

城市生态韧性与发展水平耦合协调关系研究

——以江苏省为例¹

蒋文鑫，吴 军，徐建刚

(南京大学 建筑与城市规划学院，江苏 南京 210093)

【摘要】：生态与经济耦合协调度是衡量区域发展健康与否的重要标准。从韧性视角出发，借用 PSR 模型，综合选取生态风险指数、景观稳定性指数、生态系统服务价值和恢复力指数对江苏省城市生态韧性进行评价，并运用耦合模型测算了江苏省及其 13 个城市 2000—2020 年间生态韧性与经济发展水平的耦合协调关系，探究其时空变化特征。结果表明：①研究期内，江苏省整体经济发展水平显著提高，生态韧性指数持续降低，但两者的耦合协调度呈现由“基本失调”向“基本协调”发展的特征；②空间分布上，江苏省各城市经济发展水平整体呈现“苏南 > 苏中 > 苏北”的阶梯性，生态韧性呈现出“北高南低、东高西低”的格局，而两者间的耦合协调度呈现从苏南与沿海向苏北与内陆递减的格局。在以生态优先为主导的国土空间规划背景下，可通过严格划定三区三线、积极促进节约集约用地、科学构建生态格局等方式保障生态与经济双赢。

【关键词】：生态韧性；经济发展水平；PSR 模型；耦合协调关系；江苏省

【中图分类号】：TU984 **【文献标志码】：**A

【文章编号】：1005 — 8141(2023) 03 — 0299 — 10

0 引言

自 20 世纪 50—60 年代、80 年代人类社会爆发两次严重的环境危机以来，经济和生态环境协调发展问题日益成为人们关注的焦点^[1]。中国经济在改革开放以后得到了快速发展，但堪称奇迹的快速经济增长与城市化背后是以严重的环境污染与资源浪费为代价的，如此粗放的发展模式并不可持续。继中共十八大明确提出大力推进生态文明建设之后，中共十九大进一步明确了生态文明体制改革的要求和生态文明建设的时代新路径^[2]。由此可见，生态与经济双赢已经成为当下高质量发展的时代需求，而生态与经济系统协调度的高低也成为了衡量区域发展健康与否的重要标准^[3]。目前国外关于生态与经济关系的探讨主要从投入产出模型^[4]、环境库兹涅兹曲线^[5]及生态经济学等视角展开，而中国关于生态与经济关系的研究起步于上世纪 80 年代，在研究尺度上包括宏观区域尺度^[6,7]、中观城市尺度^[8,9]和典型生态区^[10]。当下关于生态与经济关系的研究方法主要涉及生态足迹法、耦合度模型、灰色 GM(1, 1) 模型、引力模型等^[11]。

¹ **【收稿日期】：**2022 — 08 — 20；**【修订日期】：**2022 — 10 — 20

【基金项目】：国家自然科学基金项目(编号：52178043) 。

【第一作者简介】：蒋文鑫(1997 —)，男，江苏省扬州人，硕士研究生，研究方向为韧性城市与智慧规划。

【通讯作者简介】：徐建刚(1960 —)，男，江苏省淮安人，教授，博士生导师，研究方向为城市复杂适应系统、城市与区域空间分析技术。

当前学界对于经济发展与生态环境耦合关系的研究已趋于成熟。然而，传统的生态环境评价无法描绘出城市生态系统具有的适应调整能力。Holling 于 1973 年将韧性的概念引入了生态学领域，他认为生态韧性决定了一个生态系统内部的持续性关系，同时也是一种能力度量，并将生态韧性定义为生态系统承受外界干扰以保持原状的能力^[12]。在已有关于生态韧性评价的研究中，有运用统计数据构建指标体系进行评价的^[13]，也有基于土地利用变化进行测度的^[14]，但当前依旧没有统一的范式。同时，经济发展与生态环境的耦合无法体现出生态系统作为城市经济发展的自然支撑，以及其在城市发展过程中不断“抵御—吸收—适应—恢复—学习”的韧性过程^[15]。因此，目前从韧性视角出发对经济发展与生态韧性间关系的探讨依旧较为匮乏。基于此，本文从韧性视角出发，运用 PSR 模型，对 2000—2020 年江苏省城市生态韧性进行评价。同时借助物理学耦合模型，探究江苏省城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系的时空分异特征，从韧性角度为生态与经济协调发展研究进行补充，为提升江苏省整体及各城市绿色生态发展力提供科学依据，为国土空间规划提供科学的生态、经济双赢建议。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省位于长江三角洲地区，包括南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁 13 个地级市(图 1)。2000—2020 年江苏省的地区生产总值从 8582.7 亿元增长到 10.27 万亿元，人均 GDP 自 2009 年起连续稳居全国第一位，是中国经济最活跃的省份之一。与此同时，江苏省以平原为主，河网密布，生态环境良好，自然资源丰富，而快速的经济发展与人类活动也给城市的生态环境带来了巨大的压力。在此背景下，如何提高城市生态韧性，促进经济发展与生态保护的双赢成为江苏省未来必须要面临的挑战。

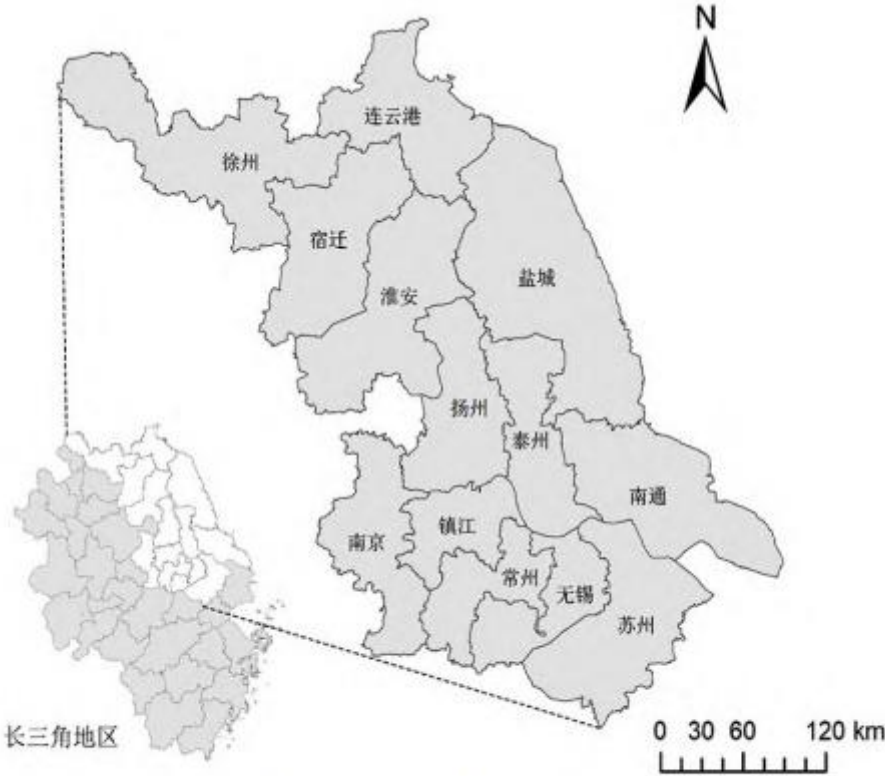


图 1 研究区域位置与范围

Figure 1 Location and range of the study area

1.2 数据来源

研究使用的数据包括江苏省土地利用数据与统计年鉴数据：①土地利用数据。2000 年、2010 年、2020 年江苏省土地利用数据 GlobeLand 30 来源于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(DOI:10.11769),GlobeLand 30 是中国研制的 30m 空间分辨率全球地表覆盖数据。参照《土地利用现状分类》(GB/T21010—2007)标准,结合研究区实际与研究需要,将原土地覆被类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类(图 2)。各期精度都大于 83%,满足分析的精度要求。②统计数据。收集《江苏省统计年鉴(2001)》《江苏省统计年鉴(2011)》《江苏省统计年鉴(2021)》等统计资料,提取其中与经济发展水平相关的数据。

