

DOI: 10.5846/stxb202205101304

薛飞,张念慈,夏楚瑜,张健,王楚玥,李淦,周珺.城市生态韧性水平空间评估及其驱动力——以北京市通州区为例.生态学报,2023,43(16): 6810-6823.

Xue F, Zhang N C, Xia C Y, Zhang J, Wang C Y, Li S, Zhou J. Spatial evaluation of urban ecological resilience and analysis of driving forces: A case study of Tongzhou District, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6810-6823.

城市生态韧性水平空间评估及其驱动力 ——以北京市通州区为例

薛 飞,张念慈,夏楚瑜*,张 健,王楚玥,李 淦,周 珺

北京工业大学城市建设学部 城乡规划系,北京 100124

摘要:随着城镇化水平的提高、城镇化进程的发展,城市生态系统逐渐变得脆弱不堪,增强城市生态韧性水平对城市发展起关键性作用。以韧性的核心内涵为基础评估城市生态韧性水平,探究城市防范化解生态风险能力在空间上的差异,从而制定分区生态治理制度,是提升城市防范化解生态风险能力的有效办法。从抵抗力、适应力和恢复力三方面构建了城市生态韧性水平空间评估模型,以 2020 年北京市通州区行政边界、土地利用、重点排污单位、人口等数据为例,评估了 2020 年北京市通州区生态韧性空间格局,并利用空间自相关模型对其分区生态治理进行研究。最后利用地理加权回归分析模型(Geographical weighted regression, GWR)进行驱动力分析,探讨社会经济层面对城市生态韧性水平空间的影响,并提出建设性建议。主要得到以下结论:(1)在空间结构上,通州区生态韧性低值区域最多,占比为 52.80%,主要分布于通州区北部、东北部、中部偏西及东南部;高值区域最少,占比 0.83%,零星分布于偏西部地区和偏南部地区。通州区由于缺乏相对适宜的整体规划和统筹安排,使城市生态系统的循环体系受到了负面影响,从而导致东南地区抵抗力弱。同时,近年来降水点的南移使得大量水资源在城市热岛效应的作用下流失,通州区东南部及通州大运河沿线区域内恢复力呈现出大范围低值水平。(2)通州区中心偏西北地区为副中心的核心地带,呈现低韧性水平-高排污企业密度的集聚分布情况,且生态韧性低值区域主要集聚于新华街、中仓街、玉桥街等区域,说明这些区域的环境生态风险防范化解能力比较低,需要因地制宜地对生态危机做出可持续的分区生态治理,增强区域对生态风险的调节能力。(3)结合 GWR 模型的驱动力分析,城市生态韧性水平主要被城市功能多样性驱动,且城市功能多样性越强,城市生态韧性水平越低,在通州区西北部的城市副中心负向影响最为显著。研究结果为城市生态韧性水平发展优化提供了理论依据,为促进国土空间合理利用和有效保护发挥积极作用。

关键词:韧性城市;城市生态韧性水平;空间自相关分析;分区生态治理;人本视角

Spatial evaluation of urban ecological resilience and analysis of driving forces: A case study of Tongzhou District, Beijing

XUE Fei, ZHANG Nianci, XIA Chuyu*, ZHANG Jian, WANG Chuyue, LI Song, ZHOU Jun

Department of urban construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: With the improvement of urbanization level and urbanization process, the urban ecosystem has gradually become fragile. Enhancing the level of urban ecological resilience plays a key role in urban development. Based on the core connotation of resilience, evaluating the level of urban ecological resilience, exploring the spatial differences of urban ability to prevent and resolve ecological risks, and formulating regional ecological governance system are effective ways to improve urban ability to prevent and resolve ecological risks. In this study, we constructed the spatial evaluation model of urban

基金项目:北京社科基金(22GLC072);北京市自然科学基金面上项目(8202004);北京市社科基金青年项目(19SRC011);国家社科基金重大项目(22ZDA056)

收稿日期:2022-05-10; **网络出版日期:**2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chuyu.xia@bjut.edu.cn

