

珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究

王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤

(中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275)

摘要: 城市韧性是新兴的研究话题,其实质为城市面对不确定性扰动的抵抗、恢复及适应能力。本文构建“规模—密度—形态”三维城市生态韧性评价体系,借鉴物理学耦合模型测算2000—2015年珠三角城市城镇化与生态韧性的耦合协调度,并对其时空变化特征进行深入探讨。结果表明:2000—2015年珠三角各市的城镇化水平总体不断提升,生态韧性水平持续降低,两者耦合协调度总体由基本协调向基本失调下滑。在空间分布上,珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调度呈现出以珠江入海口城市为中心、向外围递增的圈层式格局。从生态韧性子系统对城镇化与生态韧性耦合协调的作用来看,规模韧性主要起反向阻滞作用;形态韧性的协调影响力主要为正向,且随时间推移不断增强;密度韧性的正向协调影响力持续下降,且在低于零值后负向增长。以新型城镇化引领区域协调发展,并通过严守三区三线、适应生态承载力、合理布局城市绿地等方法提高生态韧性,是未来珠三角实现城镇化与生态韧性协调可持续发展的主要路径。

关键词: 城镇化;生态韧性;规模韧性;密度韧性;形态韧性;耦合协调度模型;珠三角

DOI: 10.11821/dlxb202104013

1 引言

1978年改革开放以来,中国城镇化发展取得了举世瞩目的成就,常住人口城镇化率由1978年的17.9%跃升到2018年的59.6%^[1]。城镇化在物质上根植于生态环境,人类对生态服务的需求构成了城镇化得以持续的前提。但与此同时,城市生态系统也遭受着无法完全避免的扰动和冲击,这一方面来自自然规律引致的各种灾害;另一方面是由人类粗放的发展模式带来的生态失序^[2]。面对城镇化过程中人类越来越多的压力和侵占,城市生态系统亟需提高其韧性——即抗冲击能力、自适应能力及冲击后恢复力,从而实现对这些扰动的消解和吸纳。在此背景下,研究城镇化与城市生态韧性间交互影响的规律显得至关重要,同时,认清部分城市生态韧性滞后的根本原因可以为两者的协调发展提供政策依据。

“韧性”(Resilience)意为“回复到初始状态的能力”^[3]。Holling首次将韧性概念应用到系统生态学领域,用以定义生态系统稳定状态的特征^[4]。而随着相关研究逐渐从自然生态学向人类生态学延展,韧性思想也被拓展到城市领域,为城市韧性的形成和发展提供了研究基础^[5]。目前对城市韧性的研究主要有3个方面:①城市韧性的概念辨析;②

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-12-18

基金项目: 中央高校基本科研业务青年教师重点培育项目(19lgzd09); 广东省特支计划; 广州市珠江科技新星(201806010187) [Foundation: Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.19lgzd09; Guangdong Special Support Program; Pearl River S&T Nova Program of Guangzhou, No.201806010187]

作者简介: 王少剑(1986-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110011019M), 研究方向为城市地理、城市与区域规划。E-mail: 1987wangshaonian@163.com

973-991 页

城市韧性的水平测度；③ 韧性城市规划的理论框架。总体而言，学界对城市韧性的定义已形成一定共识，其包括城市系统自身的协调组织能力与应对外界不确定风险时的抗压与恢复能力，是城市物质与非物质要素的集成^[6-8]。在此基础上，既有研究采取不同的视角与方法对城市韧性水平进行了量化评价^[7, 9-12]，并为韧性城市的规划建设提供了基本思路^[3, 13-14]。从研究内容来看，学者们的侧重点已由建成环境向社会动力机制迁移，城市韧性的理论研究框架正逐步展开，将会成为分析和解决城市问题的一个崭新切入点。

然而，作为一个新兴话题，城市韧性的相关研究尚存在争议之处。纵观已有的韧性评价体系，由于数据可得性的不足，其中的二级指标往往难以深入体现韧性的本质内涵。以生态韧性这一维度^[7, 12]为例，既有研究较好地反映了当前城市在生态环境建设、污染物控制等方面的“水平”，但不能完全代表城市抵抗外界灾害和支撑人类消费的“能力”。另一方面，对城镇化与生态环境耦合关系的探讨是人地关系研究中的重要一环，学界已在这一领域做了大量的理论与实证分析^[13]。在现有框架中，学者们多基于系统论范式，利用耦合协调度模型、灰色关联度模型等多种计量方法对城镇化与生态环境的交互胁迫效应进行测度，得到了显著的时空分异特征^[15-19]。与此同时，越来越多的研究关注城镇化与生态环境间耦合关系的动态变化，尝试采用SD、人工智能、综合集成等技术方法进行耦合关系的动态模拟^[20]。

总体而言，目前学界对于城镇化与生态环境耦合关系的研究已趋于成熟，但从韧性视角出发，对城镇化与生态韧性间交互关系的探讨则较为匮乏。其研究意义在于：一方面，城镇化与生态环境之间的作用机制复杂，单一范式的研究已难以满足指导规划实践的需要；另一方面，在国土空间规划的背景下，对于生态环境水平滞后的区域，如何将问题反映到城市与生态环境的空间联系上，进而在空间规划层面给出更具操作性的指导意见，是仍待解决的问题。本文将韧性概念引入城市生态系统的研究框架中，并借鉴物理学耦合模型，分析珠三角城市城镇化与生态韧性耦合协调关系的时空分异。同时，参考修春亮等^[21]提出的韧性评估方法，基于城市空间在规模、密度、形态3个方面的特征，重新构建了生态韧性的评价体系，以贴合韧性的本质内涵。最后，通过对城镇化与3大韧性子系统间耦合协调关系的比较研究，尝试指出各城市内部推进或阻滞城镇化与生态韧性协调发展的具体原因，为促进珠三角地区的协调与可持续发展提供路径依据。

2 理论机制

2.1 城镇化和生态韧性的内涵

城镇化是一个经济结构、社会结构和生产生活方式发生根本性转变、涉及多种因素的复杂过程。已有研究主要将城镇化的内涵概括为人口、经济、空间、社会4个方面^[22-24]，其内在逻辑可理解为：人口城镇化是核心，经济城镇化是动力，空间城镇化是人口、经济城镇化在地域空间的表征，是城镇化的载体，社会城镇化是伴随着这一过程的人们生活方式、行为习惯、价值观念等的转变^[25-26]。在生态韧性方面，本文以“规模”“密度”和“形态”3个子系统共同构建起城市的生态韧性评价体系。其中，规模韧性表示城市生态基础设施服务范围与其建设规模的相对关系，密度韧性指代城市生态系统对人类资源消费的支撑能力，而形态韧性则反映了城市中生态空间布局的科学性。

2.2 城镇化与生态韧性的交互关系

城镇化主要通过人口增长、经济发展和空间扩张来建立与生态韧性的联系。人口城镇化主要体现为城市人口密度的增加及消费水平的提升，这将导致人类向生态系统索取

的力度增大,损害城市密度韧性。经济城镇化则主要体现为生产规模与产业结构的变迁,它对密度韧性具有双重作用^[16]:一方面,工业等非农生产活动的扩张将增加资源消耗,致使密度韧性受损;另一方面,经济总量的增加将带来更多环保投资,随着生产方式和清洁技术的进步,企业对资源环境的消耗与污染减少,密度韧性受到的损害有所减弱。

同时,人口与经济城镇化推动了城乡地域景观转变,即空间城镇化,主要体现为城市建设密度的增加和地域范围的扩展。这一过程将直接导致适宜建设用地面积缩减,而建设用地的无序蔓延更会对生态空间造成肢解和侵占^[27],致使规模韧性受损。城市建设用地与生态空间的不合理配置将削弱生态要素在建成环境中的渗透性,降低形态韧性水平。然而随着人们生态意识的提高,合理的空间管制亦逐渐成为减轻城镇化对规模韧性与形态韧性侵害的有效手段。

可见,城镇化对生态韧性的胁迫主要体现在对生态空间消耗、侵占与管治的过程中,其机制可总结为:人口与经济城镇化作为胁迫生态韧性的核心驱动因素,直接作用于密度韧性,同时以空间城镇化为媒介,间接影响城市的规模韧性和形态韧性(图1)。因此,本文将主要从人口城镇化与经济城镇化两个维度来考察城镇化与生态韧性的交互胁迫关系。