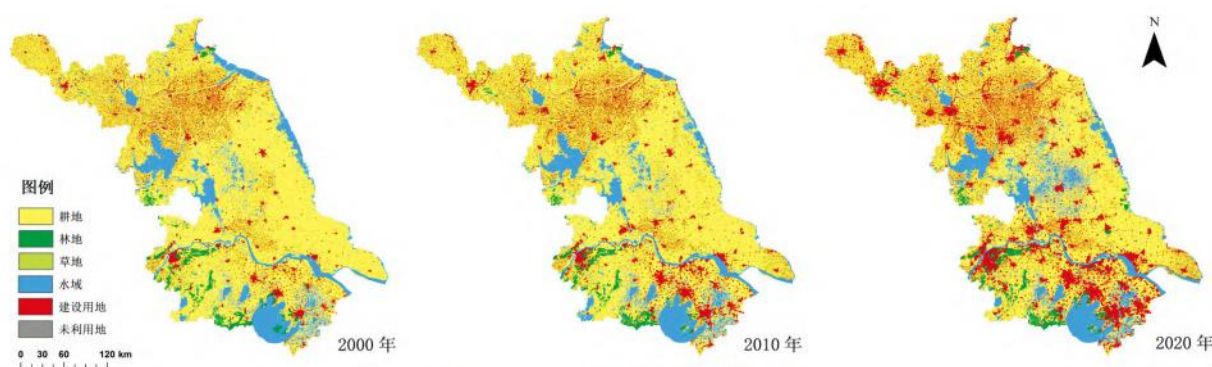


图 2 2000—2020 年江苏省土地利用类型
Figure 2 Land use types in Jiangsu Province,2000 - 2020

2 研究方法

2.1 生态韧性研究小区划分

根据江苏省土地利用情况,采用 3km×3km 的单元网格对生态韧性指数进行空间化,结果共得到 11 871 个生态韧性研究小区。本文对 2000 年、2010 年和 2020 年江苏省土地利用数据进行等间距采样,运用 ArcGIS10.8 软件和 Fragstats4.2 软件计算每个研究小区的生态韧性指数。

2.2 生态韧性评估模型构建

压力—状态—响应(Pressure-State-Response, PSR)模型是联合国环境规划署建立的概念模型,主要应用于世界环境报告,反映的是人类活动、环境和自然资源及机构之间的相互影响关系^[16]。有研究认为,城市生态韧性是压力、状态与响应三者协同的结果^[17]。在发展过程中,城市生态环境遭受到内部与外部的双重压力。在这样的压力下,城市的生态状态可反映成其抵御这些压力的能力,即城市的生态状态越好,其抵御压力的能力就越强。城市生态响应即城市生态系统维持城市发展、提供支撑与化解风险干扰的能力,表现为韧性中的适应恢复过程。因此,本文借鉴 PSR 模型思路,构建城市生态韧性评估模型。

压力指标反应城市生态系统承受胁迫的状况。在发展过程中,城市土地利用格局发生了显著变化,这一变化改变了土地生态系统的结构和功能,对土地生态系统的健康稳定发展造成了一定程度的不利影响,从而增加了生态风险的来源种类及其发生概率和强度^[18]。因此,本文用生态风险指数来对生态韧性的压力指标进行测度。具体公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} ER_i \dots\dots\dots (1)$$

式中：P 为生态韧性压力指数； A_i 为第 i 种土地类型面积；A 为土地总面积；N 为土地利用类型总数； ER_i 为土地类型 i 的生态系统风险强度权重。综合前人研究成果，将生态系统风险强度权重 ER_i 设定为：耕地 0.32、林地 0.12、草地 0.16、水域 0.53、建设用地 0.85、未利用地 0.82^[17]。P 值越小，表示生态韧性压力指标越好。

状态指标表示城市生态系统的当前状况，状态的好坏决定了生态系统在遭受压力时维持稳定能力的高低，本文用景观稳定性作为测度城市生态韧性的状态指标。斑块是景观格局的基本组成单元，其空间分布反映了生态景观空间结构的多样性和复杂性^[19]。研究表明，景观稳定性与斑块密度、蔓延度和总边缘对比度等景观指数密切相关^[20, 21]。计算公式^[22, 23]为：

$$S = \frac{CONTAG}{PD \times TECI} \dots\dots\dots (2)$$

式中：S 为生态韧性状态指数；PD 为斑块密度；TECI 为总边缘对比度指数；CONTAG 为蔓延度指数。因为景观格局指数计算需要研究区有合适的范围，因此本文先以 30km×30km 的方格为状态指标研究单元，计算每个研究单元的生态韧性状态指数，将值赋予研究单元中心点后进行克里金插值，得到江苏省生态韧性状态分布情况。S 值越大，表示景观越稳定，生态韧性状态指标越好。

响应指标表示城市生态系统维持城市发展提供支撑与化解风险干扰的能力，本文用潜力与恢复力对其进行测度。潜力指标用生态系统服务价值来测度，恢复力指标测度引入生态恢复力系数。计算公式为：

$$ESV = \sum_{i=1}^N A_i VC_i \dots\dots\dots (3)$$

$$RES = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} RC_i \dots\dots\dots (4)$$

$$R = \sqrt{ESV \times RES} \dots\dots\dots (5)$$

式中：R 为生态韧性响应指数；ESV 为生态系统服务价值；RES 为生态系统恢复力指数； A_i 为研究区第 i 种土地类型的面积； VC_i 为土地类型 i 单位面积的生态系统服务价值系数。本文参考谢高地等制定的中国生态服务价值当量因子表^[24]，1 个当量因子为 1hm² 耕地粮食产量的经济价值，约为当年江苏省平均粮食单产经济价值的 1/7^[25]。根据江苏省 2001—2021 年的统计年鉴，江苏省粮食单产平均为 6 216.69kg/hm²，粮食单价按国家粮食和物资储备局公布的历年稻谷平均最低收购价 2.21 元/kg 计算，得到江苏省各类用地的单位面积生态服务价值，对结果进行标准化处理。 RC_i 为土地类型 i 的生态恢复力系数，本文参考 Peng 等的研究^[26, 27]，具体系数见表 1。R 值越大，表示生态韧性响应指标越好。

表 1 江苏省生态系统服务价值系数与恢复力系数表

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
--------	----	----	----	----	------	------

