

DOI: 10.5846/stxb202110152916

李可昕, 胡宏, 赵慧敏. 基于适应性循环理论与压力-状态-响应框架的区域社会-生态系统演进研究. 生态学报, 2022, 42(24): 10164-10179.

Li K X, Hu H, Zhao H M. Evolution analysis of regional social-ecological systems based on adaptive cycle theory and Pressure-State-Response framework. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10164-10179.

基于适应性循环理论与压力-状态-响应框架的区域社会-生态系统演进研究

李可昕, 胡宏*, 赵慧敏

南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

摘要: 21 世纪以来都市圈快速扩张对区域社会-生态系统的可持续发展构成威胁, 基于动态演进视角的区域社会-生态系统运行机制解析备受关注。以南京都市圈为例, 从区域和城市两个尺度, 基于适应性循环理论与压力-状态-响应框架解析 2000—2019 年近 20 年来都市圈社会-生态系统的交互适应循环阶段, 以及每个阶段系统的差异化应激响应机制。研究表明南京都市圈社会-生态系统整体经历了 3 个适应循环周期, 现处于新一轮的适应性循环阶段, 系统适应性呈上升趋势, 但社会子系统和生态子系统尚未取得协调。都市圈内各城市的社会-生态系统演进类型有所不同, 可分为稳定增长型、波动增长型、不均衡发展型和生态危机型四类。未来需要采取差异化的社会-生态系统治理策略, 确保都市圈整体优化发展。

关键词: 社会-生态系统; 适应性循环; 压力-状态-响应框架; 演进; 南京都市圈

Evolution analysis of regional social-ecological systems based on adaptive cycle theory and Pressure-State-Response framework

LI Kexin, HU Hong*, ZHAO Huimin

School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Since the 21st century, human activities such as the rapid expansion of metropolitan area have posed a threat to the sustainable development of regional social-ecological system. The analysis of the operation mechanism of regional social-ecological system based on the perspective of dynamic evolution has attracted much attention. From two different scales of region and city, combined with the adaptation cycle theory and Pressure-State-Response (PSR) framework, this study analyzes the interactive adaptation cycle stages of 10 urban social-ecological systems in Nanjing metropolitan area and Nanjing metropolitan area in last 20 years, as well as the differential stress response mechanism of each stage system. This study decomposes the social-ecological system into social subsystem and ecological subsystem, and identifies the stage of the system through the change characteristics of social subsystem, ecological subsystem and social-ecological system adaptability. The results show that from 2000 to 2019, the whole social-ecological system of Nanjing metropolitan area has experienced three adaptation cycles, the time of adaptation cycle increases in turn, the overall adaptability of the system showed an upward trend, and the rising stage of adaptability exceeds 80% of the whole stage, which indicate that the overall development of Nanjing metropolitan area has been good in the past two decades. The interactive adaptability of social-ecological system is gradually rising in a cycle. However, during this period, the adaptability of the ecosystem subsystem has declined for many times, resulting in the instability of the whole system, which is also the main reason for the system entering the release phase. At the same time, in the past years, the social subsystem and ecological subsystem of the

基金项目: 国家社科基金重点项目 (20AZD040)

收稿日期: 2021-10-15; 网络出版日期: 2022-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: h.hu@nju.edu.cn

metropolitan area have not been coordinated. At present, metropolitan areas are in the rapid growth stage of a new round of adaptation cycle. The trend of rapid growth will last for some time, and then the growth rate will slow down and enter the stage of long-term stable development. At the urban level, the development of the ten cities in the metropolitan area also has the characteristics of adaptive cycle, but the development stages of urban social-ecological system are different. The adaptability of ecological subsystems in almost all cities fluctuated greatly, which caused a long-term negative impact on cities. Due to the sacrifice of ecological and environmental benefits in pursuit of rapid social and economic growth, the disharmony between the development of ecological subsystem and social subsystem in most cities is very obvious. Summarizing the development characteristics of 10 cities in Nanjing metropolitan area in the past 20 years, they can be divided into four types: stable growth type, fluctuating growth type, unbalanced development type and ecological crisis type. In the future, differentiated social-ecological systems governance strategies need to be adopted to ensure the overall optimal development of the metropolitan area.

Key Words: Social-Ecological systems; adaptive cycle; Pressure-State-Response framework; evolution; Nanjing metropolitan area

近年来都市圈和城镇群建设快速扩张,人类活动所导致的生态环境退化不仅对城镇更对区域可持续发展构成潜在威胁。已有研究表明,一旦生态风险突破阈值,社会-生态系统极有可能发生不可逆转的变化^[1-2]。因此,基于动态演进视角的区域社会-生态系统运行机制解析备受关注。社会-生态系统(SES)是社会子系统和生态子系统相互依赖、相互影响、相互作用所形成的复杂适应系统^[3],具有非线性、不可预测性、自组织性等特点^[4],其交互适应状态随时间推移而发生变化。已有研究对社会-生态系统的复杂性分析主要集中在脆弱性、恢复力和适应性三个核心属性^[3,5-6]。社会-生态系统的三个属性既相互区别又相互关联,既有文献在测度社会-生态系统某一个属性时,会将另外两个维度作为评价指标,Folke 等认为脆弱性与恢复力如同硬币的两面,二者构成互补的关系,即对社会-生态系统恢复力的分析可从反面的脆弱性进行评估^[7]。由于适应性包含了脆弱性与恢复力两种特性,更强调社会-生态系统对变化和风险进行调节的能力,同时提升系统适应性是脆弱性和恢复力研究的最终目的,更加契合可持续发展的主题^[8],因此社会-生态系统适应性的研究成为整合社会-生态系统脆弱性和恢复力相关研究的突破口^[9]和社会-生态系统研究的重点方向。

社会-生态系统的交互适应特征可从两方面解析^[10-11]:(1)交互适应阶段的循环往复过程;(2)每个阶段系统的差异化应激响应机制。此两点特征可分别基于适应性循环理论与 PSR 框架进行探讨。社会-生态系统的交互适应是一个分阶段且不断循环的过程。21 世纪初,Holling 等学者提出多尺度嵌套适应循环模型,对生态群落的演替观点进行延伸和补充^[12-13],该理论后被著名国际性学术组织“恢复力联盟”嵌套于社会-生态系统的研究中,成为理解社会-生态系统内部结构演变、系统对外部干扰响应以及系统适应性随时间演进的重要理论依据^[10,14-15]。具体而言,适应性循环理论认为社会-生态系统在受到内外扰动时发生动态演进,这是一个存在周期的循环过程:系统在经历快速显著的开发阶段后达到稳定守恒阶段,增长速度放缓,更易受到外部干扰而发生变化;当扰动超出系统可承受的范围,系统会失衡崩溃,进入重组阶段。一个适应性循环演进过程依次包括快速增长、稳定守恒、释放和重组 4 个阶段^[5,14,16],分别用 γ 、 K 、 Ω 、 α 来表示。 γ 、 K 阶段为正向循环,此时的系统不断积累能量、完善功能、向前发展; Ω 、 α 阶段为逆向循环,此时的系统不稳定性 and 风险增加^[17-18]。在生态学、地理学、城乡规划领域,适应性循环理论为人地系统综合研究提供了新的思路和可供借鉴的理论框架^[6],被广泛应用于各类不同尺度复杂系统的研究中,包括农牧区^[6,19]、湿地^[20]、城市及城市群^[2,21]、乡村聚落^[22-24]等。研究基于适应性循环理论评价系统的脆弱性、恢复力和适应性^[21,24-27]、可持续性^[28-29]、生态风险^[2,30-31]等要素的动态变化,探究系统的发展过程与循环影响机制。

社会-生态系统的刺激响应机制在每个阶段的作用力大小存在差异。PSR 框架基于“压力(P)-状态(S)-响应(R)”的逻辑,可用于全面分析系统在不同发展阶段所面临的压力、所处的状态及所采取的响应机理差

异,为系统进一步的发展激励和约束提供参考借鉴。PSR 框架最初于 1979 年由加拿大统计学家 David J. Rapport 和 Tony Friend 提出。20 世纪 80—90 年代,经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)引入该框架研究环境问题^[32],现在被广泛应用于土地利用^[16,33—34]、生态安全^[35—38]、环境污染防控^[39—40]等领域。PSR 框架在研究中用于构建评价指标体系,压力(P)、状态(S)、响应(R)普遍被作为指标体系的准则层^[41—46],压力用以表征造成负面影响的经济社会活动和人类行为,选取指标多为反映经济发展、城市扩张的要素;状态用以表征环境和自然资源的状态,选取指标多为反映自然资源数量、环境质量、结构等的要素;响应用以表征人类为促进可持续发展所采取的对策,选取指标多为反映人类自主干预的要素。

