure 7 Spatial distribution of construction land passed the inflection point in southern Jiangsu Province, 2020

注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)1873号标准地图制作,底图未做修改。

2023年8月

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

(1) 2000—2020年苏南地区生态用地增加24.2483 km<sup>2</sup>,其中,林地面积持续减少,草地面积先减少后增加,水域面积呈现先增加后减少的状态。水域、林地、耕地、草地变化速度逐渐增加;生态用地转出去向主要为建设用地和耕地,转入来源主要为耕地和少量建设用地。生态用地的转入和转出使得苏南地区各行政区的生态用地破碎度呈现动态变化。

(2) 2000—2020年生态用地破碎化程度整体先增加后下降,长江、太湖、固城湖、溧湖等大型水体周边区域生态用地破碎化程度相对较高。2000—2010年间苏南地区长江沿线,固城湖、溧湖、太湖等大型水体以及宁镇山脉周边生态用地较为丰富,社会经济基础较好的区域因城镇化、工业化带来的建设用地扩张,从而出现生态用地破碎化加剧的时空响应结果。2010—2020年间,随着生态文明建设和绿色发展理念贯彻落实、发展方式的转变以及生态修复工作的推进,面对建设用地扩张,生态用地破碎度呈现下降的时空响应结果,苏南地区生态用地破碎化水平总体得到控制,南京市辖区,宜兴市,昆山市等地的生态用地破碎化呈现改善趋势。

(3) 建设用地规模与生态用地破碎度存在倒U型EKC关系,随着建设用地面积增加,生态用地破碎度先增加后减少,拐点位于每5 km×5 km范围内建设用地面积为7.8 km<sup>2</sup>的水平,在达到拐点前生态用地破碎度表现为上升态势,但之后将出现下降趋势,2020年苏南多数城市的城区已到达拐点。此外,耕地面积的增加有利于缓解生态用地的破碎化,表明耕地保护和生态恢复呈现良性互动。

### 5.2 讨论

(1) 本文以江苏省南部地区为例,根据前人研究成果<sup>[5]</sup>,将林地、草地、水域3类用地认定为生态用地,通过采用面板数据模型从时间和空间两个维度考察生态用地破碎度对建设用地扩张的响应。研究发现,2000—2020年间苏南地区生态用地规模总体呈现上升趋势,在城镇化快速发展的初始阶段,大量住宅、商业和基础设施的落地使得建设用地快速扩张,加剧了生态用地破碎化,该结果与王蓉等<sup>[28]</sup>

针对重庆地区开展的景观破碎化研究结论相符;随着绿色发展理念的落实、土地利用方式的转变,面对建设用地扩张,生态用地破碎度呈现下降趋势,付刚等<sup>[15]</sup>、焦利民等<sup>[20]</sup>分别针对北京与武汉开展的研究也得到了林地破碎度呈现先增加后下降的结果。立足前人研究成果,本文基于环境库兹涅茨曲线假说,从理论和实践方面考察了快速城镇化地区生态用地破碎度对建设用地扩张的响应过程。基于生态用地破碎度对建设用地扩张的时空响应特征,为了更好地促进苏南地区实现绿色高质量发展,保障生态建设的有序性、高效性推进,应在经济发展水平较高、建设用地扩张需求旺盛的区域探索生态用地占补平衡,将不适宜开发为优质耕地的未利用地、不宜提质增效的低效或废弃建设用地作为生态用地占补平衡的后备资源,通过占补平衡控制生态用地破碎化的加剧;其次,借助景观生态、恢复生态、林业工程等方面的前沿科技力量,优先作好生态规划,从生态系统整体结构和功能优化的角度,提升区域生态用地数量与质量,实现生态用地破碎化的治理,确保在高速发展状态下,区域生态功能不降低、面积不减少,生物多样性得到有效保护。