生态系统服务价值(元/hm ² ·a)	17 255	51 509	22 005	28 994	0	2 689
生态系统恢复力系数	0.3	0.5	0.8	0.7	0.2	1

本文借鉴 PSR 模型思路, 构建城市生态韧性评估模型, 对生态韧性压力指标和状态指标进行标准化处理后, 构建城市生态韧性模型公式:

$$ER = \sqrt[2]{P \times S \times R} \dots\dots\dots (6)$$

式中: ER 为城市生态韧性指数; ER 值越大, 表示生态韧性越好。

2.3 经济发展水平指标体系构建

参考经济发展水平评价的相关文献^[28,29], 以“经济规模”“经济结构”“经济质量”为经济发展水平评价的一级指标, 选取“地区生产总值”“地区财政收入”“社会消费品零售总额”等 8 项二级指标来构建评价指标体系(表 2), 并用熵权法确定指标权重。具体步骤如下:

指标标准化。为了消除原始数据量纲不一致对研究的影响, 对数据进行标准化处理。

$$\text{正向指标: } r_{ij} = \frac{r'_{ij} - \text{Min}_i(r'_{ij})}{\text{Max}_i(r'_{ij}) - \text{Min}_i(r'_{ij})} \dots\dots (7)$$

$$\text{负向指标: } r_{ij} = \frac{\text{Max}_i(r'_{ij}) - r'_{ij}}{\text{Max}_i(r'_{ij}) - \text{min}_i(r'_{ij})} \dots\dots\dots (8)$$

式中: r_{ij} 为标准化后的指标值; r'_{ij} 为标准化前的数值; $\text{Min}_i(r'_{ij})$ 为第 i 项指标的最小值; $\text{Max}_i(r'_{ij})$ 为第 i 项指标的最大值。

确定指标权重。首先, 确定第 j 个指标的信息熵 H_j :

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \times \ln f_{ij} \dots\dots\dots (9)$$

式中: $f_{ij}=r_{ij}/\sum_{i=1}^m r_{ij}$, $k=1/\ln m$; $f_{ij}=r_{ij}/\sum_{i=1}^m r_{ij}$, $k=1/\ln m$; 当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \times \ln f_{ij}=0$ 。

然后，计算第 j 个指标权重 w_j ：

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \dots\dots\dots (10)$$

式中： H_j 为第 j 个指标的信息熵； r_{ij} 为标准化后的指标值； w_j 为第 j 个指标的权重； m 为评价对象的个数； n 为评价指标的个数。

表 2 城市经济发展水平综合评价指标体系

一级指标	二级指标	单位	属性	权重
经济规模	地区生产总值	亿元	+	0.1858
	地区财政收入	亿元	+	0.1639
	社会消费品零售总额	亿元	+	0.1877
经济结构	第二产业占 GDP 比重	%	+	0.0434
	第三产业占 GDP 比重	%	+	0.0395
经济质量	地区人均生产总值	元	+	0.1217
	城镇居民可支配收入	元	+	0.1232
	农村居民人均纯收入	元	+	0.1348

2.4 耦合协调关系分析

耦合协调的概念来自物理学，指不同系统在自身和外界的作用下产生的相互作用^[30]。本文借用耦合协调度模型，对生态韧性和经济发展水平的耦合关系进行测度，辨析两者之间的耦合协调程度。计算公式为：

$$C = \{ (U_1 \times U_2) / \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right)^2 \}^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

式中： C 为耦合度， $C \in [0, 1]$ 。当 C 趋近于 0 时，说明城市生态韧性与经济发展水平的相互作用越低；当 C 趋近于 1 时，说明城市生态韧性与经济发展水平的相互作用越高。进一步建立耦合协调度模型：

$$D = \sqrt{C \times T} \dots\dots\dots (12)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \dots\dots\dots (13)$$

式中：U1、U2 分别代表城市生态韧性和经济发展水平的综合评价指数；T 为城市生态韧性—经济发展的综合协调指数；D 为耦合协调度； α 、 β 为待定系数，根据相关研究^[31]， α 、 β 可代表两个子系统的相对重要性，结合相关文献^[30]，本文认为城市生态韧性与经济发展水平的重要程度相同，因此将两个值均设置为 0.5。借鉴物理学的划分标准，基于城市生态韧性与经济发展水平之间的相对关系，将城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调情况划分为 4 个等级、12 个小类(表 3)^[32]。

表 3 生态韧性与经济发展水平的耦合协调类型划分

区间	耦合协调度	亚类型	U1 与 U2 相对大小
0≤D≤0.3		严重失调—生态韧性受阻	U2-U1>0.1
	严重失调	严重失调—经济水平受阻	U1-U2>0.1
		严重失调	0≤ U1-U2 ≤0.1
0.3<D≤0.5		基本失调—生态韧性受阻	U2-U1>0.1
	基本失调	基本失调—经济水平受阻	U1-U2>0.1
		基本失调	0≤ U1-U2 ≤0.1
0.5<D≤0.8		基本协调—生态韧性滞后	U2-U1>0.1
	基本协调	基本协调—经济水平滞后	U1-U2>0.1
		基本协调	0≤ U1-U2 ≤0.1
0.8<D≤1		高级协调—生态韧性滞后	U2-U1>0.1
	高级协调	高级协调—经济水平滞后	U1-U2>0.1
		高级协调	0≤ U1-U2 ≤0.1

3 结果及分析

3.1 生态韧性各指标分析

生态韧性压力指标。2000 年、2010 年、2020 年江苏省的整体生态韧性压力指数分别为 0.3972、0.4106、0.4458, 总体呈上升趋势。表明随着经济的发展，城市建设用地挤压生态用地，造成城市生态用地收缩，整体生态风险不断加强，城市生态韧性压力增大。其中，2010—2020 年城市生态韧性压力指数增长速度高于 2000—2010 年，表明城市的快速发展给生态系统带来了巨大的压力，压力提升的速度随发展速度的增加而增加。基于 ArcGIS10.8 软件，利用自然断裂法对 2010 年的生态韧性压力指数进行分类，并以此区间给 2000 年和 2020 年的生态韧性压力指数分类，得到江苏省生态韧性压力指数等级空间分布图(图 3)，并

计算得出各等级研究小区的个数及比例(表 4)。结果显示,2000—2020 年江苏省生态韧性压力指数以较低生态压力等级和中生态压力等级为主,各年占比均在 60%以上。低生态压力区与较低压力区的小区个数在研究期内呈现下降趋势,其中较低生态压力区的下降最显著,占比减少了 17.03%,而中生态压力区、较高生态压力区和高生态压力区的小区个数呈现上升趋势,其中较高生态压力区的增长最显著,占比增加了 8.67%。但研究期内江苏省整体的生态压力处于中等以下等级,城市生态系统依旧对发展压力有一定的化解与支撑作用。空间分布上,江苏省的生态压力呈现“中部低,南北高”的格局。低生态压力区与较低生态压力区景观类型以林地、耕地为主;高等级生态风险景观类型以建设用地为主,可见生态压力等级分布受景观类型影响显著。