适应性循环理论基于时空动态适应视角,与社会-生态系统复杂适应特征相契合,有助于深入理解社会-生态系统演进过程的不同交互适应阶段,但现有基于适应性循环理论的社会-生态系统演进的研究较少对系统内部子系统之间的交互作用进行定量测度,较少关注不同阶段的系统在压力变化情况下不断自我调整的应激演化过程。而 PSR 框架虽已成为生态环境管理领域成熟的定量分析方法^[46],但仍缺乏在较长时间序列中,对系统压力、状态、响应要素动态变化过程的解析。本研究将适应性循环理论和 PSR 框架结合,将有助于理解社会-生态系统在较长时间序列中的交互适应特征,提炼社会-生态系统发展演进的规律。

南京都市圈位于长江中下游地区,作为长三角城市群的重要组成是我国最早启动建设的跨省都市圈,也是首个由国家发改委正式批复规划的都市圈。该区域连通长三角东部、中部两大板块,衔接长江淮河两大流域,具有重要的战略地位^[47]。同时,南京都市圈是一个区域尺度的社会-生态系统,内部的城市子系统类型丰富,发展特征多元。2000 年,“南京都市圈”作为一个相对独立的地理区域概念被提出,在二十余年的建设中,其社会经济快速发展,取得了显著成就,但由此导致的环境问题也不容忽视。整体而言,都市圈处于动态变化的适应性循环过程中,社会子系统与生态子系统既经历过协调发展时期,也存在相互冲突阶段,两个子系统的不适应发展可能对都市圈社会-生态系统的可持续性产生威胁。本文以南京都市圈为例,分析区域社会-生态系统演进特征。如图 1 所示,区域社会-生态系统的交互适应性随时间发展存在多个循环过程(cycle),在每个循环过程里的四个阶段(γ 、K、 Ω 、 α)对应的 P、S、R 相互作用机制存在差异。在此基础上探究都市圈社会-生态系统的发展规律,以期为都市圈适应性规划提供依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

南京都市圈以江苏省南京市为中心,由联系紧密的周边城市共同组成,包括南京、镇江、扬州、淮安、芜湖、马鞍山、滁州、宣城 8 市全域及常州市金坛区和溧阳市(图 2)。该区域面积达 6.6 万平方公里,截至 2019 年末,该区域总人口约 3500 万^[49]。

1.2 技术路线

本文具体的技术路线如图 3 所示。首先基于 PSR 框架构建指标体系,对都市圈社会-生态系统进行评分;然后依据社会、生态两大子系统以及整体系统适应性的发展趋势从都市圈及地级市尺度识别适应性阶段;进而回溯 PSR 指标,总结各阶段中 PSR 指标的特征,探究社会子系统与生态子系统的耦合关系;最后提炼都市圈各城市的适应性循环类别,为都市圈社会-生态系统适应性规划提供参考。

1.3 数据来源及预处理

本研究所用数据包括从 2000 年到 2019 年的南京都市圈气候数据、AQI 数据、空间栅格数据和社会经济数据。AQI 数据来自环境云地理大数据平台,研究抓取了各个城市历年的 AQI 数值;气候数据来自城市统计年鉴和国家气象科学数据中心,选取 1—12 月的月平均气温以及 6—8 月的降水量数据;温度空间数据来自 WorldClim 数据库,选取每年 7 月最高温数据栅格;碳排放数据来自中国碳核算数据库,NDVI 数据来自中国科学院地理科学与资源研究所的年度 NDVI 栅格数据,为每年 1—12 个月份的月 NDVI 数值最大值。社会经济数据来自城市统计年鉴和统计公报,涵盖经济发展、民生福祉、污染排放、科教投入等方面(表 1)。对于数据

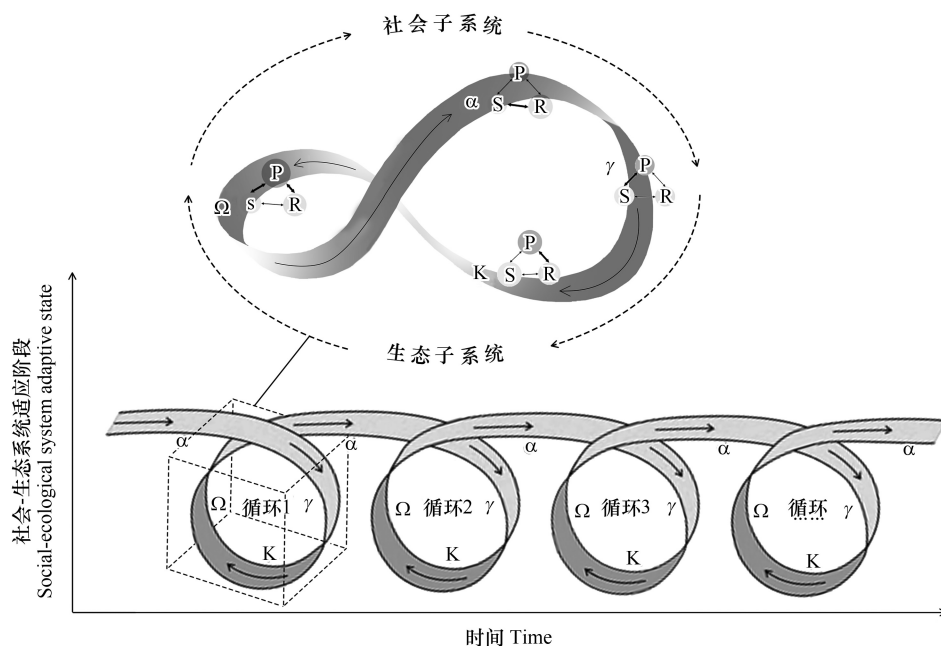


图1 研究概念框架(根据文献^[1,16,48]自绘)

Fig.1 Research conceptual framework (self drawn according to literature^[1,16,48])

P: 压力 Pressure; S: 状态 State; R: 响应 Response; γ : 快速增长阶段; K: 稳定守恒阶段; Ω : 释放阶段; α 重组阶段