ecological resilience level from three aspects of resistance, adaptability and recovery. We took the data of administrative boundary, land use, key pollutant discharge units, and the population of Tongzhou District in Beijing in 2020 as an example. This paper evaluated the spatial pattern of ecological resilience in Tongzhou District in 2020, and then used the spatial autocorrelation model to study its regional ecological governance. Finally, the driving force was analyzed by using geographic weighted regression (GWR) model to explore the impact of socio-economic level on the horizontal space of urban ecological resilience, and put forward suggestions. The results showed that: (1) in terms of spatial structure, the low value areas of ecological toughness were the most, accounting for 52.80%, mainly distributed in the north, northeast, west-central and southeast areas of Tongzhou District. The high value areas were the least, accounting for 0.83%, which scattered in the western and southern regions. Due to the lack of relatively appropriate overall planning and overall arrangement in Tongzhou District, the circulation system of urban ecosystem has been negatively affected, resulting in weak resistance in southeast China. At the same time, in recent years, the southward movement of precipitation points has led to the loss of a large number of water resources under the action of urban heat island effect, and the resilience in the southeast of Tongzhou District and along the Tongzhou Grand Canal in Beijing presented a wide range of low value levels. (2) The northwest of the center of Tongzhou District is Beijing Municipal Administrative Center, showing the concentration and distribution of low toughness level-high pollutant discharge enterprise density. The low value areas of ecological toughness were mainly concentrated in Xinhua Street, Zhongcang Street, Yuqiao Street and other areas. These indicated that such areas had relatively low ability to prevent and resolve environmental ecological risks, and it is necessary to make sustainable regionally ecological governance for the ecological crisis according to local conditions as well as enhance the regional ability to adjust ecological risks. (3) Combined with the driving force analysis of GWR Model, the level of urban ecological resilience was mainly driven by urban functional diversity. The stronger the urban functional diversity, the lower the level of urban ecological resilience. The negative impact was most significant in the Beijing Municipal Administrative Center. The research results provide a theoretical basis for the development and optimization of urban ecological resilience level, which will play a positive role in promoting the rational utilization and effective protection of land and space.

Key Words: resilient city; ecological resilience; spatial autocorrelation analysis; regional ecological governance; humanistic perspective

韧性(resilience)一词最早来源于拉丁语“resilio”,其本意是“恢复到原始状态”。随着时代的演进,韧性概念被应用到不同学科领域,最早韧性思想被应用到系统生态学中,用来定义生态系统稳定状态的特征^[1]。综合学界对“韧性城市”的各种阐释,可将其核心内涵归结为:指城市系统能够抵御外界的冲击,保持其主要特征和功能不受明显影响的能力^[2],并具有一定自我修复功能。

2002 年联合国可持续发展全球峰会首次把“韧性”概念应用于公共治理领域,将 2030 年构建有韧性的城市 and 人类居住区设置为联合国可持续发展的重要目标之一^[3]。2020 年 11 月 3 日,党的十九届五中全会审议通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出,“增强城市防洪排涝能力,建设海绵城市、韧性城市。提高城市治理水平,加强特大城市治理中的风险防控。”如今我国城镇化进入到“下半程”,城市在经济发展的同时也经历着人口集聚、生态用地被侵占等一系列“城市化”问题^[4],导致城市生态韧性水平空间的破坏,环境质量下降,阻碍了可持续发展的进程。由此观之,大力推动韧性城市的建设对城市系统的提升起到了至关重要的影响。

生态韧性是我国现阶段所着重考虑的维度。在评估框架及模型方面,郑艳、翟建青等以暴雨作为致灾危险性因子,依据韧性理论中的适应性周期假说,构建了包括城市发展能力等城市韧性指数,设计二维系统韧性评价指标体系^[5];王少剑等构建了“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^[6];杜文瑄等以长三角城市为研究对象,构建了

城市经济韧性作用机制模型,利用多维综合评价法对长三角城市经济韧性进行了测度^[7]。大多数学者研究聚焦于生态风险;李嘉艺等耦合适应性循环与区域生态风险评估理论,从整体和动态的角度评估长江三角洲城市群社会-生态系统在当前与未来适应性生态风险的时空分布与各城市所处的适应性循环阶段^[8];余欣等运用 CiteSpace 知识图谱可视化方法,分析国内外生态风险评价的研究进展,从而提出在兼顾国内生态环境的同时也应当充分重视国际环境等指导性启示^[9]。基于人本视角下的分区生态治理的研究寥寥,也忽略了韧性的核心内涵,从而使韧性城市难以以人为本落实于国土空间规划。

鉴于此,本研究从抵抗力、适应力和恢复力三个方面构建了城市生态韧性水平评估模型,从而推导出城市生态韧性水平评估模型。其次,以北京市通州区为例,评估了 2020 年城市生态韧性水平空间格局;并利用空间自相关模型,对 2020 年通州区生态韧性分区管理模式进行了定量探究。最后,基于对城市生态空间的城市体检和人本感知,进行了城市生态空间驱动力分析,为韧性城市系统性生态发展优化提供了理论依据。基于以上研究结果,以期为生态韧性城市建设提出一些可供操作的政策和规划建议,为城市可持续发展提出科学化、规范化理论依据,为促进国土空间合理利用和有效保护发挥积极作用。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区域