表 4 2000—2020 年江苏省生态韧性压力指数等级研究小区 个数及比例

生态韧性压力 指数等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)
低生态压力区	321	2.71	304	2.56	271	2.28
较低生态压力区	5 627	47.40	5 043	42.48	3 605	30.37
中生态压力区	3 781	31.85	3 886	32.74	3 998	33.68
较高生态压力区	1 984	16.71	2 290	19.29	3 013	25.38
高生态压力区	158	1.33	348	2.93	984	8.29

生态韧性状态指标。2000 年、2010 年、2020 年江苏省的整体生态韧性状态指数分别为 0.2282、0.2318、0.2226,总体呈现先缓慢上升再快速下降的趋势。通过对江苏省生态韧性状态指数等级空间分布图(图 4)和各等级研究小区的个数及比例表(表 5)分析可知,研究期内江苏省生态韧性状态指数以中、较低和低生态状态等级为主,各年占比均超过了 80%,说明江苏省的景观稳定性较差。研究期内,高生态状态区的面积减少了 5.75%,低、较低生态状态区的占比降低了 10.46%,说明江苏省的整体生态韧性状态并不是完全恶化的趋势,而是从高低两级向中生态状态等级演进。空间分布上,江苏省生态韧性状态指标呈现出“西低东高”的格局,高生态状态区分布在江苏沿海的盐城、南通等城市,该地区地类边界清晰,类型相对完整,而多种地类交错分布的过渡地带景观稳定性较低,如苏南等城市化水平较高地区。

表 5 2000—2020 年江苏省生态韧性状态指数等级研究小区 个数及比例

生态韧性状态 指数等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)
低生态状态区	3 548	29.89	3 741	31.53	3 990	33.61
较低生态状态区	5 097	42.94	3 859	32.51	3 414	28.76
中生态状态区	1 373	11.57	2 289	19.28	3 248	27.36
较高生态状态区	964	8.12	1 618	13.63	1 012	8.52

高生态状态区	889	7.49	364	3.07	207	1.74
--------	-----	------	-----	------	-----	------

生态韧性响应指标。2000 年、2010 年、2020 年江苏省的整体生态韧性响应指数分别为 0.3374、0.3308、0.3179, 总体呈下降趋势。其中 2010—2020 年的下降速度高于 2000—2010 年，这也与城市经济发展速度存在着密切的关联。通过对图 5 和表 6 的分析可知，研究期内低生态响应区、较低生态响应区的小区个数呈上升趋势，中生态响应区的小区个数呈下降趋势，说明随着江苏省的经济发展，中生态响应区逐渐向较低与低生态响应区转变，而较高与高生态响应区的占比整体较为稳定，3 个时期两者占比都在 19%—20%区间内。究其原因，江苏省位于平原地区，研究期内发展用地充足，在城市化的过程中没有占用高生态响应区的用地，长江、太湖等自然要素保存良好。连云港在城市发展的过程中进行了“填海造陆”工程，这也是研究期内江苏省高生态响应区减少的原因所在。空间分布上，江苏省高生态响应区与低生态响应区都呈现出北少南多的格局。究其原因，苏南地区水网密布，自然环境优越，因此高生态响应区分布较为均匀，同时苏南地区的南京、苏州、无锡等大城市在研究期内快速扩张，导致苏南地区的低生态响应区面积扩大，因此逐渐形成高生态响应区与低生态响应区都集聚在苏南地区的格局。

表 6 2000—2020 年江苏省生态韧性响应指数等级研究小区 个数及比例

生态韧性响应 指数等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)	小区数 (个)	比例 (%)
低生态响应区	447	3.77	596	5.02	1 103	9.29
较低生态响应区	2 617	22.05	3 088	26.01	3 671	30.92
中生态响应区	6 465	54.46	5 888	49.60	4 808	40.50
较高生态响应区	1 191	10.03	1 192	10.04	1 236	10.41
高生态响应区	1 151	9.70	1 107	9.33	1 053	8.87

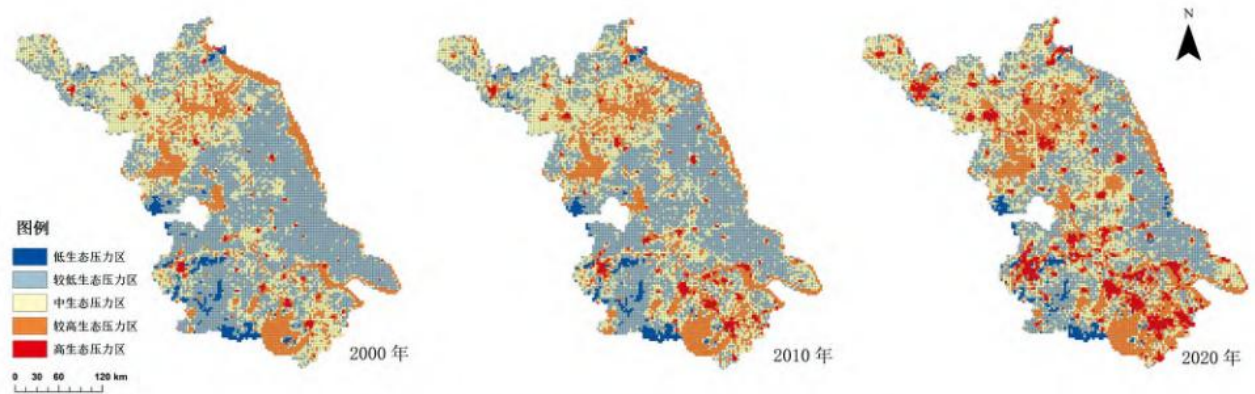


图3 2000—2020 年江苏省生态韧性压力指数等级空间分布
Figure 3 Spatial distribution of ecological resilience pressure index grade in Jiangsu Province, 2000 – 2020

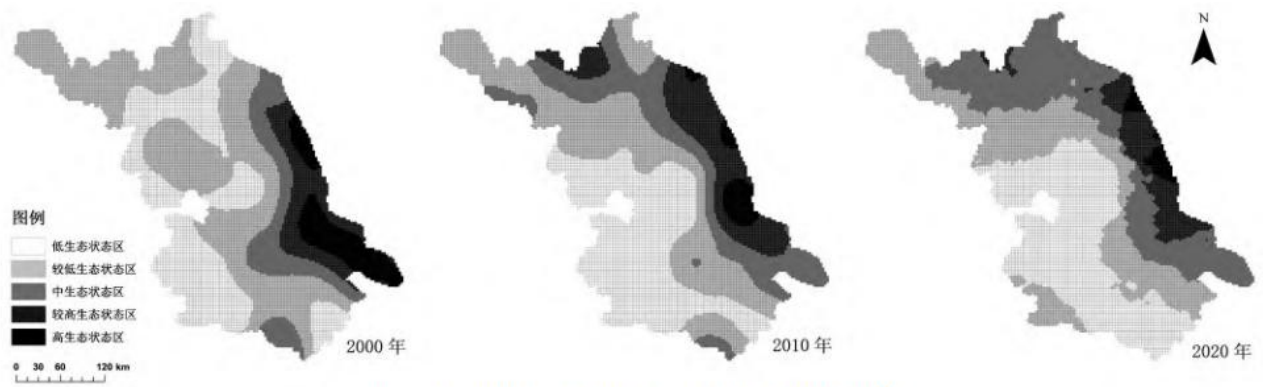


图4 2000—2020 年江苏省生态韧性状态指数等级空间分布

Figure 4 Spatial distribution of ecological resilience state index grade in Jiangsu Province, 2000 – 2020