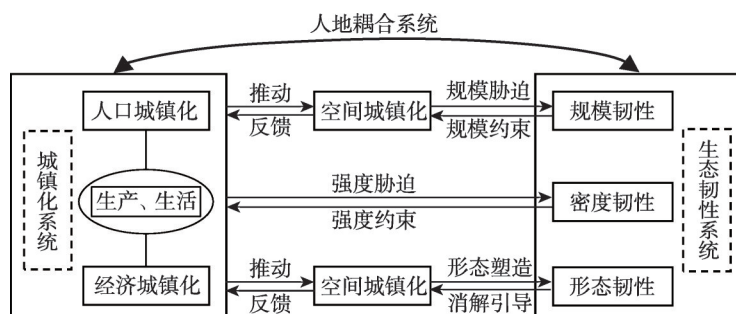


图1 城镇化与生态韧性交互耦合的理论机制

Fig. 1 The theoretical mechanism of coupling relationship between urbanization and ecological resilience

相应地,生态韧性对城镇化存在响应作用:规模韧性通过气象灾害、环境恶化等城市病来约束城市规模;密度韧性则通过生态承载力上限来约束人为活动对自然的消耗强度;形态韧性有助于消解城镇化过程中的热岛效应、内涝灾害等负面影响,因而能够通过恶性环境事件发生的频率及后果来反映城市生态空间配置的合理程度,引导人口与生产布局的调整。综合而言,对城镇化与生态韧性之间耦合关系的研究实际上是聚焦于人地关系的根本矛盾——人类活动压力和资源环境支撑能力之间的矛盾^[28]。

3 研究数据与研究方法

3.1 研究区域

珠三角城市群包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、肇庆、惠州9个地级市(图2)。2000—2015年珠三角地区的城镇化率从71.6%增长到84.6%,始终比全国平均水平高出20%~30%,是中国人口聚集最多、创新水平最高、综合实力最强的城市群之一。与此同时,由于地处海陆结合部,受季风性海洋气候的影响,珠三角的台风、洪涝等灾害发生频繁,直接损失明显。而迅速的城市化和剧烈的人类活动不仅加剧了自然灾害的群发特征,也增加了城市对火灾、环境污染等人为灾害的暴露风险。在此背景

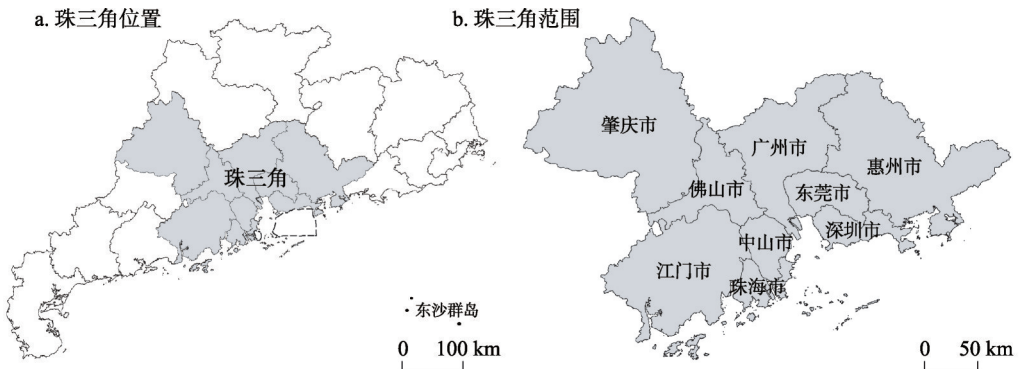


图2 研究范围与区域

Fig. 2 Location and range of the study area

下,如何提高城市的防灾水平、使生态韧性建设追赶上城市化的步伐——这将是珠三角地区必须面临的挑战。

3.2 数据来源

(1) 土地利用遥感监测数据。2000年、2010年、2015年珠三角土地利用遥感监测数据^[29]来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 该数据以 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像为主要信息源, 通过人工目视解译生成, 广东省的解译准确率总体达到 95% 以上。在土地利用分类上, 其一级土地利用类型与《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017) 相一致, 包括建设用地、耕地、林地、草地、水域、未利用地 6 类。本文所使用的栅格数据精度为 100 m, 用于规模韧性中已建设用地面积的汇总、密度韧性中生态承载力的计算, 以及形态韧性中的“源—汇”景观格局分析。

(2) 统计数据。本文所使用的统计数据来自于《广东统计年鉴》(2001—2016)^[30]、《城市建设统计年鉴》(2001—2016)^[31]、《中国能源统计年鉴》(2001—2016)^[32]和《中国城市统计年鉴》(2001—2016)^[33]。统计数据用于城镇化水平的计算、密度韧性中的生态足迹计算。

(3) 其他已出版数据。珠三角地区行政区划数据和陆地生态系统服务价值空间分布数据^[34]均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。前者以 2015 年为标准; 后者为 2015 年的 1 km 栅格数据, 用于规模韧性中生态基础设施的边界识别。

3.3 研究方法

3.3.1 数据标准化和指标赋权 由于部分研究指标存在量纲上的差异, 且其对于相应系统的作用有正有逆, 为了便于综合计算和比较分析, 可采用极值标准化的方法对原始数据进行无量纲化处理^[35]。

$$\text{对于越大越优的正向指标: } Z_{\lambda ij} = (X_{\lambda ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{对于越小越优的负向指标: } Z_{\lambda ij} = (X_{\max} - X_{\lambda ij}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $\lambda = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$, 分别表示年份、地区和指标; X_{\max} 、 X_{\min} 分别表示所有年份所有地区中第 j 指标的最大值和最小值; $Z_{\lambda ij}$ 、 $X_{\lambda ij}$ 为第 λ 年份第 i 地区第 j 指标的标准化值和原始值。经过处理, 所有的指标值都会在 $[0, 1]$ 范围内。

在构建城镇化与生态韧性的综合评价体系时, 为了减少主观因素的干扰、更好地反映指标信息熵值的效用价值, 本文拟采用熵值法计算各个指标的权重系数^[36]。

3.3.2 生态韧性评价指标

(1) 规模韧性。根据景观生态学中的生态基础设施与景观安全格局理论^[37], 城市外

围的山体、森林、水系等是一类能够约束城市扩张的特殊基础设施。当城市建成区规模超过生态基础设施的服务范围或侵占了其应有用地时,城市的灾害应对能力和平衡恢复能力便相应减弱。由此以城市建成区范围与生态基础设施间的比例关系来定义规模韧性^[21]。

生态基础设施(EI)包含一切能提供自然服务的自然保护地系统、林业及农业系统、城市绿地系统、水系以及与之交融的文化遗产和生态游憩系统等^[38]。参考既有研究^[39-40],本文基于珠三角地区生态系统服务价值的空间分布数据,识别出研究区内的重要生态功能区保护红线,并将其与具有明确法律界限的自然保护区等进行空间叠加,获得满足最低生态安全标准的EI边界。规模韧性的计算过程如下:

① 在ArcGIS和Excel中,将珠三角全域内生态系统服务功能的评价结果归一化后,按价值由高到低排列,计算累加栅格值。将累加值占生态系统服务总价值80%所对应的栅格值作为“重要生态功能区”的分界点,把价值评估高于该值的栅格纳入保护红线^[39]。

② 将重要生态功能区与法定的自然保护区、森林公园、风景名胜区、世界文化遗产、饮水水源保护区5类限制用地进行空间叠加,得到珠三角的EI边界。

③ 汇总各城市中EI边界以外的适宜建设用地面积,计算规模韧性,公式为:

$$R_s = L_s / L_d \quad (3)$$

式中: R_s 为城市规模韧性指数; L_s 为EI约束下的适宜建设用地面积; L_d 为已建设用地面积。该公式中 L_s 与 L_d 的运算关系保证了所得结果为正向指标,即规模韧性指数越大,城市建设用地侵占EI的程度就越低,城市的生态韧性越强。

(2) 密度韧性。城市中人类活动的密度直接影响着生态系统的可持续能力,人类的索取行为越“密”,自然环境的压力越大,生态失序的可能性越高。在这一层面,生态足迹理论^[41-43]提出一种直接测算人类索取密度的方式。任何已知人口的生态足迹是指生产人口所消费的资源 and 吸纳人口所产生的废弃物所需要的生产性土地总面积^[43]。已有研究通常把人类消费统一折算为6种土地类型:耕地、草地、林地、化石燃料用地^①、建筑用地和水域。同时,这些生产性土地在城市中的真实覆盖面积被定义为生态承载力。将城市的生态足迹与生态承载力相比较,能够定量判断其经济社会发展是否处于可持续的范围内:如果生态足迹透支了生态承载力,城市便处于生态赤字状态,反之则为生态盈余。本文将使用密度韧性指标来核算这种“供”与“需”的差距^[21]。

参考已有研究成果^[44],确定生态足迹与生态承载力的计算公式:

① 生态足迹:

$$e_f = \sum_{i=1}^n r_i C_i / P_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$E_f = N e_f \quad (5)$$