(2) 根据研究结果,建设用地扩张与生态用地破碎度存在的倒U型关系,应根据生态用地破碎度对建设用地扩张响应的时空特征,积极制定建设土地利用过程中的生态空间保护措施,立足资源禀赋和环境承载能力,以资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价为基础,加快构建生态功能保障基线、环境质量安全底线、自然资源利用上限,优先对区域生态功能起到较大影响的生态基础设施进行保护,将其作为城镇建设发展不可突破的约束性条件,避免城镇空间发展过程中生态用地破碎度的加剧<sup>[16]</sup>;其次,通过建立城镇建设过程中的生态用地保护动态监测,适时评估建设用地扩张对生态用地的影响,并基于该影响制定应对措施,促进建设用地与生态用地的布局协调性,实现“精明增长”与绿色发展协同共进<sup>[27]</sup>。此外,本文还得到了耕地面积的增加将会对生态用地破碎度产生负向影响的结果,可以在本文的基础上进一步探索耕地保护和生态保护协同过程和作用机制,最终服务高质量实现区

域的生态安全、粮食安全与国土安全。

(3) 本文开展过程中, 为了实现数据的一致性, 以 2000—2020 年 30 m 分辨率的 Landsat TM/ETM 和 Landsat 8 OLI 遥感影像作为基础数据, 虽然解译精度能够满足研究需要、达到预期研究目标, 但是对于城市内部规模较小的林地、草地以及广泛分布于农村地区具有生态功能的沟渠仍难以准确识别与提取。随着后续数据获取渠道的扩展, 需要通过收集更高精度的影像数据提取生态用地, 开展针对性研究以进一步提升研究结论的可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] 乔伟峰, 吴菊, 戈大专, 等. 快速城市化地区土地利用规划管控建设用地扩张成效评估: 以南京市为例[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2666–2680. [Qiao W F, Wu J, Ge D Z, et al. Evaluating the controlling effectiveness of land-use planning on construction land expansion under the rapid urbanization: A case study of Nanjing City[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2666–2680.]
- [2] Cai Z Y, Liu Q, Cao S X. Real estate supports rapid development of China's urbanization[J]. Land Use Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104582.
- [3] 郑涛, 陈爽, 张童, 等. 基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究[J]. 自然资源学报, 2020, 35(12): 2980–2994. [Zheng T, Chen S, Zhang T, et al. Research on driving mechanism of ecological land loss based on Bayesian network[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(12): 2980–2994.]
- [4] 李彤, 贾宝全, 刘文瑞, 等. 京津冀地区生态用地稳定性格局及其影响因素分析[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 9927–9944. [Li T, Jia B Q, Liu W R, et al. Spatial pattern of ecological land stability analysis and influencing factor in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 9927–9944.]
- [5] 高吉喜, 刘晓曼, 王超, 等. 中国重要生态空间生态用地变化与保护成效评估[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1708–1721. [Gao J X, Liu X M, Wang C, et al. Evaluating changes in ecological land and effect of protecting important ecological spaces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1708–1721.]
- [6] 苏伟忠, 杨桂山, 甄峰. 长江三角洲生态用地破碎度及其城市化关联[J]. 地理学报, 2007, 62(12): 1309–1317. [Su W Z, Yang G S, Zhen F. Ecological land fragmentation and its connectivity with urbanization in the Yangtze River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(12): 1309–1317.]
- [7] Li L, Gou M M, Wang N, et al. Do ecological restoration programs reduce forest fragmentation? Case study of the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Ecological Engineering, 2021, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106410.