图2 南京都市圈区位图

Fig.2 Map of Nanjing metropolitan area

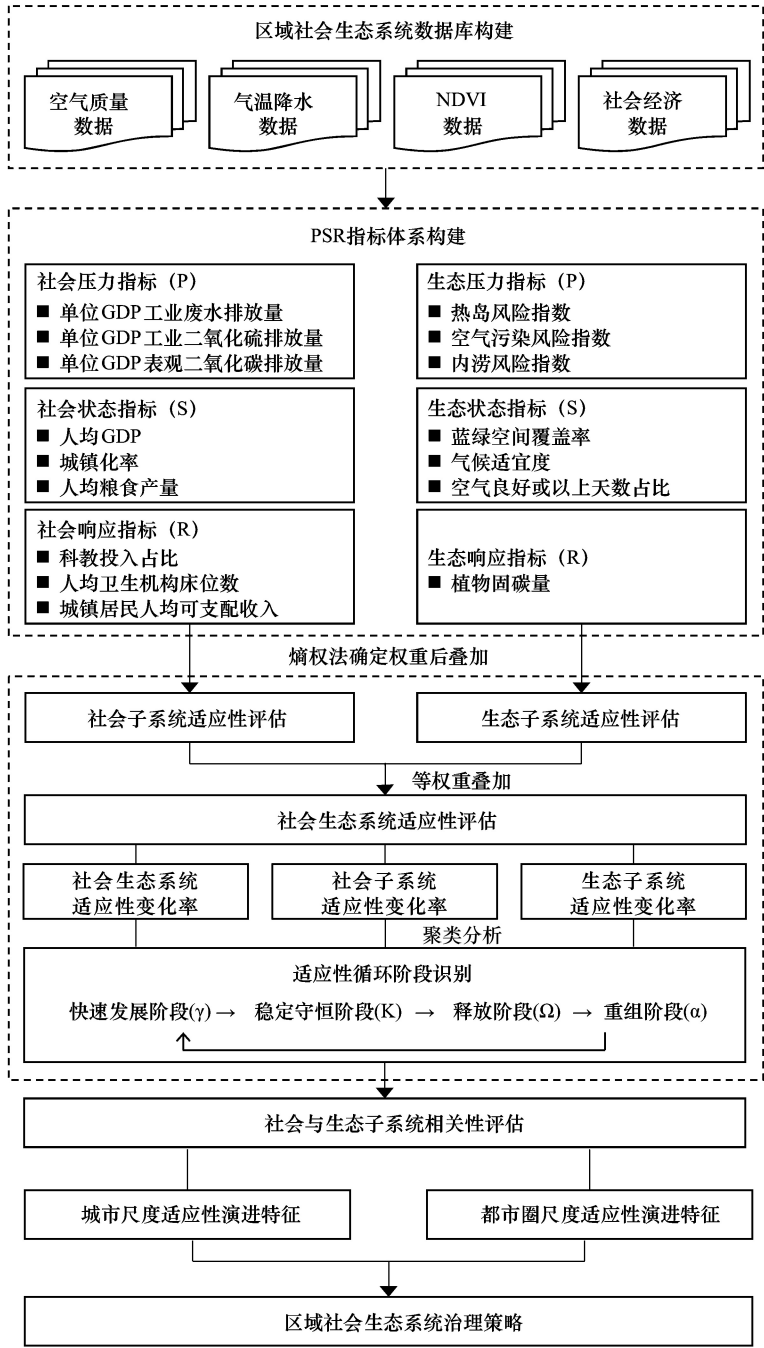


图 3 研究技术路线

Fig.3 Research technology route

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

集中的缺失值,使用回归插值法进行插补。

本研究以地级市作为最小尺度的研究单元,因此对于空间栅格数据,将其二次计算所得的值赋予对应地级市,以便后续统一计算;以行政区内栅格温度值的极差表征对应地级市的热岛风险指数,以地级市范围内雨季降水总量与汇流累积量超过一定值的栅格占比的乘积作为对应地级市的内涝风险指数,蓝绿空间覆盖率为地级市范围内栅格的 NDVI 均值。

表 1 研究数据来源(2000—2019 年)

Table 1 Research data sources (2000—2019)

数据类型 Data type	数据来源 Data sources
月平均 AQI ⁽¹⁾ 数据 Monthly average AQI data	环境云地理大数据平台(http://www.envicloud.cn/)
月平均气温数据 Monthly average temperature data	各城市统计年鉴、国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
月平均降水数据 Monthly average precipitation data	各城市统计年鉴、国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
年最高温度栅格数据 Annual maximum temperature grid data	WorldClim 数据库(http://www.worldclim.org/)
碳排放数据 Carbon emission data	中国碳核算数据库(https://www.ceads.net.cn/)
年度 NDVI 栅格数据 Annual NDVI grid data	中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.resdc.cn/Default.aspx)
社会经济数据 Socio-economic data	各城市统计年鉴和统计公报

AQI:空气质量指数 Air quality index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

2 研究方法

2.1 基于 PSR 框架的指标体系构建

本文分别构建社会子系统与生态子系统的 PSR 评价指标。考虑指标的科学性和可获取性,同时保证指标间相关系数小于 0.80,最后确定 16 个细分指标(表 2)。子系统的压力增大导致系统整体适应性降低,压力主要来源于人类活动产生的有害物质和生态子系统中由自然原因导致的热岛、雾霾和内涝风险,因此用单位 GDP 工业废水排放量和单位 GDP 二氧化硫排放量和单位 GDP 表观二氧化碳排放量表征来自社会子系统的压力^[54],用热岛风险、空气污染风险和内涝风险表征来自生态子系统的压力^[3,55]。子系统良好的状态有利于系统稳定运转,保证系统适应性处于较高水平。本研究选择人均 GDP、城镇化率、人均粮食产量表征社会子系统的状态^[56],选择蓝绿空间覆盖率、气候适宜度、空气良好或以上天数占比表征生态子系统的状态^[57]。子系统的响应能力增强意味着系统应对外部风险与内部矛盾的能力提升。本研究用植物固碳量表征生态子系统的响应能力,固碳能力强的区域往往能更好地应对风险^[58],同时该指标在计算时考虑了植物多样性、覆

表 2 基于 PSR 框架的社会-生态系统适应性评价体系

Table 2 Social-ecological system adaptability evaluation system based on PSR framework

目标层 Target	准则层 Criteria	指标 Indicators	计算方式 Calculation method	归一化 Normalization
社会子系统 Social subsystem	压力	单位 GDP 工业废水排放量	$X_1 = \text{工业废水排放}/\text{GDP}$	负
		单位 GDP 工业二氧化硫排放量	$X_2 = \text{工业二氧化硫排放量}/\text{GDP}$	负
		单位 GDP 表观二氧化碳排放量	$X_3 = \text{表观二氧化碳排放量}/\text{GDP}$	负
	状态	人均 GDP	$X_4 = \text{GDP}/\text{年末户籍人口}$	正
		城镇化率	X_5 直接获取	正
		人均粮食产量	$X_6 = \text{粮食总产量}/\text{年末户籍人口}$	正
	响应	科教投入占比	$X_7 = \text{科教支出(亿元)}/\text{公共财政支出(亿元)}$	正
		人均卫生机构床位数	$X_8 = \text{卫生机构床位数(张)}/\text{年末户籍人口(万人)}$	正
		城镇居民人均可支配收入	X_9 直接获取	正
生态子系统 Ecological subsystem	压力	热岛风险指数	X_{10} 为行政区内最高温度栅格与最低温度栅格的差值 ^[50]	负
		空气污染风险指数	X_{11} 为 AQI 年均值	负
	状态	内涝风险指数	$X_{12} = \text{致灾因子危险性(6—8 月降水总量)} \times \text{孕灾因子敏感性(汇流累积量超过一定值的栅格占比)}$ ^[51]	负
		蓝绿空间覆盖率	X_{13} 为行政区内归一化植被指数均值 ^[52]	正
		气候适宜度*	$X_{14} = \sum \text{月均温度} - \text{适宜温度} $	负
	响应	空气良好或以上天数占比	$X_{15} = \text{空气良好或以上天数}/\text{年内总天数}$	正
		植物固碳量	X_{16} 直接获取	正

* 适宜温度随季节变化:5—7 月为 25℃, 2—4 月、8—10 月:20℃, 1、11、12 月为 15℃^[53]

盖率、生长情况等多方面因素^[59],因此该指标能够反应生态子系统综合响应能力,即应对外部风险与内部矛盾的能力;用科教投入占比、人均卫生机构床位数、城镇居民人均可支配收入表征社会系统的响应能力,因为具有良好的教育和医疗水平在面对风险时具有有效的应对能力^[55]。

2.2 社会-生态系统适应性阶段识别方法

依据都市圈各城市社会-生态系统整体与社会、生态两个子系统的变化特征进行所处适应性循环阶段的识别。

2.2.1 归一化处理

上述 PSR 指标的单位 and 维度不同,为统一衡量标准,均通过极差法归一化处理各指标数据。

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max\{x_i\} - x_{ij}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (2)$$

式中, x'_{ij} 为第 j 年的变量 i 归一化后的值, x_{ij} 为第 j 年的变量 i 的原始值, $\max\{x_i\}$ 和 $\min\{x_i\}$ 分别是变量 i 的最大值和最小值。归一化后指标值的范围为 0—1^[29]。

2.2.2 社会生态适应性水平核算

对归一化的各项指标加权求和,得到两个子系统的压力指数、状态指数和响应指数^[35]:

$$P_{cj} = \sum_{i=1}^n (x'_{piej} \times w_i) \quad (3)$$

$$S_{cj} = \sum_{i=1}^n (x'_{siej} \times w_i) \quad (4)$$

$$R_{cj} = \sum_{i=1}^n (x'_{riej} \times w_i) \quad (5)$$

式中, P_{cj} 、 S_{cj} 、 R_{cj} 分别为城市 c 在第 j 年的压力指数、状态指数和响应指数, x'_{piej} 为城市 c 在第 j 年的压力指标 i 归一化后的值, x'_{siej} 为城市 c 在第 j 年的状态指标 i 归一化后的值, x'_{riej} 为城市 c 在第 j 年的响应指标 i 归一化后的值, w_i 为指标对应的权重,通过熵权法求得。

将社会子系统三类指数叠加,得到社会子系统的适应性得分:

$$\text{SESPs} = P_{cj} \times w_p + S_{cj} \times w_s + R_{cj} \times w_r \quad (6)$$