式中: E_f 为该地区的总生态足迹; N 为区域总人口; e_f 为该地区的人均生态足迹; i 表示消费品类别; C_i 为第*i*种消费品的人均年消费量; P_i 为第*i*种消费品对应的全球标准土地的年平均生产力; r_i 为均衡因子。

根据《广东统计年鉴》(2001—2016)和《中国能源统计年鉴》(2001—2016),分别清算珠三角地区在粮食、油脂类、猪肉、牛羊、禽类、蛋类、奶及奶制品、水产品、蔬菜及菜制品、干鲜瓜果类等10种物质消费与化石能源消费上的人均年消费量,并将其折算为对应的生产性土地面积。由于单位面积耕地、林地、草地等的生产能力差别很大,

① 化石燃料用地表征了人类应该留出的、用于吸收化石燃料消费所产生的CO₂的土地面积,但事实上目前人类并未留出这片土地^[43]。

有必要在每种消费品所需的土地面积前乘以均衡因子 r_i ,以使得各类生产性土地面积具备可加和性。均衡因子 r_i 的选取来源于《1996年世界生态足迹报告》^[41](表1)。

② 生态承载力:

$$E_c = (1 - 12\%) \sum_{j=1}^n S_j m_j, \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

式中: E_c 为该地区的生态承载力; j 表示用地类型; S_j 为该地区现有的第 j 类生产性土地的面积; m_j 为产量因子。

考虑到同一类生产性土地在全球不同经纬度的生产力水平差异较大,本文依据刘某承等^[45]的研究成果,在公式中增加了广东省的产量因子 m_j (表1),其一方面使得各类土地面积间可加和,另一方面还进行了标准化换算,将广东省的土地面积转化为全球标准土地面积。同时,按照世界环境与发展委员会的倡议,全球各区域应留出12%的生产性土地面积以保护生物多样性^[43]。出于严谨性考虑,本文在计算珠三角各城市的生态承载力时扣除了这部分面积。

③ 密度韧性:

$$R_d = E_c / E_f \quad (7)$$

式中: R_d 为城市密度韧性指数。 R_d 的值越大,意味着生态承载力对人类资源消费“包容”的程度越高,城市生态韧性越强。

(3) 形态韧性。“形态”指城市内部建成环境与生态用地的空间组织形式。根据景观生态学中的“源—汇”理论^[46],城市景观可以分为“源”“汇”两种基本类型,其中“源”为建筑等灰色景观,能促进生态负效应;“汇”为蓝色(水体)和绿色(植被)景观,能够阻止或延缓这一过程的发展。当水体、植被等与建成环境保持均衡布局、良好交融时,它们便能对城市内涝和热岛效应等产生吸纳和消减作用,从而提高城市的生态韧性^[21]。因此本文以城市中“源—汇”两种景观间的“平均距离指数”来测度形态韧性。

基于数据特征,本文将修春亮等^[21]的计算方法改进如下:①在ArcGIS中对研究区内的景观栅格重分类,划分为“源”和“汇”两种类型,其中“源”包括土地利用栅格数据中的建设用地,而“汇”包括耕地、林地、草地、水域。②对每一个“源”栅格,计算其到最近一个“汇”斑块边缘的距离,定义为“最近邻距离”。③计算研究区内所有“源”栅格最近邻距离的平均数,即可得到其“平均距离指数”,对应公式为:

$$L_d = \frac{\sum_{i=1}^m \min(d_i)}{m}, \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (8)$$

式中: L_d 为研究区内的“源—汇”景观平均距离指数; $\min(d_i)$ 代表“源”栅格 i 到“汇”斑块的“最近邻距离”; m 表示研究区内“源”栅格的数量。

④ 计算形态韧性指数,公式为:

$$R_m = L / L_d \quad (9)$$

式中: R_m 为城市形态韧性指数; L 为常数,其值是2000年整个珠三角地区的“源—汇”景观平均距离指数值。 R_m 同样为正向指标,当它的值越大时, L_d 越小,说明“源”“汇”斑块间的布局均衡性越强,城市生态韧性越高。

3.3.3 城镇化和生态韧性的指标体系 从人地关系的视角出发,本文确定以“人口城镇化”和“经济城镇化”作为城镇化评价的一级指标,并遵循科学性和数据可获得性原则

表1 珠三角地区生态足迹的均衡因子与产量因子

土地类型	均衡因子 r_i	产量因子 m_j
耕地	2.8	2.88
草地	0.5	1.38
林地	1.1	0.88
水域	0.2	2.01
化石燃料用地	1.1	0.00
建筑用地	2.8	2.88

对二级指标进行筛选，最终建立起由2项一级指标，“城镇化率”、“城市人口密度”、“非农产业从业人员比重”等9项二级指标组成的城镇化系统综合评价体系（表2）。而生态韧性系统综合评价体系则直接由“规模韧性”、“密度韧性”和“形态韧性”3项一级指标组成（表3）。

表2 城镇化综合评价指标体系
Tab. 2 The comprehensive index system of urbanization

一级指标	权重	二级指标	权重	类型
人口城镇化	0.3316	城镇化率	0.0548	+
		城市人口密度	0.1334	+
		非农产业从业人员比重	0.0317	+
		城市常住人口数	0.1117	+
经济城镇化	0.6684	人均GDP	0.1311	+
		第二产业产值占GDP比重	0.0412	+
		第三产业产值占GDP比重	0.0582	+
		城市经济密度	0.1428	+
		固定资产投资	0.2059	+

3.3.4 耦合协调度模型 耦合协调是来自物理学的概念，指不同系统在自身和外界的作用下产生的相互作用。推广耦合度模型到本文中，用以衡量城镇化和生态韧性的交互关系，其公式为：

$$C=\left\{\left(U_1\times U_2\right)/\left(\frac{U_1+U_2}{2}\right)^2\right\}^{1/2} \quad (10)$$

进一步，建立耦合协调度模型，以详细测度城镇化和生态韧性的协调水平：

$$D=\sqrt{C\times T} \quad (11)$$

$$T=\alpha U_1+\beta U_2 \quad (12)$$

式中： U_1 、 U_2 分别代表不同系统的综合评价指数； C 是耦合度； D 为耦合协调度； T 为综合协调指数。耦合度 C 描述了系统间相互作用和影响的程度，但无法反映两个系统的整体发展水平；耦合协调度 D 能够更全面地评价两个系统的发展状况， D 值高说明两系统之间是高水平的相互促进关系， D 值低说明两系统之间是低水平的相互制约关系^[47]。 α 、 β 分别代表两个子系统的贡献份额，根据已有研究^[18]， α 、 β 可解释为两个子系统的相对重要性，且其相对大小基本不会影响模型中耦合协调度的总体走势。本文认为，城市生态韧性水平与城镇化的发展同样重要，因此将两个值均设定为0.5。同时借鉴物理学的划分标准，基于耦合协调度 D 的大小以及城镇化系统 U_1 和生态韧性系统 U_2 间的相对关系，将城镇化与生态韧性的耦合情况划分为4个大类、12个亚类^[48]（表4）。

3.3.5 协调影响力指标 为分析3类韧性指标对总体耦合协调度的影响，在王少剑等^[49]的测算方法上加以改进，构建协调影响力 CI 指标：

$$CI=W_x(D_x-D_y) \quad (13)$$

式中： D_x （ $x=1, 2, 3$ ）表示城镇化与规模韧性、密度韧性和形态韧性的耦合协调度， D_y 表示城镇化与综合生态韧性的耦合协调度； W_x 为3类韧性指标对应的权重系数。协调影响力 CI 能够衡量子类协调对总体协调的影响，其数值正负分别代表推动和阻滞效应，数值大小代表了影响程度。

表3 生态韧性综合评价指标体系
Tab. 3 The comprehensive index system of ecological resilience

指标	权重	类型
规模韧性	0.4473	+
密度韧性	0.3331	+
形态韧性	0.2197	+

表 4 城镇化与生态韧性的耦合协调类型划分

Tab. 4 Classification of coupling coordination degree of urbanization and ecological resilience

类型	耦合协调度	亚类型	U_1 与 U_2 相对大小
高级协调	$0.8 < D \leq 1$	高级协调—城镇化滞后	$U_2 - U_1 > 0.1$
		高级协调—生态韧性滞后	$U_1 - U_2 > 0.1$
		高级协调	$0 \leq U_1 - U_2 \leq 0.1$
基本协调	$0.5 < D \leq 0.8$	基本协调—城镇化滞后	$U_2 - U_1 > 0.1$
		基本协调—生态韧性滞后	$U_1 - U_2 > 0.1$
		基本协调	$0 \leq U_1 - U_2 \leq 0.1$
基本失调	$0.3 < D \leq 0.5$	基本失调—城镇化受阻	$U_2 - U_1 > 0.1$
		基本失调—生态韧性受阻	$U_1 - U_2 > 0.1$
		基本失调	$0 \leq U_1 - U_2 \leq 0.1$
严重失调	$0 < D \leq 0.3$	严重失调—城镇化受阻	$U_2 - U_1 > 0.1$
		严重失调—生态韧性受阻	$U_1 - U_2 > 0.1$
		严重失调	$0 \leq U_1 - U_2 \leq 0.1$