- [8] Cuervo J, Moller A P. Demographic, ecological, and life-history traits associated with bird population response to landscape fragmentation in Europe[J]. Landscape Ecology, 2020, 35(2): 469–481.
- [9] 张金茜, 柳冬青, 巩杰, 等. 流域景观破碎化对土壤保持服务的影响研究: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1866–1877. [Zhang J Q, Liu D Q, Gong J, et al. Impact of landscape fragmentation on watershed soil conservation service: A case study on Bailongjiang Watershed of Gansu[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1866–1877.]
- [10] 马彩虹, 安斯文, 滑雨琪, 等. 宁夏沿黄经济带生态用地格局演变及其驱动机制[J]. 经济地理, 2022, 42(6): 179–187. [Ma C H, An S W, Hua Y Q, et al. Evolution and driving mechanism of ecological land use along the Yellow Economic Belt in Ningxia[J]. Economic Geography, 2022, 42(6): 179–187.]
- [11] 孔雪松, 陈俊励, 王静, 等. 耦合土地利用格局与过程变化的生态干扰评价: 以长三角地区为例[J]. 地理科学, 2021, 41(11): 2031–2041. [Kong X S, Chen J L, Wang J, et al. Evaluation of ecological disturbance coupling land use pattern and process change: Taking the Yangtze River Delta as an example[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(11): 2031–2041.]
- [12] 邵大伟, 吴殿鸣. 景观破碎化对生态系统服务价值的影响作用分析: 以苏州为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(11): 2436–2449. [Shao D W, Wu D M. Analysis on the effect of landscape fragmentation on ecosystem service value: A case study of Suzhou[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(11): 2436–2449.]
- [13] 付扬军, 师学义, 和娟. 汾河流域景观破碎化时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1606–1619. [Fu Y J, Shi X Y, He J. The spatio-temporal evolution characteristics of landscape fragmentation in Fenhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1606–1619.]
- [14] 梁加乐, 陈万旭, 李江凤, 等. 黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1993–2009. [Liang J L, Chen W X, Li J F, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1993–2009.]
- [15] 尹娟, 资本飞, 阳利永, 等. 抚仙湖流域生态用地时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 228–235. [Yin J, Zi B F, Yang L Y, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of ecological land use in Fuxian Lake Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 228–235.]
- [16] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 等. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2551–2562. [Fu G, Xiao N W, Qiao M P, et al. Spatial-temporal changes of landscape fragmentation patterns in Beijing in the last two decades[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2551–2562.]
- [17] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 大城市边缘区景观破碎化空间异质