式中, w_p 、 w_s 和 w_r 分别是社会子系统中压力、状态和响应指标的权重,本研究认为三个指标重要程度相同因此赋予相等权重。

同理可计算生态子系统适应性 (SESPe)。将社会子系统适应性与生态子系统适应性相加得出社会-生态系统的总适应性:

$$\text{SESP} = \text{SESPs} + \text{SESPe} \quad (7)$$

最后计算社会-生态系统与社会、生态两个子系统适应性相对于上一年的变化率。

2.2.3 聚类分析与适应性阶段特征识别

研究分为都市圈尺度和城市尺度:都市圈尺度下,对 2001—2019 各年对前一年的南京都市圈社会子系统适应性、生态子系统适应性和社会-生态系统适应性三个系统的适应性得分的变化率进行 K-means 聚类;城市尺度下,对 2001—2019 各年对前一年的城市社会-生态系统对应的适应性得分的变化率进行 K-means 聚类,聚类数均设定为 4。在稳定聚类的前提下,对照聚类结果,根据每个分类的最大值、最小值与平均值归纳每类得分特征。

依据适应性循环理论,在社会-生态系统的适应性循环过程中,社会子系统受到人为干扰后会产生快速的、大幅的变化,而生态子系统的变化则相对缓慢滞后,因此在同一时间段内社会子系统与生态子系统常常表现出“不协调”的演进特征^[10,29,60—61]。快速增长阶段的社会-生态系统整体处于上升阶段,其功能结构不断完

善,但此时社会子系统快速发展可能以牺牲生态子系统为代价;稳定守恒阶段的社会-生态系统整体仍处于上升阶段,但发展速度放缓,各类风险不断累积,系统调控能力下降;当社会-生态系统处于释放阶段时,系统整体适应性以及子系统适应性皆下滑,此时的系统受到各类风险和矛盾威胁,处于危险之中;重组阶段的系统正经历适应性的调整,整体适应性和子系统适应性都处于缓慢回升中。经历重组阶段后,系统会再次经历新一轮循环(表3)。

表3 适应性循环阶段特征

Table 3 Characteristics of adaptive cycle stage

适应性循环阶段 Adaptive cycle stage	社会子系统适应性得分 Social subsystem adaptability score	生态子系统适应性得分 Ecological subsystem adaptability score	社会-生态系统适应性总得分 Social-ecological system adaptability score
快速增长 Growth or exploitation (γ)	快速上升	缓慢上升	快速上升
稳定守恒 Conservation (K)	上升	缓慢上升或缓慢下降	上升
释放 Collapse or release (Ω)	缓慢上升或下降	快速下降	下降
重组 Reorganization (α)	缓慢上升	缓慢上升或缓慢下降	缓慢上升

基于适应循环理论对不同阶段都市圈社会-生态系统进行分析,初步确定每个类别对应的适应性循环阶段。最后考虑社会-生态系统在演化中的先后次序与连贯性,对个别年份、城市的聚类结果进行修正。

2.3 子系统相关度分析

对社会子系统与生态子系统进行相关分析,公式如下^[62]:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (8)$$

式中, $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X, Y 的协方差, $D(X)$ 、 $D(Y)$ 分别为 X, Y 的方差。

3 结果与分析

3.1 城市尺度社会-生态系统适应性演进过程

3.1.1 城市尺度社会与生态子系统演进特征

如图4所示,南京都市圈中10个城市的社会子系统适应性在近20年间基本呈现上升趋势,少部分城市的社会子系统适应性存在大幅波动现象,如滁州市、金坛区、溧阳市和扬州市。南京都市圈中10个城市的生态子系统适应性在近20年期间波动较大。在2013年前后,几乎所有城市出现了生态子系统适应性大幅下滑的情况。生态子系统适应性的释放对城市产生了长远的影响,多数城市花费超过3年的时间“扭亏为盈”,但多数城市生态子系统的适应性仍然没有回到衰退前的水平。

对都市圈内各市、区的社会子系统得分和生态子系统得分分别进行相关性分析(图5),相关系数 >0 为正相关,表示两个变量同向变化,相关系数 <0 为负相关,表示两个变量反向变化。根据数理统计常用判断方法将相关性划分为高度相关($0.8 \leq \text{相关系数绝对值} < 1.0$)、中度相关($0.5 \leq \text{相关系数绝对值} < 0.8$)、低度相关($0.3 < \text{相关系数绝对值} \leq 0.5$)和基本不相关($0 < \text{相关系数绝对值} \leq 0.3$)^[63]。结果显示镇江、马鞍山、金坛、扬州、滁州、芜湖、宣城的社会子系统与生态子系统的发展呈现中度负相关;溧阳的社会与生态两个子系统的发展呈现低度负相关,但由于相关系数接近0.5的阈值,故而可认为是中低度负相关。多数城市的社会子系统得分和生态子系统得分相关系数为负值,表明这些城市在发展过程中,其社会子系统与生态子系统处于此消彼长的关系,即二者需要以牺牲对方为代价获得自身发展。南京都市圈多数城市的环保相关政策、条例在2010年后陆续出台,各城市也采取了实质行动,例如镇江市从2012年开始对重点污染源进行监督并公示^[64]、滁州市从2011对水污染防治进行全面部署;2015年后相关政策、条例的出台更为密集,说明生态子系统在此后受到更多关注和保护。淮安市的社会子系统和生态子系统在2011年以前正相关性极高,之后生态子系统缓慢增长,但总体仍处于上升趋势,所以两个子系统20年总体表现出正相关特点,表明淮安市的社会与生态

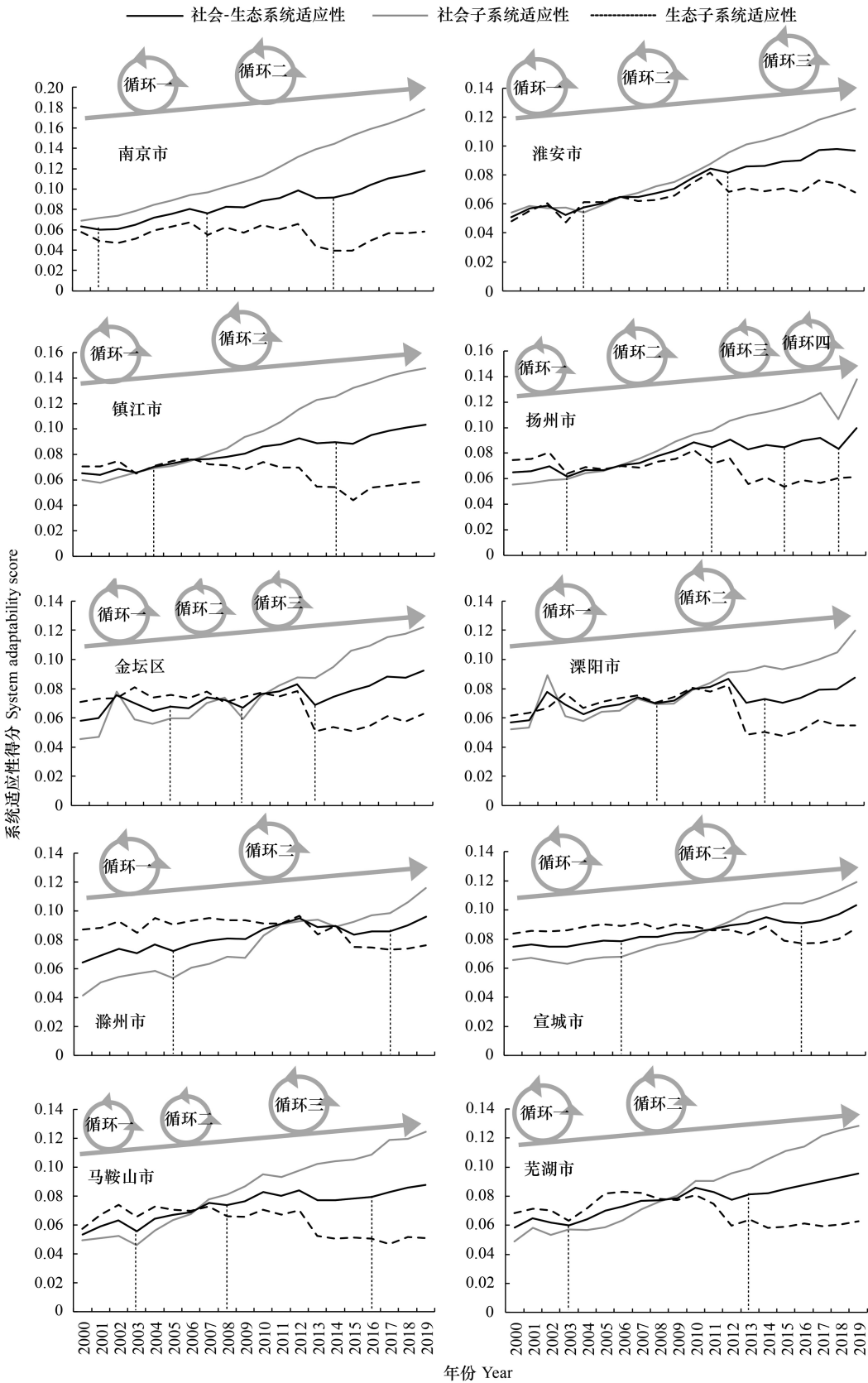


图4 城市尺度社会-生态系统适应性的动态演进

Fig.4 Dynamic evolution of Social-ecological system adaptability at urban scale

子系统协调性较好。这是淮安市政府多年来在城市建设与环境保护方面的平衡结果。淮安市一直以来积极推进环境保护相关工作的开展,定期编制环境保护五年规划和年度计划,早在“十一五”期间完成了环境监测、环境监理、环境宣教的标准化建设^[65]。