4 结果分析

4.1 珠三角城市城镇化水平分析

从空间格局来看，2000—2015年间，珠三角东中西部城市的城镇化水平差异扩大，说明区域内部的发展不均衡性增强；至2015年，珠三角城市的城镇化水平呈现出广州、深圳“双核领跑”的显著特征（图3）。大部分城市的城镇化水平呈现稳定上升的趋势，但个别城市的变动出现异常。如江门在2010年后城镇化水平出现了下滑，其原因主要是江门作为珠三角外围的传统工业城市，产业转型升级缓慢，镇域经济欠发达，小城镇对人口、企业的集聚效应较差。对东部深莞惠、中部广佛肇和西部珠中江3大都市圈做进一步分析可知，2000—2010年间广佛肇都市圈的城镇化水平增幅最大；而在2010—2015年深莞惠都市圈的城镇化速度显著提升，实现了对广佛肇的反超；珠中江都市圈的城镇化水平和速度则始终处于最低水平。

4.2 珠三角城市生态韧性水平分析

4.2.1 规模韧性 2000—2015年珠三角地区的规模韧性指数持续下降，其中2000—2010年下降较快，而2010—2015年下降趋势减缓，未来珠三角的发展将面临规模安全的约束

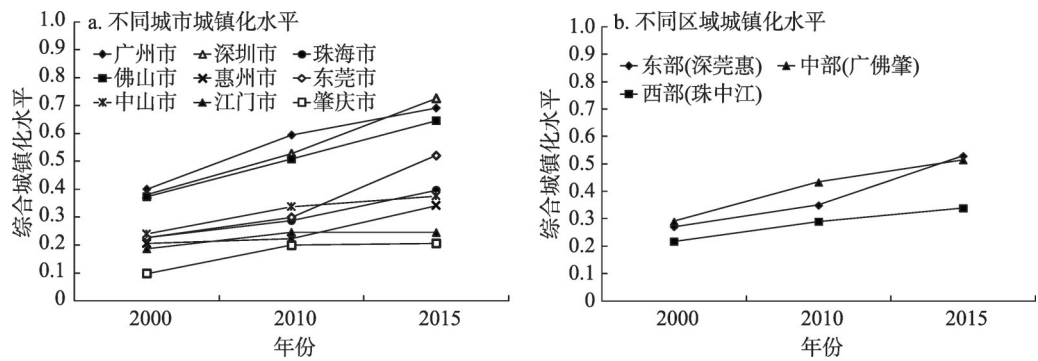


图 3 2000—2015年珠三角各城市及区域综合城镇化水平变化

Fig. 3 The evolution of urbanization degree of cities and regions in the Pearl River Delta, 2000-2015

(表5)。就空间分布而言,珠三角城市的规模韧性整体呈现出中心城市(广州、深圳、珠海、佛山、东莞、中山)低而外围城市(江门、肇庆、惠州)高的格局,且中心城市与外围城市差距明显。这与珠三角的城镇化进程密切相关,21世纪以来,伴随着新兴产业的崛起和新一批人口流入,珠三角中心城市的城镇化水平快速提升,各市普遍采取的粗放型空间发展模式导致了规模韧性的相应变化。2010年后,珠三角中心城市已面临发展空间严重不足的问题,尤其珠江口东岸城市(深圳、东莞)的规模韧性指数已愈发接近指数为1的临界水平(表5)。

表5 2000—2015年珠三角各城市规模韧性指数
Tab. 5 Resilience index of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

城市	已开发建设用地面积(km ²)			适宜建设用地面积(km ²)	规模韧性		
	2000年	2010年	2015年		2000年	2010年	2015年
广州	708.054	1183.540	1257.113	4417.095	6.238	3.732	3.514
深圳	493.923	746.907	772.350	1346.315	2.726	1.803	1.743
珠海	127.323	183.679	193.981	1129.710	8.873	6.150	5.824
佛山	491.504	967.901	1046.979	2483.358	5.053	2.566	2.372
江门	458.461	595.465	665.087	6248.908	13.630	10.494	9.396
肇庆	249.645	331.106	358.134	7838.219	31.397	23.673	21.886
惠州	359.835	597.613	645.415	5928.079	16.474	9.920	9.185
东莞	553.752	1041.234	1079.704	1892.422	3.417	1.817	1.753
中山	185.572	423.043	445.965	1242.172	6.694	2.936	2.785
珠三角平均	3628.070	6070.488	6464.728	32526.277	8.965	5.358	5.031

4.2.2 密度韧性 2000—2015年珠三角地区的生态足迹持续高于生态承载力,生态赤字严重,这反映出人口密度过高、能源消耗不合理、粮食不安全等生态隐患。城市间差异仍然显著:相较于3大外围城市,6个中心城市的密度韧性指数长期处于较差水平。其中,深圳市更始终面临着最严重的生态赤字问题(表6)。

2010—2015年随着政府部门对环境保护工作的重视,珠三角各城市的生态赤字恶化趋势均有所缓和,密度韧性指数的下降幅度明显收窄。这一变化主要取决于城市对生态足迹的控制(表6)。珠三角地区的发展实践表明,对于经过快速城镇化和大规模开发的地区,自然基底对生态承载力的制约性较强,通过扩增生态空间的方式来提高城市生态承载力已较为困难。与此同时,转变生产生活方式、节约资源、减少能耗,从而降低生态足迹,则将是未来珠三角城市建设生态文明的重要途径。

4.2.3 形态韧性 在研究期限内,珠三角地区的形态韧性整体经历了先下降后回升的变化过程(表7)。2000—2010年各城市的形态韧性指数均显著降低;但在2010—2015年间,各城市的变化情况不尽相同,广州、珠海、佛山、肇庆、惠州5座城市的形态韧性指数有小幅回升,深圳、江门、东莞、中山4市则持续下降。结合遥感影像,珠三角的形态韧性变化与其城市空间扩张模式密切相关。2000—2010年珠三角城市的空间扩张以填充式、边缘式为主,建设用地连绵布置;而2010年后,各城市的布局形态有所优化,城市建设用地扩张的多种形式并存,组团式发展增加了建设用地至生态空间的可达性。随着中心城市的可建设用地逐渐耗尽,未来珠三角地区的增量建设空间只能向外围江门、肇庆、惠州3市拓展。3大外围城市拥有丰富的生态景观资源,未来开发应充分考虑建设用地和生态空间的关系,主动营造“源—汇”景观高度耦合的城市形态。

表 6 2000—2015 年珠三角各城市密度韧性指数
Tab. 6 Density resilience index of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

城市	生态足迹(万 hm ²)			生态承载力(万 hm ²)			密度韧性指数		
	2000 年	2010 年	2015 年	2000 年	2010 年	2015 年	2000 年	2010 年	2015 年
广州	828.335	1600.175	1830.351	187.383	204.888	211.433	0.226	0.128	0.116
深圳	583.898	1305.864	1542.616	85.245	114.950	124.777	0.146	0.088	0.081
珠海	102.959	196.610	221.536	26.824	27.562	28.101	0.261	0.140	0.127
佛山	444.685	906.387	1007.370	105.719	117.128	117.789	0.238	0.129	0.117
江门	329.102	560.368	612.711	149.367	151.862	151.554	0.454	0.271	0.247
肇庆	281.183	493.816	550.362	179.090	181.967	183.276	0.637	0.368	0.333
惠州	267.951	579.291	644.706	156.574	165.470	166.350	0.584	0.286	0.258
东莞	536.935	1035.526	1119.012	90.103	98.743	98.375	0.168	0.095	0.088
中山	196.900	393.157	435.127	47.506	50.535	50.971	0.241	0.129	0.117
珠三角平均	3571.948	7071.194	7963.791	1027.811	1113.105	1132.627	0.288	0.157	0.142

表 7 2000—2015 年珠三角各城市形态韧性指数
Tab. 7 Morphological resilience index of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

城市	“源—汇”景观平均距离指数			形态韧性指数		
	2000 年	2010 年	2015 年	2000 年	2010 年	2015 年
广州	304.297	315.923	315.239	0.815	0.785	0.786
深圳	560.833	562.260	569.518	0.442	0.441	0.435
珠海	235.261	249.900	246.287	1.054	0.992	1.006
佛山	212.443	316.319	314.872	1.167	0.784	0.787
江门	122.806	136.230	140.238	2.019	1.820	1.768
肇庆	98.173	119.432	118.569	2.525	2.076	2.091
惠州	131.281	148.569	147.647	1.888	1.668	1.679
东莞	180.442	294.512	297.585	1.374	0.842	0.833
中山	239.535	307.397	310.544	1.035	0.806	0.798
珠三角平均	247.884	295.297	294.746	1.000	0.839	0.841