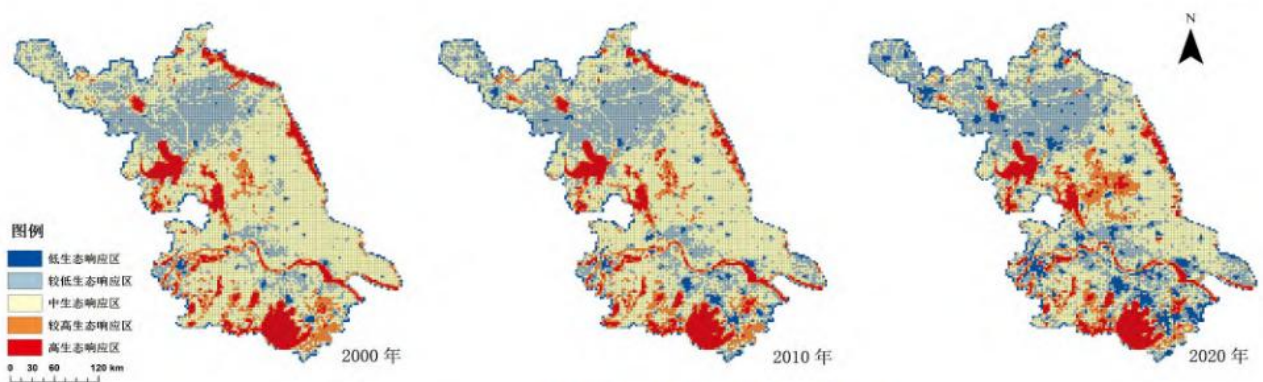


图5 2000—2020 年江苏省生态韧性响应指数等级空间分布

Figure 5 Spatial distribution of ecological resilience response index grade in Jiangsu Province, 2000 – 2020

3.2 江苏省城市生态韧性评价分析

2000 年、2010 年、2020 年江苏省的整体生态韧性指数分别为 0.3302、0.3075、0.3024。从图 6 可见，研究期内江苏省整体生态韧性指数持续降低，区域生态安全受到一定威胁。其中，2000—2010 年江苏省的生态韧性指数急剧下降，2010—2020 年江苏省生态韧性指数下降幅度明显收窄。究其原因，早期城市发展以经济为中心，较少考虑城市的生态保护，加之该阶段城市开始快速扩张，导致整个区域的自然基底被破碎化，生态稳定性遭到快速破坏。2010 年后，江苏省城市规划建设工作更加注重对生态环境的保护，虽然城市经济发展水平在快速提升，但生态韧性指数较前 10 年更为稳定。从各城市来看，除南京、徐州、连云港和宿迁外，其余城市的生态韧性指数都有所下降，这 4 个城市生态韧性增强的主要原因是状态指数的提升。苏北地区本身的自然基底稳定性较差，村庄零星分布，景观破碎化度高且边界情况复杂，在城市的发展过程中，土地资源集约利用，景观稳定性逐渐加强。而南京主要是因为溧水与高淳两个非主城区的生态状态提升，使其生态韧性指数得到增长。空间分布上，江苏省生态韧性整体呈现出“北高南低、东高西低”的格局。2000—2020 年，生态韧性格局从“东高西低”向“北高南低”演进，表明城市经济发展对生态韧性格局造成了显著影响，苏南地区的快速发展导致原本“东高西低”的生态韧性格局被逐渐打破。

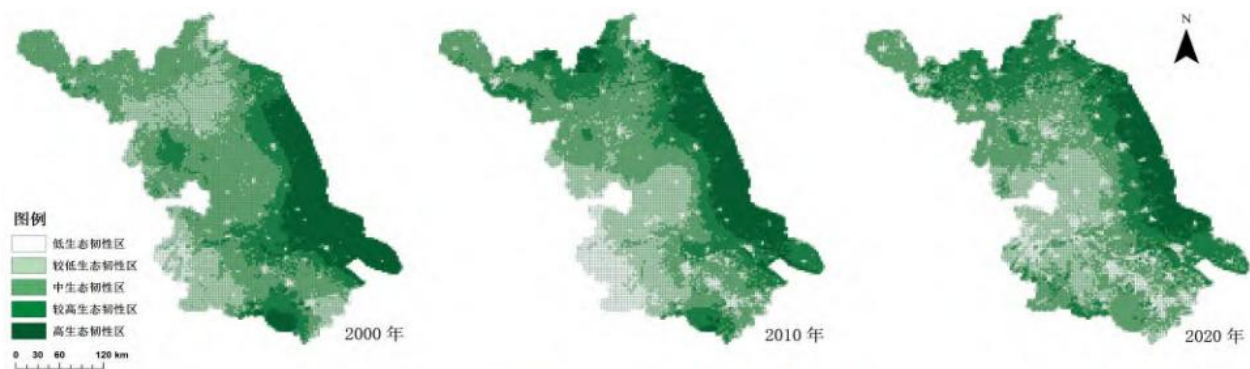


图6 2000—2020 年江苏省生态韧性指数等级空间分布

Figure 6 Spatial distribution of ecological resilience grade in Jiangsu Province, 2000 – 2020

3.3 江苏省城市经济发展水平分析

从时间序列来看，江苏省整体经济发展水平得到了显著的提高。通过对表 7、图 7 和图 8 的分析可知，2000—2020 年间，江苏省整体经济发展水平提高了 0.4324，其中，2000—2010 年提高了 0.1519，2010—2020 年提高了 0.2805。其中，宿迁市经济发展速度最快，镇江市经济发展速度最慢。从空间格局来看，2000—2020 年间，江苏省北中南部的经济发展水平差异扩大，说明省内的经济发展不均衡性在不断增强。3 个时期江苏省的经济发展水平都呈现出“苏南领跑”的特征，特别是南京、苏州、无锡、常州 4 个城市具有巨大的经济优势。虽然江苏省各城市经济发展水平空间格局整体呈现出“苏南>苏中>苏北”的阶梯性，但个别城市对此格局造成一定冲击。如徐州市作为淮海经济区中心城市，其在研究期内经济发展速度远高于其他苏北城市，至 2020 年，徐州市的经济发展水平已远超周边城市，达到较高发展水平。2000—2010 年间，苏州市凭借民营经济的快速发展与大量外资的引入，一跃成为江苏省经济发展水平最高的城市。2010—2020 年间，南京、无锡的经济发展势头良好，与苏州市一齐成为江苏省高经济发展水平城市，而常州市逐渐被苏南阵营落下。