3.1.2 城市尺度社会-生态系统演进阶段识别与评价

南京都市圈社会-生态系统的聚类结果显示:处于快速增长阶段(γ)的城市,其系统得分增长率最大,各系统压力最小、生态系统处在最好的状态;处于稳定守恒阶段(K)的城市,其系统增长速度放缓,社会子系统状态达到峰值,但与此同时社会和生态子系统的压力也在增大;处于释放阶段(Ω)的城市,其压力指标得分最低,表示压力在此时达到最大,但系统响应指标却处于较低水平,故此时的城市社会-生态系统处于最不稳定的阶段;处于重组阶段(α)的城市,其社会与生态子系统压力较上一阶段有所下降,响应指标得分处于最高,状态指标有所回升(图6)。

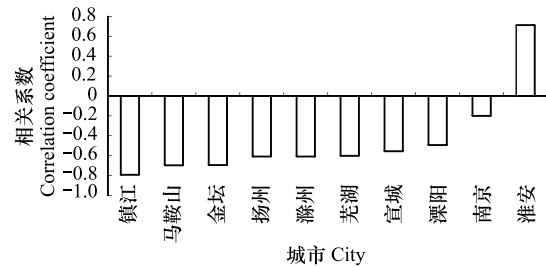


图5 城市尺度社会与生态子系统发展相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of urban scale social and ecological subsystems development

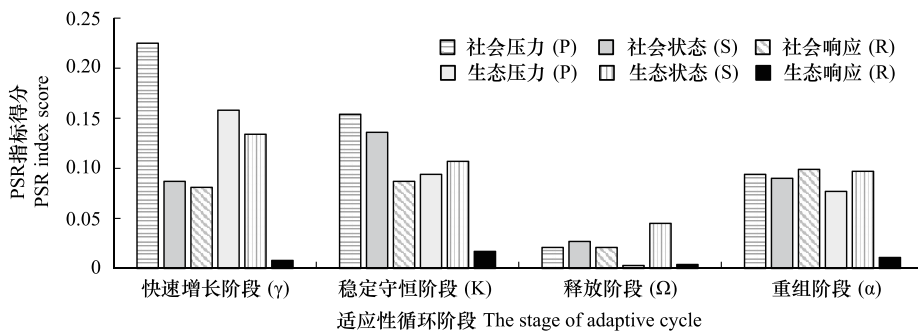


图6 城市尺度各阶段 PSR 指标得分均值统计

Fig.6 Statistics of PSR index mean scores at various stages of urban scale

图中数据为响应阶段所有城市在对应维度得分的均值,由于前期对数据进行了标准化,故对于压力指标,得分越高代表压力越小

自2000年至2019年,南京都市圈各城市的社会-生态系统适应性呈上升趋势,平均增幅为27%,其中淮安市、南京市和金坛区的增幅最大,超过30%;宣城市 and 滁州市的增幅最小,低于25%。各城市社会-生态系统适应性波动最大的时期多数集中在2003年和2013年前后,都市圈内大量城市在这段时期进入适应循环的释放期(Ω)。2003年前后,除南京市之外,其余城市的社会、生态子系统适应性出现了不同程度的下滑,其中马鞍山市是2003年社会-生态系统整体适应性下滑最为严重,达到16%;60%城市的生态子系统适应性在此时下滑,40%城市的社会子系统适应性在此时下滑。就细分指标来看,该时期内,各市人均粮食产量和科教投入占比下降,社会子系统状态退化、响应不足是造成其适应性得分下降的主要原因,2003年“非典”在各地爆发,对城市社会系统造成较大冲击,疫情过后城市社会系统恢复需要时间,因此发展速度下降甚至出现倒退;而该时期内空气污染风险的提高,植物固碳量和气候适宜度的下降,造成生态子系统压力增大响应不足,可能是由于2000前后城市建设对生态环境造成的负面影响逐渐累加的结果。2013年前后社会-生态系统适应性下滑的城市占70%,该时期内80%的城市生态子系统适应性得分下降,生态子系统的衰退是社会-生态系统整体不稳定的主要原因。

3.1.3 城市社会-生态系统分类

根据社会-生态系统适应性演进特征,将南京都市圈的市、区分为4类。类别一稳定增长型城市的系统发展过程中波动较小;类别二波动增长型城市的系统发展速度高于类别一,且波动也较大;类别三不均衡发展型

城市的社会子系统发展速度高于类别一和类别二,但生态子系统整体发展表现出轻微倒退;类别四生态危机型城市的生态子系统呈现更明显的倒退,系统发展波动较强(表4)。

表 4 南京都市圈城市分类与特征
Table 4 Classification and characteristics of cities in Nanjing metropolitan area

类别名 Class alias	包含城市 Cities included	发展特征 Development characteristics
类别一 稳定增长型城市 Category I Stable growth city	宣城	社会-生态系统、社会子系统、生态子系统基本处于正向发展,系统适应性稳定增长,增速适中波动较小
类别二 波动增长型城市 Category II Fluctuating growth city	南京、淮安	社会-生态系统、社会子系统、生态子系统基本正向发展,系统适应性增速快、波动大
类别三 不均衡发展型城市 Category III Unbalanced development city	滁州、金坛、溧阳	社会-生态系统、社会子系统正向发展;社会子系统与生态子系统发展不均衡,社会子系统适应性快速增长,生态子系统适应性轻微倒退
类别四 生态危机型城市 Category IV Ecological crisis city	马鞍山、芜湖、扬州、镇江	社会-生态系统与社会子系统正向发展,生态子系统的适应性明显的倒退,系统发展波动较大

3.2 都市圈尺度系统适应性评价

3.2.1 都市圈社会子系统和生态子系统演进评价

就南京都市圈整体而言,社会子系统适应性演进表现出持续上升的趋势,上升阶段占全阶段的比例接近 95%,其中 44%阶段的增速超过 15%。表明在 2000 至 2019 年期间,南京都市圈的城市建设对其社会子系统的影响较大。2003 年都市圈社会子系统适应性出现短暂下滑,主要原因在于“压力”指标中,单位 GDP 排放量有所增加而“状态”指标中的人均粮食产量、“响应”指标中的科教投入占比、人均卫生床位数和城镇居民可支配收入均有所下降,可能是“非典”疫情导致城市社会子系统适应性减弱。

南京都市圈生态子系统适应性演进表现出波动的特征,上升阶段占全阶段比例为 74%,其中超过一半的阶段增速低于 15%,增速缓慢。表明在 2000 至 2019 年期间,南京都市圈的城市建设对其生态子系统造成较多负面影响。2011 年至 2013 年是生态子系统适应性连续下滑的阶段,该过程持续了两年。在这个阶段,都市圈包含热岛、空气污染和内涝在内的风险显著提升,都市圈在这段时期城郊温差提升了 0.5 摄氏度,AQI 年均值增加了近 6 分,2013 年都市圈工业废气排放总量相比 2011 年增加了 40%,气候适宜度和空气良好或以上天数占比也在同时降低(表 5)。

表 5 部分关键指标变化(2011—2013 年)
Table 5 Changes of some key indicators (2011—2013)

	空气良好或 以上天数占比 Proportion of days with good air or above	AQI 均值 AQI mean	市中心与郊区温差 Temperature difference between downtown and suburb/℃	气候适宜度 Climate suitability	工业废气排放量 Industrial waste gas emission/(10 ⁸ m ³)
2011 年	0.94	86.38	1.78	75.19	19195.9669
2013 年	0.69	92.34	2.31	80.07	26898.0884
变化量 Variation	-0.24	5.96	0.53	4.88	7702.12

气候适宜度指标得分越高表示适宜度越低

工厂污染是造成该阶段都市圈适应性下滑的主要原因,镇江、扬州、芜湖等多地爆发了影响恶劣的污染事件^[66–69],建筑工地扬尘、机动车尾气排放、秸秆焚烧也对生态子系统造成不小压力^[70–71],同时这一阶段城市快速扩张导致生态空间锐减,这使得生态子系统自身的响应能力被削弱。2015 年后,都市圈各市密集出台污染应急预案、环保计划,针对污染防控采取实际行动^[72–74],此后都市圈生态子系统适应性开始缓慢回升,增速在 2017 年后显著提升。