4.2.4 生态韧性 由表 8 可知, 2000—2015 年珠三角各城市的生态韧性指数持续降低, 区域生态安全面临较大威胁。其中, 2000—2010 年各城市的生态韧性指数急剧下降, 区域平均降幅接近 50%; 2010 年后, 珠三角城市规划与建设实践中出现了更多对生态保护的考量, 尽管仍处于快速城镇化阶段, 产业经济和基础设施建设均持续推进, 但是, 各城市生态韧性指数的降幅均明显收窄。在空间结构上, 珠三角城市生态韧性与城镇化水平呈现出相似的中心—边缘形态, 但二者形成鲜明的“错位”关系: 城镇化发展较快的中心城市生态韧性水平较低, 城镇化发展较慢的外围城市生态韧性水平则相对较高(图 4)。这一负相关关系表明, 在新一轮城镇化建设中, 若不积极控制城市扩张规模与开发强度, 珠三角各城市的生态韧性水平极有可能继续降低。

4.3 珠三角城市城镇化与城市生态韧性耦合协调度分析

4.3.1 城镇化与生态韧性耦合协调度的时空分异特征 在时间维度上, 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调度整体呈现出由“基本协调”向“基本失调”发展的下滑特征, 9 市平均水平由 0.51 降低至 0.45(图 5)。2000 年各城市耦合协调度介于[0.38, 0.61], 均处于“基本协调”或“基本失调”阶段, 其中最低值为深圳市。2010 年各城市耦合协调度

介于[0.23, 0.61], 除肇庆外, 其余8市的耦合协调度都出现了不同程度的下降: 深圳市的耦合协调类型由“基本失调”急剧下滑至“严重失调”; 广州、佛山、珠海的下降幅度相对较小, 但仍从“基本协调”落入“基本失调”阶段。2015年各城市耦合协调度介于[0.09, 0.60], 广州、佛山、珠海、惠州、东莞5市的耦合协调度有所回升, 中山、江门、肇庆3市的下降幅度收窄, 而深圳市的下降幅度进一步增大。9市中仅有江肇惠3市始终保持在“基本协调”阶段。

这一变化是由城镇化水平的不断提升和生态韧性水平的不断降低两方面原因所导致的, 反映出珠三角城市自改革开放以来以牺牲土地、资源和环境为代价的粗放型城镇化: 一方面凭借大量廉价土地吸引外资企业投资设厂, 造成建设用地的盲目扩张; 另一方面吸收大量劳动力, 推动制造业崛起, 造成日趋严重的生态赤字和环境污染问题。随着生态韧性的制约效应愈发显著, 这种重速度轻质量的城镇化模式已难以为继。

在空间维度上, 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调度呈现出以珠江入海口城市为中心、向外围递增的圈层式格局(图6)。这与各城市的生态禀赋和发展时序差异有关: “内圈层”的深圳市是珠三角经济建设的先行示范区, 但生态韧性的基础较差且在研

表 8 2000—2015年珠三角各城市生态韧性指数
Tab. 8 Ecological resilience index of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

城市	城市生态韧性		
	2000年	2010年	2015年
广州	0.195	0.095	0.084
深圳	0.055	0.006	0.000
珠海	0.280	0.161	0.149
佛山	0.221	0.078	0.068
江门	0.569	0.391	0.355
肇庆	1.000	0.675	0.629
惠州	0.676	0.376	0.349
东莞	0.176	0.053	0.046
中山	0.234	0.085	0.076
珠三角平均	0.378	0.213	0.195

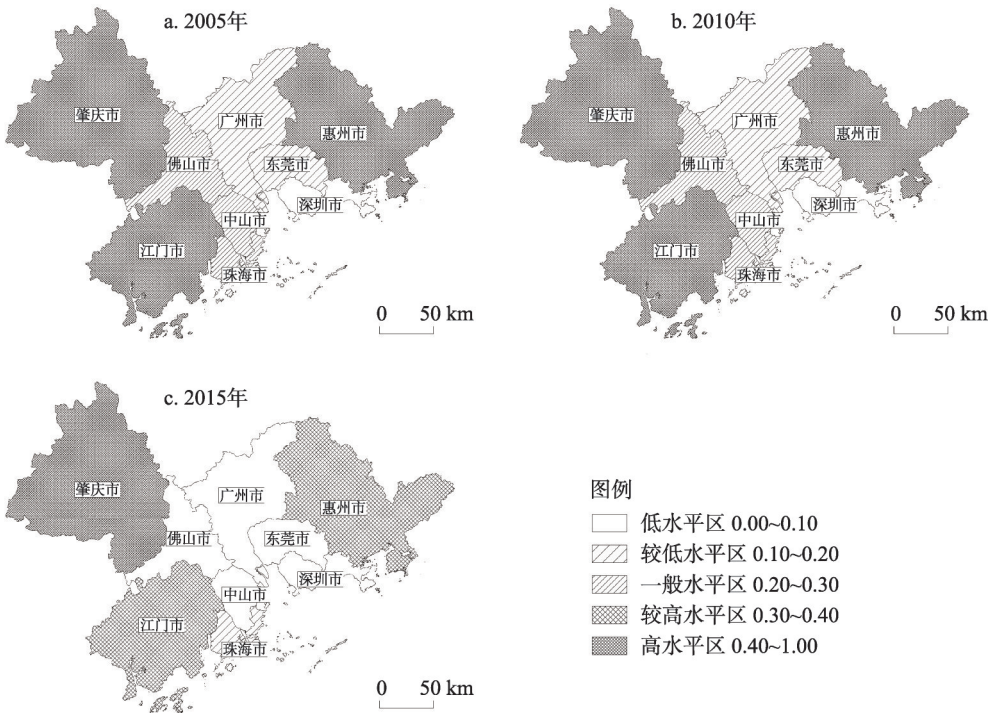


图 4 2000—2015年珠三角各城市生态韧性空间格局
Fig. 4 Spatial distribution of ecological resilience degree of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

究期内急剧退化，与城镇化水平形成严重错位；“中圈层”的广州、佛山、珠海、中山、东莞5市具有相对较高的城镇化水平，快速城镇化进程亦对其生态韧性造成了不同程度的侵害，尽管在研究阶段后期，各市分别通过政策干预和规划手段约束和引导城市发展，但二者的耦合协调度未见明显回升。“外圈层”江肇惠3市拥有良好的生态本底条

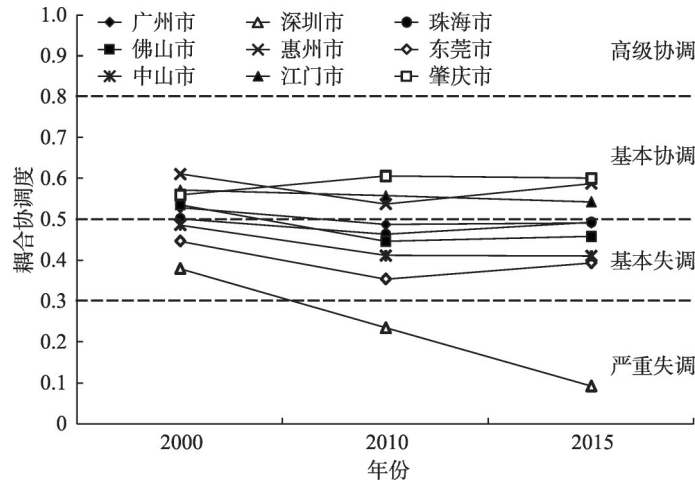


图5 2000—2015年珠三角各城市城镇化与生态韧性耦合协调度的时间演变
Fig. 5 The evolution of coupling coordination degree of urbanization and ecological resilience of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