以北京市通州区为研究对象,通州区是北京城市副中心,位于北京市的东南角,总面积 906 km²(图 1),北京市通州区行政区划分(图 1)涵盖 11 个街道、10 个镇、1 个民族乡。地势平坦,地形以平原为主,属大陆性季风气候区,春季干旱多风、夏季炎热多雨、秋季天高气爽、冬季寒冷干燥的气候特征,年平均温度 11.3℃。到 2020 年,通州区规划总人口规模控制在 130 万人,人均地区生产总值(GDP)将突破 10000 美元;三次产业增加值总计达到 1200 亿元以上,三次产业构成比例为 2.1%:29.8%:68.0%。

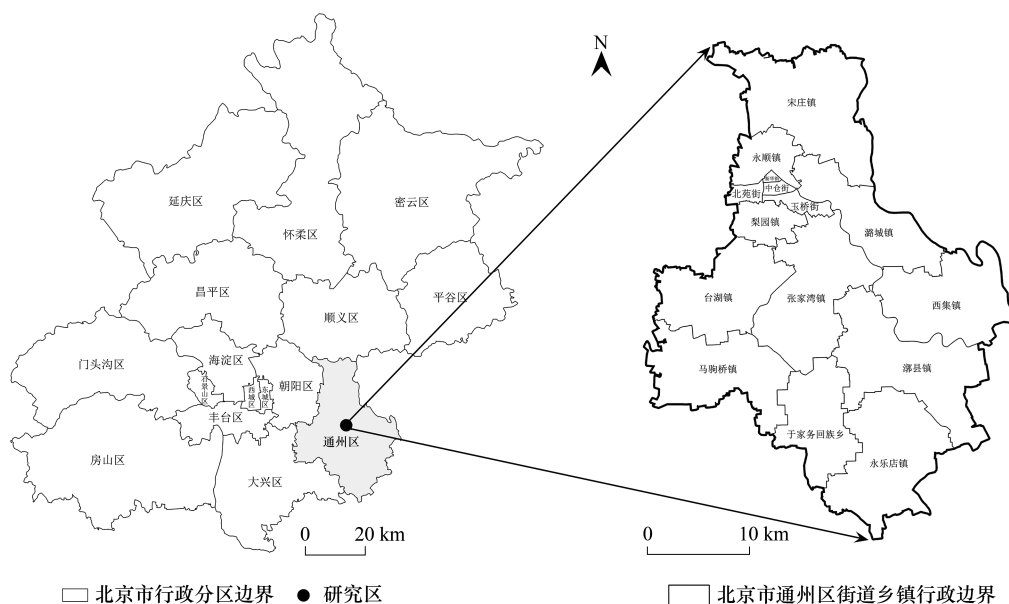


图 1 研究区域
Fig.1 Study Area

1.2 数据来源及处理

本研究采用的数据资料包括污水处理厂、垃圾填埋场、再生水厂等基础数据、社会经济数据及地理信息数据等,每幅遥感图像都经过图像裁剪、大气校正、几何校正的预处理,以网格作为城市生态韧性水平空间评估单元。本文研究所采用的行政边界是 2020 年通州区的行政范围。参照全国土地利用分类方法并结合通州区

具体情况,首选通州区用地类型通过监督分类得到林地、园地、草地、耕地、水域、未利用地、建设用地这七种用地类型。此外,北京市重点排污单位名录来自北京市生态环境局,其坐标信息来自其企业名称与 POI 兴趣点的匹配、百度地图坐标拾取。在驱动力分析阶段,数据主要来源于《北京市通州区统计年鉴》(2021)、《北京市通州区统计年鉴》(2020)、通州区 2020 年国民经济和社会发展统计公报、资源环境科学与数据研究中心 2020 年全国兴趣点 POI 数据(包括北京科教文化服务、北京医疗保健服务)。

2 研究方法 with 模型构建

2.1 城市生态韧性水平的理论逻辑

2002 年国际区域可持续发展协会(ICLEI)定义韧性城市为对于危害能够及时抵御、吸收、快速适应并做出有效反应的城市;2016 年第三届联合国住房与可持续城市发展大会发布《新城市议程》,倡导将“城市的生态与韧性”作为新城市议程的核心内容之一;政府间气候变化专门委员会(IPCC)将韧性定义为用于描述一个系统能够吸收干扰,同时维持同样基础结构、功能的能力和适应变化的能力。城市韧性评价作为沟通理论与实践的桥梁,其韧性评价主要以 SESs 理论、CAS 理论的系统内在演化理论为基础,来评价城市生态韧性水平自控制、自组织、自适应的能力^[1],重点关注如何增强城市对抗冲击的能力,强化城市对灾害适应的过程,并将建设韧性城市作为发展目标。