对 2000 年至 2019 年都市圈内的八个地级市与一区一县的社会子系统得分和生态子系统得分进行相关性分析,得出二者相关系数为-0.45,表明社会子系统和生态子系统发展呈中低度负相关,说明在当下的城市

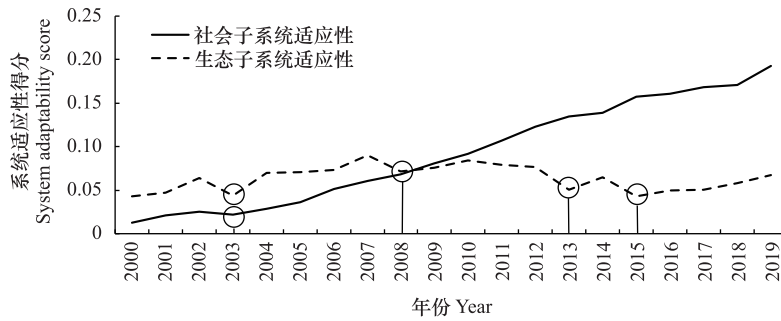


图7 南京都市圈社会与生态子系统演进动态

Fig.7 Evolution dynamics of social and ecological subsystems in Nanjing metropolitan area

发展中,社会与生态两个子系统的发展存在不协调。

3.2.2 都市圈社会-生态系统适应性阶段识别结果

如表6所示,都市圈处于快速增长阶段(γ)时,其系统状态和相应指标的得分增长率最大,但生态子系统压力得分减少,表示压力在该阶段增大;都市圈处于稳定守恒阶段(K)时,其系统状态和响应得分的增长速度放缓,与此同时社会子系统压力开始增大,生态子系统的压力增速变大;都市圈处于释放阶段(Ω)时,系统相应指标得分显著下滑,压力增大,尤其是生态子系统在这一阶段经历了全方位的衰退,只有社会子系统状态指标得分在缓慢上升,此时的系统处于极不稳定的阶段;都市圈处于重组阶段(α)时,系统压力减小,系统与子系统的状态均重回上升态势,响应指标得分也开始缓慢增长。

表6 南京都市圈社会生态适应性分维度得分变化率均值

Table 6 Average change rate of sub dimension score of social ecological adaptability in Nanjing metropolitan area

	社会子系统 Social subsystem			生态子系统 Ecological subsystem			社会-生态系统 Social-ecological system		
	P	S	R	P	S	R	P	S	R
快速增长 Growth or exploitation(γ)	0.351	0.596	0.612	-0.129	0.498	1.844	0.304	0.459	0.385
稳定守恒 Conservation(K)	-0.095	0.191	0.491	-0.239	0.027	0.549	0.112	-0.211	0.194
释放 Collapse or release(Ω)	0.108	0.036	-0.099	-0.197	-0.360	-0.278	-0.055	-0.295	-0.104
重组 Reorganization(α)	0.078	0.106	0.204	0.180	0.106	0.245	0.123	0.098	0.096

P:压力 Pressure;S:状态 State;R:响应 Response

整体来看,自2000年至2019年,南京都市圈社会生态适应性呈上升趋势,且适应性上升的阶段超过全阶段的80%,表明过去近二十年里都市圈整体发展良好,社会-生态系统的交互适应能力在循环往复中逐渐上升,随着国家和地方政府对生态环境保护和修复的日益重视,生态子系统适应性在未来仍有提升空间。仅有2003年、2008年和2013年的社会生态适应性呈现下降趋势,主要是由生态子系统适应性下滑造成的。说明城市发展对生态环境造成负面影响,而生态环境恶化对整个都市圈社会-生态系统的适应性造成冲击。社会-生态系统经历了3个适应周期。第一个周期中,都市圈GDP和城镇化率迅速增长,风险压力累加但系统响应能力并不高,同时该阶段区域发展较不平衡,都市圈的协调、持续发展受到阻碍^[75],各种因素的累加导致了2002—2003年的释放阶段。第二个周期始于2003年,系统适应性在2003—2007年显著回升,都市圈从“非典”疫情中逐渐复苏,2006年底,南京都市圈经济总量超过7300亿元,取得一定发展成果^[76],2007年都市圈发展又遇瓶颈,此前南京都市圈城镇化工业化加速发展,多数城市处于第二产业占比增长,第三产业占比下降的阶段^[77],地区面临发展低效的问题,这一进程侵占了大量生态空间,直接导致了生态环境承载力不足;第三个周期中社会子系统一直处于较稳定的上升趋势但系统压力有所增加,周边城市的产业在该阶段逐步优化,都市圈经济结构也逐步从点轴结构趋于网络结构^[78],2012年的转折也是由于生态子系统适应性下滑所

致,该阶段内系统压力再次上升到较高水平,2013 年以后,系统整体发展速度较缓慢且生态子系统发展波折,属于“重组阶段”;从 2018 年开始,两个子系统和系统整体具备了“快速增长阶段”应有的特征,系统重新进入快速增长阶段(γ),并开始了新一轮的适应性循环(图 8)。

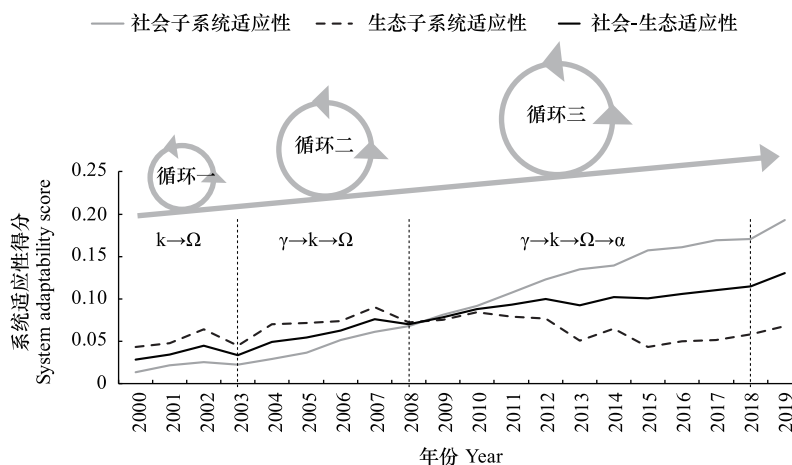


图 8 南京都市圈社会-生态系统适应性演进动态与循环周期

Fig.8 Adaptive evolution dynamics and cycle of social-ecological system in Nanjing metropolitan area

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 基于社会-生态系统适应性动态变化的区域生态治理策略

区域社会生态适应性演进的过程是动态的,区域内各个城市彼此联系,相互影响^[79-80]。区域实现整体最优,不仅需要平衡社会与生态子系统的关系,避免牺牲环境效益的“粗放式发展”,同时也要在做好顶层设计的前提下为处于不同阶段的城市制定差异化的发展战略。

根据南京都市圈过去 20 年里三个循环周期年逐渐增长的演变规律,新一轮循环经历的时间很可能大于十年,且循环中各个阶段演化所需时间也会相应增加,快速增长的趋势还将持续一段时间,随后增速放缓进入长时间的稳定守恒阶段,这一阶段的都市圈的适应性将保持稳定的小幅增长。21 世纪以来,南京都市圈社会-生态系统适应性的波动与衰退基本上由生态子系统适应性下滑造成。社会子系统的正向演进,以及它与生态子系统适应性发展的负相关性表明都市圈在以往的发展中,为追求社会经济效益牺牲了生态环境效益,从长远来看会导致区域生态风险增大,危及整个社会-生态系统稳定。在未来追求区域高质量发展的大背景下,都市圈治理需要转变发展观念和发展路径,省级和市级政府通过出台相关调控措施,加强对生态空间的保护和重点生态屏障的修复,同时还需要推动生态环境联防联控和区域层面的智慧治理,共同构建区域生态安全格局。在此前提下,都市圈生态子系统适应性将持续改善,与社会子系统趋于协调发展。同时,在都市圈跨行政区域治理实践中,需要分层级部署跨区域的职能部门,切实发挥都市圈决策层、协调层和执行层的作用。此外,由于都市圈社会-生态系统具有动态演进的特点,需要根据其所处阶段与发展特征对都市圈的发展计划进行修正,通过正向引导加强对风险的响应,确保都市圈整体优化发展。