表 7 2000—2020 年江苏省各城市生态韧性指数与经济发展水平指数 导出到 EXCEL

城市	城市生态韧性			城市经济发展水平		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年
南京	0.2255	0.1588	0.2385	0.0991	0.3055	0.8031
无锡	0.3408	0.2770	0.2683	0.1156	0.3402	0.6692
徐州	0.2991	0.3406	0.3265	0.0501	0.1724	0.4008
常州	0.2979	0.2416	0.2694	0.0875	0.2519	0.5446
苏州	0.3502	0.3262	0.2743	0.1211	0.4235	0.9613
南通	0.4992	0.4292	0.3927	0.0608	0.2238	0.5617
连云港	0.2843	0.3681	0.3666	0.0284	0.1172	0.2785
淮安	0.2975	0.2798	0.2701	0.0214	0.1244	0.3212
盐城	0.4190	0.4479	0.4149	0.0277	0.1512	0.3761

扬州	0.3146	0.2513	0.2300	0.0578	0.1857	0.4134
镇江	0.3194	0.2543	0.2596	0.0774	0.2052	0.4196
泰州	0.3641	0.3063	0.3042	0.0509	0.1761	0.4015
宿迁	0.2807	0.3168	0.3160	0.0013	0.0971	0.2694
平均	0.3302	0.3075	0.3024	0.0615	0.2134	0.4939

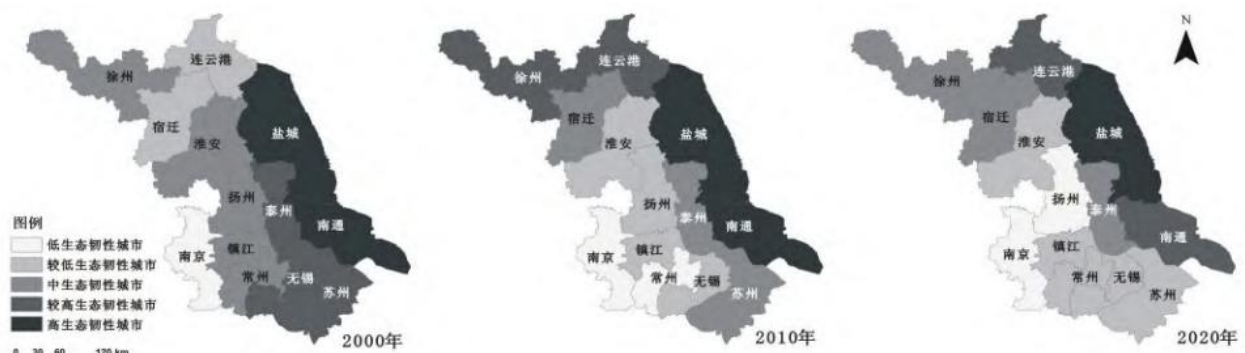


图7 2000—2020 年江苏省各城市生态韧性空间格局

Figure 7 Spatial pattern of ecological resilience of cities in Jiangsu Province,2000 -2020



图8 2000—2020 年江苏省各城市经济发展水平空间格局

Figure 8 Spatial pattern of economic development level of cities in Jiangsu Province,2000 -2020

3.4 耦合协调度分析

耦合协调度的时空分析。从时间维度看，江苏省生态韧性与经济发展水平的耦合协调度整体呈现出由“基本失调”向“基本协调”发展的上升特征。由图 9 可知，2000 年、2010 年、2020 年江苏省城市平均耦合协调度分别为 0.3567、0.4938、0.6102。2000 年，江苏省各城市耦合协调度位于[0.1386,0.4537]区间内，处于“严重失调”和“基本失调”阶段，其中宿迁市的耦合协调度最低。2010 年，江苏省各城市耦合协调度介于[0.4187,0.6097]，耦合协调度均有所增加，其中宿迁、淮安、连云港 3 市从“严重失调”阶段发展成“基本失调”阶段，盐城、南通、苏州、无锡 4 市已进入“基本协调”阶段。2020 年，江苏省各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度都已步入“基本协调”阶段。

虽然江苏省整体生态韧性呈下降趋势，经济发展水平呈上升趋势，但是两者的耦合协调性并没有降低，生态与经济的关系没有走向失衡。造成这一变化的主要原因是，虽然在城市经济发展的过程中，城市生态遭受到破坏，生态韧性出现下降的趋势，但是经济发展的收益显著大于生态破坏的损失，因此在经济水平的强势发展下，江苏省各城市的生态韧性与经济发展水平耦合协调度依旧呈现上升的趋势。特别是 2010—2020 年间，江苏省整体生态韧性指数仅下降了 1.66%，而经济发展水平指数上升了 131.44%。从单个城市看，研究期内耦合协调度上升最高的是宿迁市，上升最低的是镇江市。2000 年，镇江市的生态韧性指数为 0.3194，宿迁市为 0.2807。2020 年，镇江市的生态韧性指数下降到了 0.2596，而宿迁市却上升到 0.3160。虽然宿迁市的经济发展水平低于镇江市的发展水平，但是宿迁市的生态韧性与经济发展水平同步发展，而镇江市却以牺牲生态韧性来支撑经济发展，因此宿迁市耦合协调度快速上升。

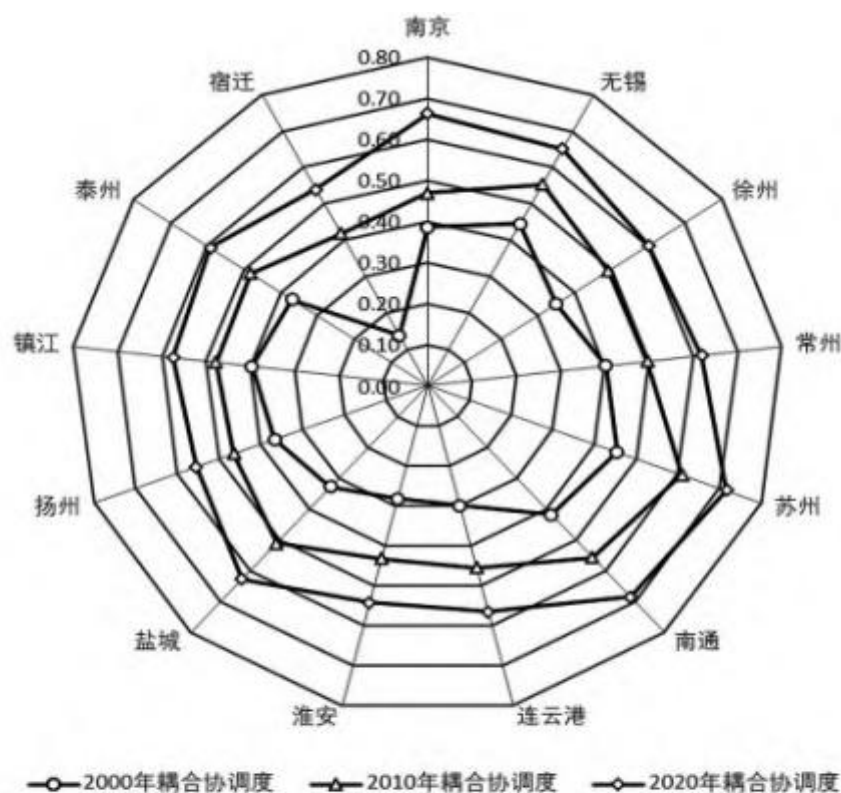


图 9 2000—2020 年江苏省城市生态韧性与经济发展水平耦合协调度

Figure 9 The coupling coordination degree of ecological resilience and economic development level of cities in Jiangsu Province, 2000 - 2020