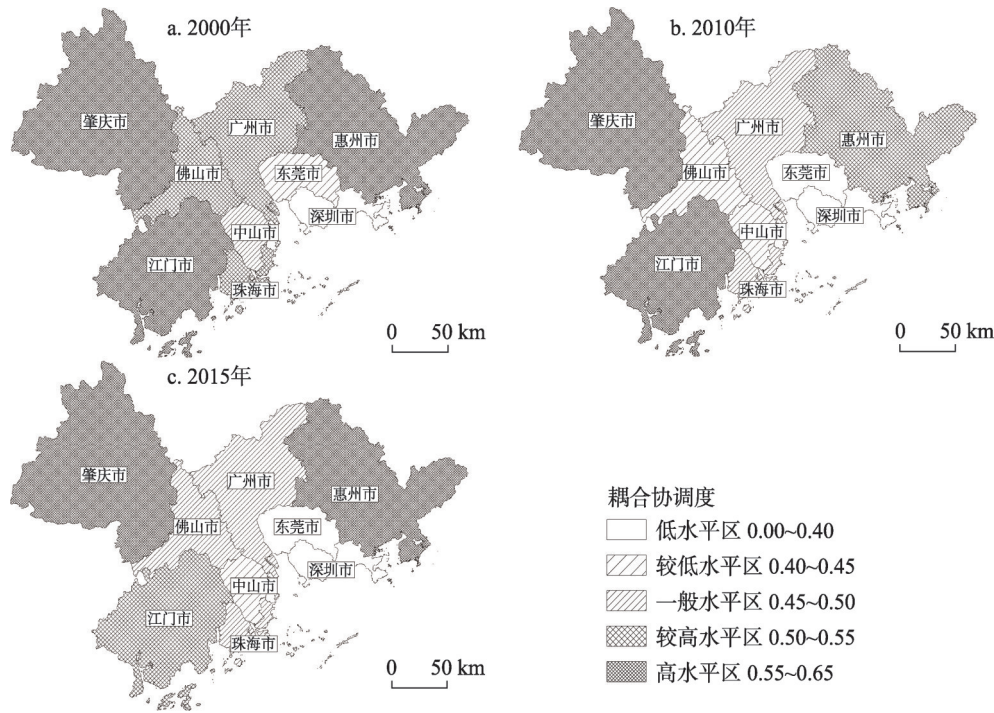


图6 2000—2015年珠三角各城市城镇化与生态韧性耦合协调度的空间格局
Fig. 6 Spatial distribution of coupling coordination degree of urbanization and ecological resilience of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

件，耕地、植被等生态空间储备充足，且城镇化起步晚速度慢，生态韧性对城镇化的胁迫具有较强的承载能力。

4.3.2 城镇化与生态韧性耦合协调类型分析 从城镇化与生态韧性耦合协调类型变化的视角进行分析（图7），发现3大外围城市的耦合协调类型在研究期内均未发生改变，主要表现为城镇化滞后；其余6个中心城市的耦合协调类型则出现了不同程度的倒退，且更多表现为生态韧性受阻。珠三角城市耦合协调类型的变化特征仍然符合上述的3类圈层结构。

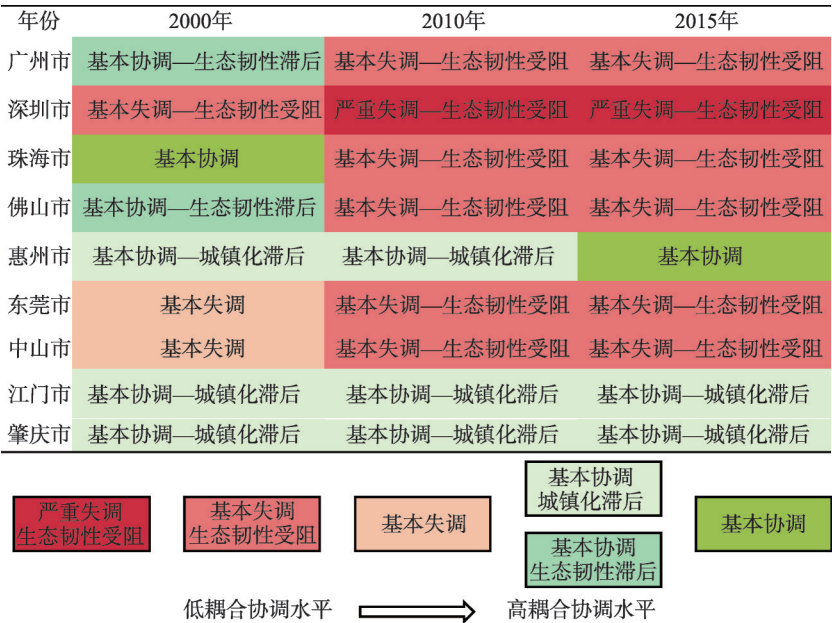


图7 2000—2015年珠三角各城市城镇化与生态韧性的耦合协调类型
Fig. 7 Classification of coupling coordination degree of urbanization and ecological resilience of cities in the Pearl River Delta, 2000-2015

“内圈层”的深圳市是珠三角地区唯一一个在研究期内倒退至“严重失调”阶段的的城市，且生态韧性持续受阻，呈现出“低耦合—低协调”的分离特征。深圳市在2004年完成了人口形态上的城镇化，成为全国首个没有农村行政建制的城市，并在此过程中实施了较为激进的农地国有化转地政策，以供给工业化用地需求^[50]。快速工业化使深圳市建设用地与生态空间的比例严重失衡，至2015年，新增建设用地已近乎耗尽；同时耕地面积锐减、生态承载力降低，致使城镇化与生态韧性极不耦合。

“中圈层”城市中，广州、佛山、珠海的耦合协调类型分别从“基本协调—生态韧性滞后”和“基本协调”转变为“基本失调—生态韧性受阻”，尤其是珠海市，呈现出由“高耦合—高协调”和谐状态向“低耦合—低协调”分离状态倒退的特征。这是由于珠海在城市发展早期以“宜居”为主要定位，确立了不引进“三来一补”、高污染制造业的政策，使生态韧性保持在较高水平；而自“十一五”计划提出工业强市战略以来，经济城镇化进程仍对生态韧性造成显著的胁迫。另外，东莞、中山由于本身生态空间匮乏，在2000年时已进入“基本失调”阶段，2010年后同样转变为“基本失调—生态韧性受阻”。

“外圈层”的江肇惠3市出于区位因素，无法充分接受珠三角核心城市的辐射带动作用，城镇化发展相对缓慢，因而其耦合协调类型在研究期内稳定在“基本协调—城镇化

滞后”。然而,随着2008年广东省“双转移”战略的提出,江肇惠3市相继建立起高标准产业转移园区,主动引进优质工业项目,同时不断推进农村劳动力转移,对城镇化进程形成有效带动。如惠州市已在研究期末进入了“基本协调”阶段。

4.3.3 生态韧性子系统对整体耦合协调度的影响 利用协调影响力指标来反映生态韧性3大子系统对城镇化与生态韧性耦合协调度的作用方向和大小(图8)。

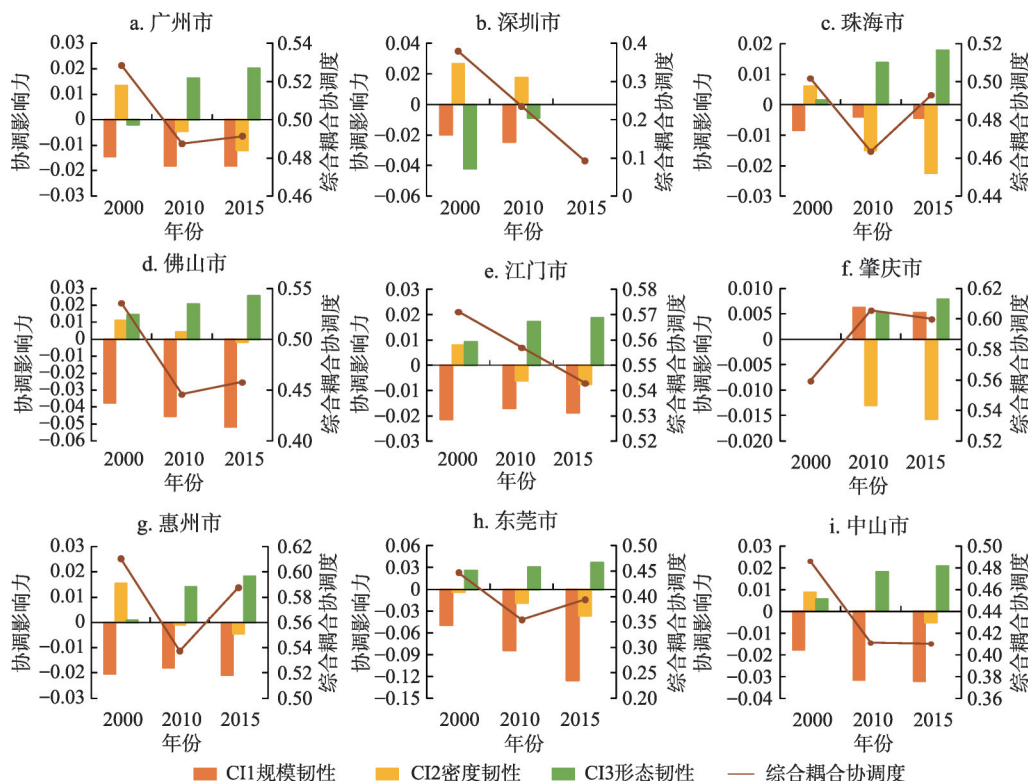


图8 2000—2015年珠三角各城市生态韧性子系统的协调影响力

Fig. 8 Coordinated influence of ecological resilience subsystem in the Pearl River Delta, 2000-2015