就城市尺度而言,目前南京都市圈的发展存在很大程度的不均衡,城市间社会-生态系统适应性差距较大。因此都市圈的发展需要促进中心城市与周边城市更高质量一体化发展为导向,在产业体系协作分工、基础设施互联互通、生态环境共保共治等方面提升都市圈一体化发展的水平^[49]。针对处于稳定守恒阶段的宣城、南京等市,其社会子系统适应性均处于增长趋势中,生态子系统适应性也在平稳发展中有所提高,面对新的发展形势,城市应着力提升系统韧性,可以适当发展绿色产业、培育低碳服务业,同时开展智慧生态治理,使

子系统适应性稳中有升;针对处于快速增长阶段的淮安、滁州等市社会子系统过快增长可能造成生态子系统“透支”,存在生态环境恶化的可能性,为日后释放阶段埋下隐患。因此当前处于该阶段的城市需要在提升城市发展水平的同时关注社会子系统和生态子系统的协调发展,通过完善环境保护相关条例规范、出台污染防治相关政策、推广清洁能源、保护生态多样性等方式改善生态子系统质量,提升生态子系统对风险的响应水平。

“双碳”目标提出后,各个城市积极响应,起草编制相关文件,提出各类减排增汇措施,例如南京市编制了《南京市 2030 年前碳达峰行动总体实施方案》和《南京市绿色低碳循环发展三年行动计划》、扬州市提出将编制专项方案和温室气体清单、芜湖市提出“以碳达峰碳中和倒逼高质量发展”的行动计划等。这些举措将对社会-生态系统的发展产生积极作用,促进系统在较长一段时间内正向循环,即保持在快速发展或稳定守恒阶段,同时社会子系统和生态子系统也有望趋于协调。

4.1.2 适应性循环理论对解析区域社会-生态系统运行机制的价值

区域社会-生态系统作为复杂适应系统,其演变呈现非线性、复杂性的特征,但系统的变化并非完全无章可循。与既往研究采用的历史分析法或综合指标法不同,适应性循环理论与 PSR 框架与区域系统动态、复杂、相互影响的特征相契合,对深刻理解系统中的人地交互关系具有重要价值^[6]。本研究以南京都市圈为例,验证了都市圈社会-生态系统的动态演进符合适应性循环规律,并识别出系统的不同适应性循环阶段。该方法对于城市及区域社会-生态系统的适应性阶段识别具有普适性,能够推广用于其他城市、城镇群、都市圈等不同尺度的社会-生态系统研究。

随着我国双碳目标提出,气候变化带来的危机与挑战受到广泛关注。未来可将碳排、碳汇作为重要指标纳入区域社会-生态系统适应性评估,关注区域和城市的碳排碳汇在不同适应循环阶段的规律,将有利于系统对气候变化及时作出响应。此外,随着未来数据采集方法的改进和技术的提升,区县级等更精细尺度的社会-生态系统演进特征也可做深入探讨。

4.2 结论

本研究结合适应性循环理论与 PSR 框架,从都市圈和城市两个尺度定量评估南京都市圈社会-生态系统适应性演进过程。2000 年至 2019 年,南京都市圈社会-生态系统整体经历了 3 个适应周期,并于 2018 年开始了新一轮的适应性循环,系统适应性呈上升趋势。南京都市圈城市发展对社会子系统产生的多为正向影响,而对生态子系统造成的影响则造成相对较多的负面影响,主要表现在使生态子系统压力上升、状态失稳等。但在 2015 年后,生态子系统适应性下滑趋势得到遏制,逐渐回升,这可能与各市、区《“十三五”生态环境保护规划》及各类污染防治专项计划的制定、环保制度的改革、环境监测及执法的加强相关。

南京都市圈社会子系统与生态子系统的发展曲线呈中低度负相关。地级市层面,90%的城市的社会与生态子系统的发展同样呈现负相关的特征,表明都市圈过去的发展模式在社会和生态两个方面尚未取得协调。

各地级市社会-生态系统在 2000 年至 2019 年间的发展同样印证了适应性循环理论,少数城市目前处于稳定守恒阶段(宣城、南京、芜湖、溧阳);多数城市处于快速发展阶段(淮安、金坛、马鞍山、滁州、扬州、镇江)。都市圈内的城市由于所处发展阶段不同,未来需要采取差异化的发展策略:类别一稳定增长型城市未来发展需要保持现有优势;类别二波动增长型城市的整体系统和社会、生态子系统中速发展,但生态子系统发展不稳定,这是造成其系统整体波动的原因,这类城市未来应采取长期稳定的措施保护区域生态环境;类别三不均衡发展型城市,其社会子系统发展速度最快,对系统整体发展贡献最大,但生态子系统轻微倒退,这类城市应转变发展观念,政府需要对高耗能高污染的中小企业加强管理,提升区域发展效率、补齐环境短板;类别四属于生态危机型城市的生态子系统经历过或正在经历明显衰退的阶段,在该类城市的发展过程中,对生态环境的保护就更为迫切,需要采取较强硬的措施遏制污染、改善环境。

参考文献 (References):

- [1] Lenton T M, Williams H T P. On the origin of planetary-scale tipping points. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(7): 380-382.

- [2] 李嘉艺, 孙璵, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估——以长江三角洲城市群为例. 生态学报, 2021, 41(07): 2609-2621.
- [3] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 吴孔森. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟. 地理学报, 2016, 71(07): 1172-1188.
- [4] 范冬萍, 何德贵. 基于 CAS 理论的社会生态系统适应性治理进路分析. 学术研究, 2018(12): 6-11+177.
- [5] 孙晶, 王俊, 杨新军. 社会-生态系统恢复力研究综述. 生态学报, 2007(12): 5371-5381.
- [6] 李文龙, 匡文慧, 吕君, 赵中华. 北方农牧交错区人地系统演化特征与影响机理——以内蒙古达茂旗为例. 地理学报, 2021, 76(02): 487-502.
- [7] Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J. Adaptive governance of social-ecological systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2005, 30: 441-473.
- [8] Eakin H, Luers A L. Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2006, 31: 365-394.
- [9] 卓方勇. 旅游发展下徽州古村落社会—生态系统适应性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [10] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A P. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and society*, 2004, 9(2).
- [11] Holling C S. Theories for sustainable futures. *Himalayan Journal of Sciences*, 2004, 2(3): 12-12.
- [12] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [13] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [14] 陈娅玲. 陕西秦岭地区旅游社会—生态系统脆弱性评价及适应性管理对策研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [15] Holling C S, Gunderson L H. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. [M]. Washington, DC: Island Press, 2002: 125-137.
- [16] 蔡建明, 郭华, 汪德根. 国外弹性城市研究述评. 地理科学进展, 2012, 31(10): 1245-1255.
- [17] Sundstrom S M, Allen C R. The adaptive cycle: More than a metaphor. *Ecological Complexity*, 2019, 39: 100767.
- [18] Angeler D G, Allen C R, Garmestani A S, Gunderson L H, Hjerne O, Winder M. Quantifying the adaptive cycle. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0146053.
- [19] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 陈勇. 生态政策下草原社会-生态系统恢复力评价——以宁夏盐池县为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(08): 117-126.
- [20] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖旅游地社会—生态系统适应性循环过程及机制分析. 经济地理, 2016, 36(06): 185-194.
- [21] 沈苏彦. 基于旅游社会—生态系统弹性测算的旅游开发研究——以苏州为例. 生态经济, 2014, 30(05): 141-145.
- [22] 孙应魁, 翟斌庆. 社会生态韧性视角下的乡村聚居景观演化及影响机制——以新疆村落的适应性循环为例. 中国园林, 2020, 36(12): 83-88.
- [23] 莫悠, 范建红. 恢复力视角下乡村文化遗产演变机制与保护策略研究——以广州莲溪村为例. 中国文化遗产, 2018(06): 74-80.
- [24] 顾寒月, 王群, 杨万明. 旅游地适应性循环模型修正及实证研究——以大别山区金寨县为例. 旅游学刊, 2020, 35(06): 125-134.
- [25] 李勇进, 陈文江. 从生计脆弱性到生计恢复力的转化——以民勤绿洲为例. 鄱阳湖学刊, 2015(04): 19-26.
- [26] 张向龙, 杨新军, 王俊, 刘文兆, 张潇. 基于恢复力定量测度的社会-生态系统适应性循环研究——以榆中县北部山区为例. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(06): 952-956.
- [27] 黄澄. 风景名胜區河流生态系统恢复力研究——泰山西溪河流为例[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [28] 高路. 基于弹性理论的滇池社会-生态系统可持续管理研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2019.
- [29] Zhang L, Huang Q, He C, Yue H, Zhao Q. Assessing the dynamics of sustainability for social-ecological systems based on the adaptive cycle framework: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102899.
- [30] Luers A L, Lobell D B, Sklar L S, Addams C L, Matson P A. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 2003, 13(4): 255-267.
- [31] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. 地理学报, 2015, 70(07): 1052-1067.
- [32] 周炳中, 杨浩, 包浩生, 赵其国, 周生路. PSR 模型及在土地可持续利用评价中的应用. 自然资源学报, 2002(05): 541-548.
- [33] 张继权, 伊坤朋, Hiroshi Tani, 王秀峰, 佟志军, 刘兴朋. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价. 应用生态学报, 2011, 22(01): 189-195.
- [34] 冯科, 吴次芳, 刘勇. 浙江省城市土地集约利用的空间差异研究——以 PSR 与主成分分析的视角. 中国软科学, 2007(02): 102-108.
- [35] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化. 地理科学, 2015, 35(06): 790-797.
- [36] 郭旭东, 邱扬, 连纲, 王静, 张爱萍. 基于 PSR 框架, 针对土壤侵蚀小流域的土地质量评价. 生态学报, 2004(09): 1884-1894.
- [37] 赵艳民, 秦延文, 马迎群, 张雷, 曹伟, 迟明慧, 时瑶. 基于 PSR 的长江口生态系统的健康评价. 环境工程, 2021, 39(10): 207-212.
- [38] 唐丽平. 基于 PSR 框架下的武汉市生态安全评价与对策研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [39] 张静. 基于 PSR 框架的临海工业类企业环境绩效审计评价指标体系构建研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [40] 陈志芳, 李晴. 基于 PSR 模型的政府环境绩效审计评价研究——以滇池治理项目为例. 科技与经济, 2019, 32(01): 106-110.
- [41] Wang T D, Cao J X, Zhao Y H, Han L, Liu Z. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi Province, Northwest China based on PSR Model. *Ying Yong Sheng tai xue bao=The Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1563-1572.
- [42] Liao Q, Zhang S, Chen J. An Assessment of Water Resources Shortage Risk in Beijing Based on PSR Framework. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(03): 188-195.