从空间维度看，江苏省城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度呈现从苏南与沿海向苏北与内陆递减的格局(图 10)，这与城市的生态禀赋与经济发展水平有关。苏南地区的经济基础较好，研究期内地区经济发展水平在省内一直处于领跑地位，且苏南地区河网密布，生态基底良好，加上近 10 年政府对生态环境的高度重视，因此地区内各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度在同期江苏省各城市中处于靠前位置。沿海地区则主要得益于其良好的生态韧性，特别是南通市与连云港市。在城市发展过程中，连云港与南通两市保持着较高的景观稳定性，城市化的过程并没有使地块严重破碎化，因此这两个城市生态韧性指数一直保持在较高水平以上，生态韧性对城市经济发展的胁迫具有较强的承载力。

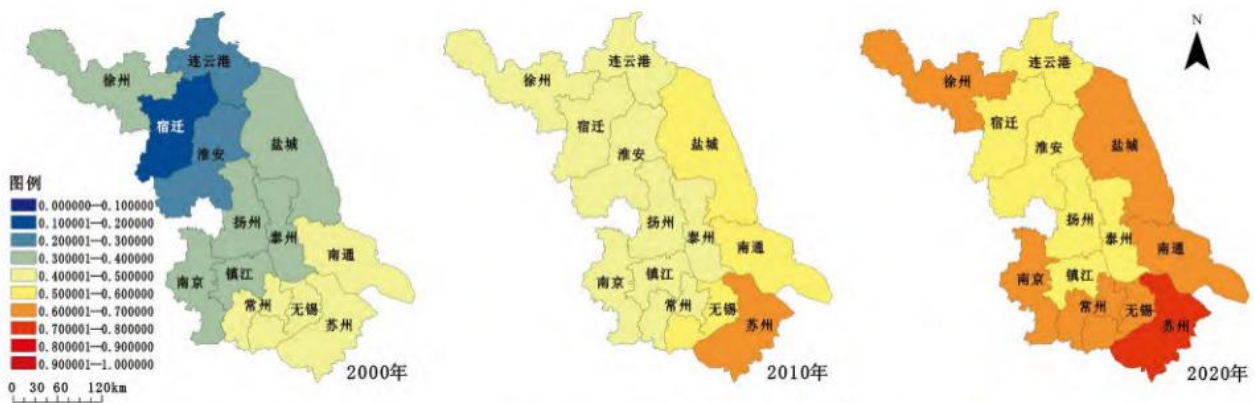


图 10 2000—2020 年江苏省城市生态韧性与经济发展水平耦合协调度的空间格局
Figure 10 Spatial pattern of the coupling coordination of ecological resilience and economic development level of cities in Jiangsu Province, 2000 – 2020

耦合协调度的类型分析。根据各城市 2000 年和 2020 年生态韧性与经济发展水平的耦合协调类型情况(表 8), 将江苏省 13 个城市分成三大类。第一类是由“基本失调—经济水平受阻”转变为“基本协调—生态韧性受阻”类型, 包括南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江 7 个市; 第二类是由“基本失调—经济水平受阻”转变为“基本协调”类型, 包括徐州、盐城、泰州 3 市; 第三类是由“严重失调—经济水平受阻”转变为“基本协调”类型, 包括连云港、淮安、宿迁 3 市。

第一类属于经济发展水平相对较高, 发展过程对生态韧性冲击大的城市。其中无锡、苏州、南通 3 市在 2010 年以“基本协调”类型过渡, 无锡、苏州属于“基本协调”亚类, 南通属于“基本协调—经济水平滞后”亚类。这是因为无锡、苏州的“苏南模式”实践使得乡镇企业蓬勃发展, 加上中国加入 WTO 后, 政府利用廉价土地与劳动力及优惠政策吸引外资, 使得经济发展水平快速增长, 与生态韧性基本协调。同期南通市也在上海的辐射影响下, 依托其发达的轻工工业发展新兴工业后迅速崛起, 虽然经济水平滞后于生态韧性, 但依旧步入两者基本协调的阶段。南京在 2010 年以“基本失调—生态韧性受阻”过渡, 常州、扬州、镇江以“基本失调”过渡, 这表明在研究期前 10 年内, 这些城市的经济发展水平虽然提升, 但还未与生态韧性相协调, 特别是南京市, 2000—2010 年期间的发展造成了严重的生态破坏, 使得生态韧性受阻。

第二类属于经济发展水平适中, 生态经济协调发展的城市。包含城市中, 徐州、泰州两市在 2010 年属于“基本失调—经济水平受阻”亚类, 盐城属于“基本协调—经济水平滞后”亚类。该类城市的经济发展水平略低于第一类城市, 在城市发展过程中, 徐州、泰州的经济水平虽然略高于盐城, 但是生态韧性指数明显低于盐城, 因此在生态韧性指数的带动下, 盐城在 2010 年已进入“基本协调”阶段。

第三类属于经济发展水平相对较低, 发展过程对生态韧性冲击小的城市。包含的城市都是以 2010 年的“基本失调—经济水平受阻”阶段过渡到 2020 年的。连云港、淮安、宿迁 3 市均位于苏北地区, 经济发展水平较低。在 2000—2010 年的发展中, 生态韧性与经济发展水平耦合协调度从“严重失调”发展到“基本失调”阶段, 但依旧是经济水平受阻。在 2010—2020 年的发展中, 3 市经济水平继续提升, 与生态韧性到达“基本协调”阶段, 但由于在同期的城市中, 经济发展水平依旧较低, 因此没有出现经济发展水平指数远超生态韧性指数, 导致生态韧性滞后的情况。

表 8 2000—2020 年江苏省各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调类型

Table 8 Classification of coupling coordination degree of ecological resilience and economic development level of cities in the Jiangsu Province, 2000 – 2020

年份	2000 年	2010 年	2020 年
南京	基本失调—经济水平受阻	基本失调—生态韧性受阻	基本协调—生态韧性滞后
无锡	基本失调—经济水平受阻	基本协调	基本协调—生态韧性滞后
徐州	基本失调—经济水平受阻	基本失调—经济水平受阻	基本协调
常州	基本失调—经济水平受阻	基本失调	基本协调—生态韧性滞后
苏州	基本失调—经济水平受阻	基本协调	基本协调—生态韧性滞后
南通	基本失调—经济水平受阻	基本协调—经济水平滞后	基本协调—生态韧性滞后
连云港	严重失调—经济水平受阻	基本失调—经济水平受阻	基本协调
淮安	严重失调—经济水平受阻	基本失调—经济水平受阻	基本协调
盐城	基本失调—经济水平受阻	基本协调—经济水平滞后	基本协调
扬州	基本失调—经济水平受阻	基本失调	基本协调—生态韧性滞后
镇江	基本失调—经济水平受阻	基本失调	基本协调—生态韧性滞后
泰州	基本失调—经济水平受阻	基本失调—经济水平受阻	基本协调
宿迁	严重失调—经济水平受阻	基本失调—经济水平受阻	基本协调