2023年8月

- 性:以北京市顺义区为例[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5363–5374. [Li C, Zhang F R, Zhu T F, et al. Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area: A case study in Shunyi District of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5363–5374.]
- [18] 焦利民, 肖丰涛, 许刚, 等. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应[J]. 资源科学, 2015, 37(8): 1650–1660. [Jiao L M, Xiao F T, Xu G, et al. Spatial-temporal response of green land fragmentation patterns to urban expansion in Wuhan Metropolitan Area[J]. Resources Science, 2015, 37(8): 1650–1660.]
- [20] 杨智奇, 董金玮, 徐新良, 等. 黄土高原森林破碎化的基本特征与时空格局演变[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1246–1255. [Yang Z Q, Dong J W, Xu X L, et al. Spatiotemporal pattern of forest fragmentation in the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1246–1255.]
- [19] 杨星晨, 雷少刚, 徐军, 等. 道路对草原景观破碎化的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 149–156. [Yang X C, Lei S G, Xu J, et al. Influence of roads on the fragmentation of grassland landscape[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 149–156.]
- [21] 高跃鹏, 张学霞, 方宇, 等. 若尔盖县景观破碎化及湿地恢复优先性[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(12): 145–158. [Gao Y P, Zhang X X, Fang Y, et al. Landscape fragmentation and wetland restoration priority in Zoige County of Sichuan Province of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(12): 145–158.]
- [22] 夏阳, 方朝阳, 黄琪, 等. 四个时期江西省湿地动态及其影响因素研究[J]. 湿地科学, 2022, 20(3): 348–356. [Xia Y, Fang C Y, Huang Q, et al. Dynamic of wetlands in Jiangxi Province for 4 periods and their influence factors[J]. Wetland Science, 2022, 20(3): 348–356.]
- [23] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1370–1378. [Zhang J X, Gong J, Liu D Q, et al. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on GeoDetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1370–1378.]
- [24] 曹晨晨, 苏芳莉, 李海福, 等. 辽河口盐碱滩湿地景观破碎化及驱动机制[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 581–589. [Cao C C, Su F L, Li H F, et al. Landscape fragmentation and driving mechanism of *Suaeda salsa* wetland in Liaohe Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 581–589.]
- [25] 虞文娟, 任田, 周伟奇, 等. 区域城市扩张对森林景观破碎化的影响: 以粤港澳大湾区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8474–8481. [Yu W J, Ren T, Zhou W Q, et al. Forest fragmentation and its relationship with urban expansion in Guangdong–Hong Kong–Macao Great Bay Area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8474–8481.]
- [26] 王雪微, 于立, 王士君, 等. 基于建设用地扩张的皖江地区生态用地格局演化与优化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 120–132. [Wang X W, Yu L, Wang S J, et al. Evolution and optimization of ecological land pattern in the Wanjiang area based on expansion of construction land[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 120–132.]
- [27] 史芳宁, 刘世梁, 安毅, 等. 城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究: 以昆明市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3303–3314. [Shi F N, Liu S L, An Y, et al. Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: A case study of Kunming City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3303–3314.]
- [28] 王蓉, 周宝同, 甘雪坤. 西南山地景观破碎化与城镇化及社会发展水平的关系研究: 以重庆市渝北区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 624–631. [Wang R, Zhou B T, Gan X K. Relationships between spatial pattern of landscape fragmentation and urbanization and socio-economic developmental level in Southwest Mountainous Region: A case study of Yubei District in Chongqing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(3): 624–631.]
- [29] 刘鹏飞, 孙斌栋. 中国城市生产、生活、生态空间质量水平格局与相关因素分析[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 13–24. [Liu P F, Sun B D. The spatial pattern of urban production–living–ecological space quality and its related factors in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 13–24.]
- [30] 李小龙, 王树声, 王良. 从建设用地结构演变看城市职能的变迁: 以陕西澄城县城为例[J]. 现代城市研究, 2016, (10): 53–60. [Li X L, Wang S S, Wang L. Research on the transition of urban functions from the evolution of construction land structure: A case study of Chengcheng County in Shaanxi Province[J]. Modern Urban Research, 2016, (10): 53–60.]
- [31] Torras M, Boyce J K. Income, inequality, and pollution: A reassessment of the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 1998, 25(2): 147–160.
- [32] 高广阔, 张腾化, 马海娟. 新型城市碳排放环境库兹涅茨曲线检验: 基于中国城市面板数据分析[J]. 经济与管理评论, 2015, 31(4): 5–10. [Gao G K, Zhang T H, Ma H J. The testing of Environment Kuznets curve for carbon emissions of new cities: Based on the panel data analysis of cities in China[J]. Review of Economy and Management, 2015, 31(4): 5–10.]
- [33] 赖晓瑾, 唐一丁, 祝树金. 各国参与全球价值链的环境库兹涅茨效应: 基于跨国面板数据[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1630–1644. [Lai X J, Tang Y D, Zhu S J. Environmental Kuznets effect of countries' participation in global value chains: Based on multinational panel data[J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1630–1644.]