2000—2015年珠三角各城市规模韧性的协调影响力普遍为负值,表明其对城镇化与生态韧性的耦合协调度通常起反向阻滞作用。与之相反,除深圳市外,各城市的形态韧性对耦合协调度普遍起正向推动作用,且作用强度随时间推移不断增大。密度韧性对耦合协调度的作用则在研究期内出现方向变化:早期密度韧性普遍起正向推动作用,但在2010年后,其协调影响力持续下降,并在跌破零值后负向增长。

综合而言,规模韧性和形态韧性对各城市综合耦合协调度的影响较大,且由于它们的作用力方向相反,不同城市的协调度变化很大程度上取决于这两大韧性子系统的相互制衡。究其原因,一方面,城镇建设用地的规模扩张没有受到严格约束。2000—2015年珠三角先后进入工业化加速期和房地产繁荣期,导致建设用地需求量迅速增加;同时地方政府出于政绩冲动和财政压力,加快建设城郊产业园区,刺激城市外延。但在另一方面,2008年金融危机后,珠三角各市开始进入调整发展期,强调提高城镇化质量、实现人的城镇化,其中一个重要方面就是对城市空间组织的调整,通过对生态空间可达性的规划引导,城市“源—汇”景观格局得以不断改善。深圳市便是这一过程的典例:21世纪以来,政府把建设花园城市作为战略目标,随着城市更新的推进和绿地系统的完善,

公园已成为深圳新的城市名片,形态韧性的负作用力亦不断降低。值得注意的是,密度韧性协调影响力的方向变化为珠三角地区敲响了警钟,这反映出生态赤字问题已成为珠三角城镇化与生态韧性耦合协调的重要威胁,低碳生活和产业转型升级应该成为未来城市发展的重心。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文着眼于城市韧性的理论视角,构建规模—密度—形态三维生态韧性评价体系,借鉴物理学耦合模型测算了珠三角各城市城镇化与生态韧性的耦合协调度,并对其时空分异特征做出分析,得到的主要结论如下:

(1) 2000—2015年珠三角各市的城镇化水平整体不断提升,生态韧性水平不断降低,城镇化与生态韧性的耦合协调度整体上呈现出由“基本协调”向“基本失调”下滑的趋势。

(2) 珠三角城市城镇化与生态韧性的空间分布形成了鲜明的“错位”关系,二者的耦合协调度呈现出圈层式格局:处于“内圈层”的深圳市城镇化水平高而生态韧性水平极低,二者“严重失调”;处于“中圈层”的广、佛、珠、莞、中5市城镇化水平相对较高,生态韧性为中等水平但同样受阻,二者的耦合协调度在研究期末降至“基本失调”阶段;处于“外圈层”的江肇惠3市生态韧性水平较高,城镇化水平滞后,二者的耦合协调度处于“基本协调”阶段。

(3) 不同韧性子系统对城镇化与生态韧性耦合协调度的作用力不同:规模韧性对两系统的耦合协调度普遍起反向阻滞作用;形态韧性对两系统的耦合协调度普遍起正向推动作用,且这一作用随时间推移不断强化;密度韧性对两系统耦合协调度的作用则在研究期内出现由正到负的方向变化。

总体来看,珠三角城市城镇化与生态韧性的耦合协调度仍处于在波动中不断适应调整的阶段,面临由下滑转向回升的关键拐点。在新型城镇化的要求下,未来珠三角地区城镇化与生态韧性耦合协调度的提高主要指向两条路径,其一是持续发挥核心城市的带动作用,提高外围城市的城镇化水平,推动区域协调发展;其二是通过法律约束和规划引导增强中心城市的生态韧性,主要包括3个方面内容:严格划定三区三线,加强建设用地管控,提高规模韧性;设定并严守资源利用上限,落实低碳生活和清洁生产,提高密度韧性;合理布局城市绿地系统,将蓝绿生态网络穿插于建成环境中,持续发挥形态韧性的正向作用。针对深圳这一典型城市,则应重点寻求破解韧性约束的创新手段,如逐步清退建设用地;加大对粗放型工业用地的二次开发;降低人口与产业密度等。

5.2 讨论

本文所讨论的生态韧性,重点关注人类活动及与之相伴的土地开发行为对生态空间造成的影响,是从城市物质空间结构的侧面所进行的深入探讨。在这一研究体系下,本文偏重于选取与生态空间规模与数量相关的指标,对生态空间质量的量化考虑较少。然而,不同类型生态系统的生态服务价值实际上差异较大,在规模韧性和形态韧性的计算中,本文对生态空间的均质化处理一定程度上忽略了这一因素,因而造成评价结果的不全面,未来可考虑改进研究体系,进行更深入的研究。另一方面,目前在景观生态学领域,已经存在多样化的空间形态量化指标,例如景观脆弱度指数、景观安全邻接指数等,未来也可将其应用至研究体系中,以期获得更具现实指导性的结论。

参考文献(References)

- [1] Xinhua News Agency. China's urbanization rate has risen significantly over the past 70 years. http://www.gov.cn/xinwen/2019-08/15/content_5421538.htm, 2019-08-15. [新华社. 70 年来我国城镇化率大幅提升. http://www.gov.cn/xinwen/2019-08/15/content_5421538.htm, 2019-08-15.]
- [2] Lu Dadao, Yao Shimou, Li Guoping, et al. Comprehensive analysis of the urbanization process based on China's conditions. *Economic Geography*, 2007, 27(6): 883-887. [陆大道, 姚士谋, 李国平, 等. 基于我国国情的城镇化过程综合分析. *经济地理*, 2007, 27(6): 883-887.]
- [3] Shao Yiwen, Xu Jiang. Understanding urban resilience: A conceptual analysis based on integrated international literature review. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54. [邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析. *国际城市规划*, 2015, 30(2): 48-54.]
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [5] Park R E, Mckenzie R D. *Urban Sociology*. Song Junling et al. trans. Beijing: Huaxia Publishing House, 1987. [帕克, 麦肯齐. 城市社会学. 宋俊岭, 等, 译. 北京: 华夏出版社, 1987.]
- [6] Ahern J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 341-343.
- [7] Li Ya, Zhai Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion. *Planners*, 2017, 33(8): 5-11. [李亚, 翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究. *规划师*, 2017, 33(8): 5-11.]
- [8] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5.
- [9] Du Z W, Zhang H G, Ye Y Y. Urban shrinkage and growth: Measurement and determinants of economic resilience in the Pearl River Delta. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1331-1345.
- [10] Najjar W, Gaudiot J L. Network resilience: A measure of network fault tolerance. *Computers IEEE Transactions on*, 1990, 39(2): 174-181.
- [11] Omer M, Nilchiani R, Mostashari A. Measuring the resilience of the trans-oceanic telecommunication cable system. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(3): 295-303.
- [12] Zhang Mingdou, Feng Xiaoqing. A comparative study of urban resilience and economic development level of cities in Yangtze River Delta urban agglomeration. *Urban Development Studies*, 2019, 26(1): 82-91. [张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究. *城市发展研究*, 2019, 26(1): 82-91.]
- [13] Liu Kun. Emergence and theory construction of resilient planning in the background of socialist market economy: Based on urban planning practice in Shenzhen (1979-2011). *City Planning Review*, 2014, 38(11): 59-64. [刘堃. 社会主义市场经济背景下韧性规划思想的显现与理论建构: 基于深圳市城市规划实践(1979—2011). *城市规划*, 2014, 38(11): 59-64.]
- [14] Shi Tingting. From comprehensive defense to resilient cities: Strategic conception of Shanghai's city security in the new normal. *Shanghai Urban Planning Review*, 2016(1): 13-18. [石婷婷. 从综合防灾到韧性城市: 新常态下上海城市安全的战略构想. *上海城市规划*, 2016(1): 13-18.]
- [15] Cui Muhua. The relationship of coupling coordination between urbanization and ecological environment: A case of urban cluster in the central plains. *Economic Geography*, 2015, 35(7): 72-78. [崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系. *经济地理*, 2015, 35(7): 72-78.]
- [16] Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 211-220. [黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. *地理研究*, 2003, 22(2): 211-220.]
- [17] Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247. [刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. *地理学报*, 2005, 60(2): 237-247.]
- [18] Wang Shaojian, Fang Chuanglin, Wang Yang. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2244-2254. [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. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254.]
- [19] Zhang Yin, Yang Qingyuan, Min Jie. An analysis of coupling between the bearing capacity of the ecological environment and the quality of new urbanization in Chongqing. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 817-828. [张引,