- [43] Xu J, Li B, Yu Z. Safety Assessment of Urban Water Metabolism Based on PSR Framework—Taking Tianjin City as an Example. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 178: 012008.
- [44] 徐浩田, 周林飞, 成遣. 基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究. 生态学报, 2017, 37(24): 8264-8274.
- [45] 刘遗志, 胡争艳. 基于 PSR 模型旅游发展与生态环境耦合协调研究——基于贵州省的实证分析. 生态经济, 2020, 36(03): 132-136.
- [46] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的 DPSIR 研究回顾及展望. 生态学报, 2021(16): 6692-6705.
- [47] 仇惠栋, 石小磊. 全国政协委员: 希望把南京列入国家中心城市. (2016-03-06) [2021-09-30] https://www.sohu.com/a/62098831_124714
- [48] Li H, Liu Z, Zheng L, Lei Y. Resilience analysis for agricultural systems of north China plain based on a dynamic system model. Scientia Agricola, 2011, 68(1): 8-17.
- [49] 市政府关于印发南京都市圈一体化高质量发展行动计划的通知. 南京市人民政府公报, 2019(02): 39-45.
- [50] 李元征, 尹科, 周宏轩, 王晓琳, 胡聘. 基于遥感监测的城市热岛研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(09): 1062-1074.
- [51] 周倩倩, 王和平, 许苗苗, 陈朝彬. 基于 GIS 的栅格水文建模法快速评估内涝风险. 中国给水排水, 2015, 31(21): 109-113.
- [52] 张静. 陕南土地景观动态与生态风险变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [53] 洪国平, 王凯, 吕桅樨, 王苗. 典型低碳宜居社区人居环境舒适性评价. 气象科技, 2015, 43(01): 156-161.
- [54] 郑晶, 于浩, 黄森慰. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的福建省生态环境承载力评价及障碍因素研究. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4391-4398.
- [55] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价. 地理研究, 2016, 35(02): 299-312.
- [56] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖社会—生态系统恢复力测度与影响机理. 地理学报, 2015, 70(05): 779-795.
- [57] 杨良健, 曹开军. 基于 DPSIR 模型的伊犁河谷旅游生态安全评价及动态预警分析. 生态经济, 2020, 36(11): 111-117.
- [58] Speranza C, Wiesmann U, Rist S. An indicator framework for assessing livelihood resilience in the context of social-ecological dynamics. Global Environmental Change, 2014, 28: 109-119.
- [59] Chen J, Gao M, Cheng S, Hou W, Song M, Liu X, Liu Y, Shan Y. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997—2017. Scientific data, 2020, 7(1): 1-12.
- [60] Resilience Alliance-Key Concepts. (2021-09-30) [2021-09-30] <https://www.resalliance.org/key-concepts>
- [61] 约翰·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性: How adaptation builds complexity. 周晓牧、韩晖译. 上海: 上海科技教育出版社, 2019: 25-27.
- [62] 李洁, 黄岩, 刘昭贤, 欧德品, 谭琨. 基于高分辨率遥感影像的徐州市区生态环境质量评估. 现代测绘, 2020, 43(01): 36-39.
- [63] 吴赣昌. 概率论与数理统计: 概率论与数理统计, 理工类. 第 5 版. 21 世纪数学教育信息化精品教材. 北京: 中国人民大学出版社, 2017: .
- [64] 镇江市生态环境局. 2012 年第 1 季度镇江市国控重点污染源监督性监测数据. (2012-05-06) [2021-09-30]. <http://sthj.zhenjiang.gov.cn/sthj/qjdxjc/201204/f152b67fb7eb41a2b9a22db82c7a6c9e.shtml>
- [65] 淮安市人民政府. 淮安市“十二五”环境保护和生态建设规划. (2011-06-06) [2021-09-30]. http://sthj.huaian.gov.cn/col/13403_336214/art/1647607715434W6CXhJt2.html
- [66] 李小龙. 安徽芜湖新兴铸管污水偷排青弋江 污染十年不改. (2013-11-14) [2021-09-30]. <http://jingji.cntv.cn/2013/11/14/ARTI1384410370526763.shtml>
- [67] 程绩. 江苏 13 城市 10 个严重污染 南京现 2 个太阳. (2013-12-06) [2021-09-30]. <http://news.sohu.com/20131206/n391389082.shtml>
- [68] 王晓易. 马鞍山钢铁被曝严重污染 环保局称机密无可奉告. (2013-12-20) [2021-09-30]. <https://www.163.com/news/article/9GIQ0P100001124J.html>
- [69] 宋阳标. 镇江水污染揭秘. 大经贸, 2012(3): 50-53.
- [70] 周维. 焚烧秸秆致扬州空气重度污染. (2012-06-10) [2021-09-30]. <https://www.chinanews.com.cn/tp/hd2011/2012/06-10/107435.shtml>
- [71] 刘伟伟, 安莹. 南京烧秸秆惹祸 PM2.5 创纪录 全国空气质量最差. (2012-06-10) [2021-09-30]. <http://news.sohu.com/20120610/n345189028.shtml>
- [72] 刘晨. 我市印发新版《滁州市突发环境事件应急预案》. (2017-05-04) [2021-09-30]. <http://www.chuzhou.cn/2017/0504/313107.shtml>
- [73] 南京市人民政府-市政府关于印发南京市大气污染预警与应急处置工作方案的通知. (2013-01-02) [2021-09-30]. http://www.nanjing.gov.cn/zdgc/201302/t20130201_1056225.html
- [74] 扬州市人民政府. 2011 年度扬州市环境状况公报. (2012-06-15) [2021-09-30] <http://www.yangzhou.gov.cn/yzsxxgk/sthj/201210/8fd91a253b4476db97ad43d0c50b777.shtml>
- [75] 胡建渊. 南京都市圈可持续发展研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [76] 俞侃, 颜芳. 苏皖八市打造区域经济联合体. (2007-04-29) [2021-09-30]. <http://news.sohu.com/20070429/n249780610.shtml>
- [77] 许浩, 李欢欣, 刘伟. 近 15 年南京都市圈区域绿地变化研究. 西北林学院学报, 2021, 36(05): 215-222.
- [78] 康洁. 南京都市圈城镇体系现状与动态演变研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [79] 陈睿. 都市圈空间结构的经济绩效研究[D]. 北京: 北京大学, 2007.
- [80] 孟雪, 狄乾斌, 季建文. 京津冀城市群生态绩效水平测度及影响因素. 经济地理, 2020, 40(01): 181-186+225.