- [34] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593–606. [Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource–environmental pressure[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 593–606.]
- [35] 王树文, 王京诚. 城市生活垃圾与经济增长的非线性关系: 基于环境库兹涅茨曲线的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 63–70. [Wang S W, Wang J C. Nonlinear relationship between municipal solid waste and economic growth: Empirical analysis based on environmental Kuznets curve[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(2): 63–70.]
- [36] 范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 等. 江苏省土地利用功能变化及其空间格局特征[J]. 地理研究, 2019, 38(2): 383–398. [Fan Y T, Jin X B, Xiang X M, et al. Land use functions change and its spatial pattern in Jiangsu Province from 2000 to 2015[J]. Geographical Research, 2019, 38(2): 383–398.]
- [37] 王雅琳, 牛明爽, 宋波. 生境维持服务供给量与需求量研究: 以京津冀地区为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 381–389. [Wang Y L, Niu M S, Song B. Research on supply and demand of habitat maintenance services: A case study of Beijing–Tianjin–Hebei Region[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(2): 381–389.]
- [38] 陈丹玲, 胡文伯, 卢新海, 等. 城市新增建设用地扩张影响机制: 基于PSR框架的组态分析[J]. 中国土地科学, 2022, 36(7): 85–93. [Chen D L, Hu W B, Lu X H, et al. Exploring the influencing mechanism of newly-added urban construction land expansion: A configuration analysis based on PSR framework[J]. China Land Science, 2022, 36(7): 85–93.]
- [39] 王雅竹, 段学军, 杨清可, 等. 近30年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1531–1540. [Wang Y Z, Duan X J, Yang Q K, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of urban construction land in Jiangsu Province in the last 30 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1531–1540.]
- [40] 燕守广, 李辉, 李海东, 等. 基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法: 以南京市为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1109–1118. [Yan S G, Li H, Li H D, et al. Ecosystem health assessment method of eco–redline based on land use and landscape pattern in Nanjing[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(5): 1109–1118.]
- [41] 曾晨, 程轶皎, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区: 以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3118–3135. [Zeng C, Cheng Y J, Lv T Y. Research on land–space ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(12): 3118–3135.]
- [42] 潘方杰, 万庆, 曾菊新, 等. 城镇化进程中湖北省“生产–生活–生态”空间冲突演化及其影响因素[J]. 经济地理, 2023, 43(2): 80–92. [Pan F J, Wang Q, Zeng J X, et al. Evolution characteristics and influence factors of spatial conflicts between Production–Living–Ecological Space in the rapid urbanization process of Hubei Province, China[J]. Economic Geography, 2023, 43(2): 80–92.]
- [43] 张泉, 邹军, 王沅. 江苏区域性规划的实践、探索与反思[J]. 城市规划, 2019, 43(9): 24–28. [Zhang Q, Zou J, Wang F. Practice, exploration, and reflections of regional planning in Jiangsu[J]. City Planning Review, 2019, 43(9): 24–28.]
- [44] 张梦贤, 周勇, 曹隽隽, 等. 2000–2015年武汉市生态用地时空变化分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 168–177. [Zhang M X, Zhou Y, Cao J J, et al. Analysis of spatial and temporal changes of ecological land use in Wuhan City from 2000 to 2015[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 168–177.]
- [45] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353–378.

# Spatiotemporal evolution of ecological land fragmentation and its response to construction land expansion in southern Jiangsu Province:

## An environmental Kuznets curve perspective

WEN Bo<sup>1</sup>, XU Cong<sup>2</sup>, MENG Lin<sup>3</sup>, ZOU Wei<sup>2</sup>, XIA Min<sup>2</sup>

(1. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. College of Public Administration, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** [Objective] Ecological land fragmentation has a serious impact on the structural integrity and function of the ecosystem. The conflict between construction land expansion and ecological land fragmentation is one of the problems that need to be solved in the process of implementing the development and protection strategy for harmonious coexistence between humans and nature. [Methods] In this study, based on the analysis of temporal and spatial changes in ecological land, a comprehensive indicator system of fragmentation degree was established for the southern Jiangsu Province region to explore the temporal and spatial characteristics of ecological land fragmentation degree. Based on the theory of the environmental Kuznets curve (EKC), the response of ecological land fragmentation degree to construction land expansion was investigated. [Results] (1) From 2000 to 2020, the ecological land in southern Jiangsu Province was mainly converted into construction land, followed by cultivated land. A certain amount of cultivated land and a small amount of construction land were converted into ecological land; (2) The degree of ecological land fragmentation increased first and then decreased. Along the Yangtze River and in the surrounding areas of key water bodies such as the Taihu Lake, the Gucheng Lake, and the Gehu Lake, there was a remarkable increase in the degree of fragmentation; (3) There is an inverted U-shaped relationship between the scale of construction land and the fragmentation of ecological land. With the increase of the area of construction land, the degree of fragmentation of ecological land increases first and then decreases. [Conclusion] The spatiotemporal response of ecological land fragmentation to construction land expansion is consistent with the EKC theory, and most urban centers in southern Jiangsu Province have reached the inflection point by 2020. By exploring the balance between ecological land occupation and compensation, conducting ecological planning in advance, building ecological barriers, timely assessing the impact of construction land expansion on ecological land, and formulating response measures, the layout coordination of construction land and ecological land will be improved, and the coordinated progress of “smart growth” and green development can be realized.

**Key words:** ecological land; fragmentation; construction land expansion; environmental Kuznets curve; southern Jiangsu Province