- 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析. 地理学报, 2016, 71(5): 817-828.]
- [20] Cui Xuegang, Fang Chuanglin, Liu Haimeng, et al. Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling: A review on theory, methods and applications. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1079-1096. [崔学刚, 方创琳, 刘海猛, 等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展. 地理学报, 2019, 74(6): 1079-1096.]
- [21] Xiu Chunliang, Wei Ye, Wang Qi. Evaluation of urban resilience of Dalian city based on the perspective of "Size-Density-Morphology". *Acta Geographica Sinica*, 2008, 73(12): 2315-2328. [修春亮, 魏冶, 王琦. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328.]
- [22] Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 387-398. [陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.]
- [23] Ou Xiangjun, Zhen Feng, Qin Yongdong, et al. Study on compression level and ideal impetus of regional urbanization: The case of Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 993-1002. [欧向军, 甄峰, 秦永东, 等. 区域城市化水平综合测度及其理想动力分析: 以江苏省为例. 地理研究, 2008, 27(5): 993-1002.]
- [24] Zheng Wensheng, Wang Xiaofang, Li Chenggu. The spatial disparities of regional comprehensive urbanization level of vice provincial city in China from 1997. *Economic Geography*, 2007, 27(2): 256-260. [郑文升, 王晓芳, 李诚固. 1997年以来中国副省级城市区域城市化综合发展水平空间差异. 经济地理, 2007, 27(2): 256-260.]
- [25] Chen fenggui, Zhang hongou, Wu Qitao, et al. A study on coordinated development of population urbanization and land urbanization in China. *Human Geography*, 2010, 25(5): 53-58. [陈凤桂, 张虹鸥, 吴旗韬, 等. 我国人口城镇化与土地城镇化协调发展研究. 人文地理, 2010, 25(5): 53-58.]
- [26] Guo Fuyou, Li Chenggu, Chen Cai, et al. Spatial-temporal coupling characteristics of population urbanization and land urbanization in Northeast China. *Economic Geography*, 2015, 35(9): 49-56. [郭付友, 李诚固, 陈才, 等. 2003年以来东北地区人口城镇化与土地城镇化时空耦合特征. 经济地理, 2015, 35(9): 49-56.]
- [27] Lu Dadao. Urbanization process and spatial sprawl in China. *Urban Planning Forum*, 2007(4): 47-52. [陆大道. 我国的城镇化进程与空间扩张. 城市规划学刊, 2007(4): 47-52.]
- [28] Wu Chuanjun. The core of geographical study: Regional system of man-land relationship. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6. [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. 经济地理, 1991, 11(3): 1-6.]
- [29] Xu Xinliang, Liu Jiyan, Zhang Shuwen, et al. China's multi-period land use land cover remote sensing monitoring dataset (CNLUCC). Chinese Academy of Sciences, resources and environment science data center data registration and publication system (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201. [徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201.]
- [30] Statistics Bureau of Guangdong Province. Statistical Yearbook of Guangdong Province. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016. [广东省统计局. 广东统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.]
- [31] National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Urban Construction. Beijing China Statistics Press, 2001-2016. [国家统计局. 城市建设统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.]
- [32] National Bureau of Statistics. China Energy Statistics Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016. [国家统计局. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.]
- [33] National Bureau of Statistics. China Urban Statistics Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016. [国家统计局. 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001—2016.]
- [34] Xu Xinliang. Chinese terrestrial ecosystem service value of spatial data set. Chinese Academy of Sciences, resources and environment science data center data registration and publication system (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. The DOI: 10.12078/2018060503. [徐新良. 中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018060503.]
- [35] Guo Yajun. Theory, Method and Application of Comprehensive Evaluation. Beijing: Science Press, 2007: 70-73. [郭亚军. 综合评价理论、方法及应用. 北京: 科学出版社. 2007: 70-73.]
- [36] Bai Limin, Feng Xinghua, Sun Ruifeng, et al. Coupling analysis of urban resilience level and urbanization quality in Jilin province. *Urbanism and Architecture*, 2018, 15(35): 19-23. [白立敏, 冯兴华, 孙瑞丰, 等. 吉林省城镇韧性水平与城镇化质量耦合分析. 城市建筑, 2018, 15(35): 19-23.]
- [37] Yu Kongjian. "Anti-planning" Approach. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. [俞孔坚. “反规划”途径. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.]

- [38] Yu Kongjian, Li Bo, Li Dihua. Ecological infrastructure approach for regional protection of natural and cultural heritage: A case study of Fujian Wuyi Mountain. *City Planning Review*, 2008, 32(10): 88-91, 96. [俞孔坚, 李博, 李迪华. 自然与文化遗产区域保护的生态基础设施途径: 以福建武夷山为例. *城市规划*, 2008, 32(10): 88-91, 96.]
- [39] Ma Qi, Liu Kang, Liu Wenzong, et al. Zoning the ecological redline in arid and semiarid regions: Taking Yulin City as an example in the context of an integrated multi-planning. *Geographical Research*, 2008, 37(1): 158-170. [马琪, 刘康, 刘文宗, 等. 干旱半干旱区生态保护红线划分研究: 以“多规合一”试点榆林市为例. *地理研究*, 2018, 37(1): 158-170.]
- [40] Wang Lixia, Zou Changxin, Wang Yan, et al. Methods to identify the boundary of ecological protection red line regions using GIS: A case study in Changping, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18): 6176-6185. [王丽霞, 邹长新, 王燕, 等. 基于 GIS 识别生态保护红线边界的方法: 以北京市昌平区为例. *生态学报*, 2017, 37(18): 6176-6185.]
- [41] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriela Island: New society Publishers, 1996: 192-210.
- [42] Xiong Deguo, Xian Xuefu, Jiang Yongdong. Discussion on ecological footprint theory applied to regional sustainable development evaluation. *Progress in Geography*, 2003, 22(6): 618-626. [熊德国, 鲜学福, 姜永东. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 618-626.]
- [43] Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607-616. [徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-616.]
- [44] Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280-285. [徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.]
- [45] Liu Moucheng, Li Wenhua, Xie Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 592-597. [刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.]
- [46] Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Frontiers of Biology in China*, 2008, 3(2): 131-136.
- [47] Wang Cheng, Tang Ning. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural productionliving-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1100-1114. [王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114.]
- [48] Li Y F, Li Y, Zhou Y, et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 127-133.
- [49] Wang Shaojian, Liu Zhitao, Zhang Tingting, et al. The coupling relationship between multi-dimensional urbanization and the service industry: A case study of Guangzhou. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 450-460. [王少剑, 刘志涛, 张婷婷, 等. 服务业与多维城镇化的耦合协调研究: 以广州市为例. *热带地理*, 2019, 39(3): 450-460.]
- [50] Shenzhen Academy of Social Sciences. Practice in empirical research of shenzhen urbanization. <https://max.book118.com/html/2017/0808/126668775.shtm>, 2015-06. [深圳市社会科学院. 深圳推进城市化的实践于经验研究. <https://max.book118.com/html/2017/0808/126668775.shtm>, 2015-06.]

Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta

WANG Shaojian, CUI Zitian, LIN Jingjie, XIE Jinyan, SU Kun

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Urban resilience is an emerging research topic of urban studies, and its essence is the ability of cities to resist, recover and adapt to uncertain disturbances. This paper first constructs a "Size-Density-Morphology" urban ecological resilience evaluation system, and then uses the coupling coordination degree model to measure the degree of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta from 2000 to 2015, and conducts an in-depth discussion on its temporal and spatial characteristics. The results show that: (1) From 2000 to 2015, the urbanization level of cities in the study area generally increased while the level of ecological resilience declined. The coupling coordination degree between the two systems decreased from basic coordination to basic imbalance. (2) In terms of spatial distribution, the coupling coordination degree between ecological resilience and urbanization of cities presented a circle pattern that centered on the cities at the mouth of the Pearl River and increased toward the periphery. (3) Ecological resilience subsystems played different roles in the coupling coordination between urbanization and ecological resilience. Specifically, size resilience mainly played a reverse blocking role; the influence of morphological resilience was mainly positive and continued to increase over time; the effect of density resilience was positive and continued to decline and further became negative after falling below zero. Leading the coordinated development of regions with new urbanization, and improving ecological resilience by strictly observing the three areas and three lines, adapting to ecological carrying capacity, and rationally arranging urban green spaces, are the main path for achieving coordinated and sustainable development of urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta in the future.

Keywords: urbanization; ecological resilience; size resilience; density resilience; morphological resilience; coupling coordination model; Pearl River Delta