4 结论与讨论

4.1 结论

本文从韧性视角出发，基于 PSR 模型构建了城市生态韧性评价模型，并借鉴物理学耦合模型测算了 2000—2020 年江苏省各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度，并对其时空分异特征进行分析。主要结论如下：①研究期内，江苏省整体生态韧性指数持续降低，区域生态安全受到较大威胁。空间分布上，江苏省生态韧性整体呈现出“北高南低、东高西低”的格局，研究期内随着时间的发展，生态韧性格局在从“东高西低”向“北高南低”演进。②江苏省整体经济发展水平得到了显著的提高，3 个时期江苏省的经济发展水平都呈现出“苏南领跑”的特征，各地区经济发展水平空间格局整体呈现“苏南>苏中>苏北”的阶梯性。③江苏省各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度整体上呈现由“基本失调”向“基本协调”发展的上升特征。虽然江苏省整体生态韧性呈下降趋势，经济发展水平呈上升趋势，但是两者的耦合协调性并没有降低，生态与经济的关系没有走向失衡。从空间维度来看，江苏省城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度呈现从苏南与沿海向苏北与内陆递减的格局，这与城市的生态禀赋与发展水平有关。④根据 2000 年与 2020 年 13 个市的耦合协调类型，将江苏省城市分为三大类。第一类属于经济发展水平相对较高，发展过程对生态韧性冲击大的城市，包含南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江 7 市；第二类属于经济发展水平适中，生态经济协调发展的城市，包含徐州、盐城、泰州 3 市；第三类属于经济发展水平相对较低，发展过程对生态韧性冲击小的城市，包含连云港、淮安、宿迁 3 市。

4.2 讨论与建议

总体来看，2000—2020 年江苏省各城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调度处于不断适应上升的阶段。从早期的失调状态向协调状态转变，从经济水平受阻向生态韧性滞后转变。表明江苏省各城市在经济发展的过程中虽然提高了生态韧性与经济水平的耦合协调度，但是对城市生态也带来了一定冲击。在以生态文明为前提的国土空间规划中，未来江苏省城市生态韧性与

经济发展水平耦合协调度的提高需要特别注意以下3个方面：①严格划定三区三线。在科学划定三区三线的基础上，严守生态底线，筑牢生态安全屏障，限制城市无序扩张。②积极促进节约集约用地，特别是乡村地区，改善零星乡村布局导致的生态景观破坏化严重的情况，从而提升生态韧性状态指数。③科学构建生态格局。合理布局城市中的蓝绿空间网络，构建生态安全格局，提升建成区内生态韧性。

本文讨论的生态韧性主要关注城市经济发展对土地利用结构带来的改变，从而导致对景观生态的影响，是从较为宏观的角度来测度城市生态韧性，因此本研究忽略了城市内部较小的生态景观对生态韧性的影响。此外，本研究中城市生态韧性的测度主要基于土地利用数据，测度维度较为单一，未来可改进评估体系，引入多源数据，多角度测度城市生态韧性。最后，本研究分析了江苏省城市生态韧性与经济发展水平的耦合协调的格局与演变，但缺乏对其影响因素及驱动机制的深入揭示，后续研究还有待强化。

参考文献

- [1] 余凤鸣,周杜辉,杜忠潮,等.陕西省经济发展与生态环境耦合关系研究[J].水土保持通报,2012,32(4):292-297.
- [2] 杨保军,陈鹏,董珂,等.生态文明背景下的国土空间规划体系构建[J].城市规划学刊,2019,(4):16-23.
- [3] 王振波,方创琳,王婧.1991年以来长三角快速城市化地区生态经济系统协调度评价及其空间演化模式[J].地理学报,2011,(12):1657-1668.
- [4] Allan G,Hanley N,Mcgregor P,et al.The impact of increased efficiency in the industrial use of energy:A computable general equilibrium analysis for the United Kingdom[J].Energy Economics,2007,29(4):779-798.
- [5] Grossman G M,Krueger A B.Economic growth and the environment[J].The Quarterly Journal of Economics,1995,110(2):353-377.
- [6] 刘定惠,杨永春.区域经济—旅游—生态环境耦合协调度研究——以安徽省为例[J].长江流域资源与环境,2011,20(7):892-896.
- [7] 刘同超.黄河流域生态环境与经济发展耦合胁迫关系研究[J].人民黄河,2021,43(7):13-18,23.
- [8] 王淑强,董锁成,王新,等.定西市经济与生态环境互动机理研究[J].资源科学,2005,(4):106-111.
- [9] 梁红梅,刘卫东,刘会平,等.深圳市土地利用社会经济效益与生态环境效益的耦合关系研究[J].地理科学,2008,(5):636-641.
- [10] 陈端吕,彭保发,熊建新.环洞庭湖区生态经济系统的耦合特征研究[J].地理科学,2013,33(11):1338-1346.
- [11] 张荣天,焦华富.泛长江三角洲地区经济发展与生态环境耦合协调关系分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):719-727.
- [12] Holling C S.Resilience and stability of ecological systems[J].Annual Review of Ecology and Systematics,1973,4(4):1-23.

-
- [13] 豆明伟, 唐莉华, 徐翔宇, 等. 安徽省生态弹性力时空变化及影响因素研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 184-190.
- [14] 廖柳文, 秦建新, 刘永强, 等. 基于土地利用转型的湖南省生态弹性研究[J]. 经济地理, 2015, 35(9): 16-23.
- [15] 范维澄. 安全韧性城市发展趋势[J]. 劳动保护, 2020, (3): 20-23.
- [16] 殷克东, 赵昕, 薛俊波. 基于 PSR 模型的可持续发展研究[J]. 软科学, 2002, 16(5): 62-66.
- [17] 白立敏. 基于景观格局视角的长春市城市生态韧性评价与优化研究[D]. 长春: 东北师范大学博士学位论文, 2019.
- [18] 虞燕娜, 朱江, 吴绍华, 等. 多风险源驱动下的土地生态风险评价——以江苏省射阳县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1264-1274.
- [19] Rao K S, Pant R. Land use dynamics and landscape change pattern in a typical micro watershed in the mid elevation zone of central Himalaya, India[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 86(2): 113-124.
- [20] 刘延国, 王青, 王军. 官司河流域土地覆被景观稳定性及其环境效应[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 166-169, 174.
- [21] 刘吉平, 马长迪. 1985—2015 年向海沼泽湿地斑块稳定性的空间变化[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1261-1269.
- [22] 徐秋阳, 王巍巍, 莫罹. 京津冀地区景观稳定性评价[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4226-4233.
- [23] 王志强, 曹善浩, 周宇航, 等. 近 30 年来浏阳河流域景观格局动态及稳定性时空变化特征[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 64-70.
- [24] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, (5): 911-919.
- [25] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, (3): 10-13.
- [26] J Peng, Y X Liu, J S Wu, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [27] J Peng, Y X Liu, T Y Li, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 399-410.
- [28] 高林安. 经济发展与生态环境耦合协调性识别与优化路径研究——以东北地区为例[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(1): 74-81.
- [29] 蒋溢. 绵阳市生态环境与经济协调发展研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(3): 131-135.
- [30] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [31] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.

[32] Y F Li, Y Li, Y Zhou, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 98 : 127-133.