韧性城市能承受冲击,快速应对、恢复,并持续保持城市功能正常运行,并通过适应来更好地应对未来的灾害风险。其特点是:韧性城市作为一个系统,当外部环境发生变化时,需具备抵御外部冲击、适应变化及自我修复三种能力。

由此可以总结韧性城市包括抵抗力、恢复力、适应力三大特征,用以描述城市生态面对外界风险、扰动时所具有的抗压、恢复和持续发展能力,以“恢复到原初状态”^[2]。相对于风险的事前预警特性,韧性可用于事前评估或事后回溯分析,因此韧性城市若干风险防控管理可以达到“事半功倍”的功效^[10]。

2.2 构建城市生态韧性水平评估模型

城市生态韧性水平评估模型所包含的能力主要可划分为三类:(1)抵抗能力,指自控制能力,即应对并吸收灾害,抵御外部冲击,防止系统状态发生改变的能力;(2)恢复能力,指自组织能力,即系统功能紊乱后恢复到正常运行的能力;(3)适应能力,指自适应能力,即系统适应新环境的能力,美国国家科学院(2012)在韧性的定义中加入了提前准备和制定规划的能力^[7]。城市生态韧性水平由这三种能力复合作用,在对这三种能力进行综合提升,可进一步优化城市生态韧性水平,从而缓解通州区城市生态韧性所受到的外界冲击,例如:整体规划和统筹安排失衡、热岛效应导致水资源流失、高排污企业密度的集聚分布以及城市功能多样性为生态韧性水平带来负面影响等,最终增强城市韧性。因此,本研究从抵抗力、适应力和恢复力三个方面构建城市生态韧性水平评估模型^[10]。

(1)抵抗力:指自控制能力,即应对并吸收灾害,抵御外部冲击,防止系统状态发生改变的能力。由于生态系统抵抗力与其生态系统服务功能密切相关^[11-13],因此通过生态系统服务功能来评估生态系统的抵抗力。Cotanza 等人基于全球生态系统和生物圈,对全球生态系统的服务功能进行了研究并计算了生态系统服务功能的价值。基于他们的研究,谢高地等人结合中国的陆地生态系统给出了更适合中国生态系统服务价值评估的方法,并且被广泛的使用。根据谢高地等人的研究,整理了北京市通州区的各土地类型的生态系统服务功能的价值系数,同时假设建设用地的生态系统服务价值为零,与 Wu 等人的假设也是一致的^[14]。

根据各土地利用类型的生态系统服务价值系数,基于谢高地等^[15,16]的研究,计算通州区的生态系统服务价值的公式如下:

$$P = \text{ESV} = \sum A_k \times VC_{fk} \quad (1)$$

式中,ESV 为生态系统服务价值; A_k 是土地利用类型 k 的面积; VC_{fk} 是土地利用类型 k 的第 f 项生态系统价值系数,其系数来自于北京市土地利用类型的部分生态系统服务价值系数^[17](表 1)。

表 1 北京市各土地利用类型的单位面积生态系统服务价值/(元/hm²)

Table 1 Basic per unit area ecosystem service value of each land use type in Beijing City

用地类型 Land type	气体调节 Gas regulateon	气候调节 Climate regulateon	水源涵养 Water conservation	土壤形成 与保护 Soil formation and protection	废物处理 Waste disposal	生物多样性 保护 Biodiversity protection	食物生产 Food production	原材料 Raw material	娱乐文化 Entertain- ment Culture	总价值 Total value
耕地 Cultivated land	976.39	1862.36	643.26	2923.01	2369.92	649.77	1768.85	139.75	2790.84	14169.16
园地 Garden plot	2507.13	2507.58	2214.31	4204.73	2348.56	2243.59	964.75	1507.48	2149.67	20647.78
林地 Woodland	3201.46	2519.69	3004.11	3470.22	1081.86	2981.92	99.38	2587.35	1201.46	20147.45
草地 Grassland	1927.95	1965.55	1435.16	4129.70	2556.21	2040.43	828.86	120.50	98.23	15102.60
水域 Waters	0	828.57	36709.38	18.01	32746.64	4485.10	180.12	18.01	7817.40	82803.23
未利用地 Unused land	0	0	105.90	70.60	35.30	1200.23	35.30	0	35.30	1482.63
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(2)恢复力:恢复力包括自然恢复力以及人本恢复力。反映生态系统的自组织能力和生态系统受到干扰后的自我恢复与更新能力,指数越大,表示生态系统的承载稳定性越高;反之亦然^[18]。由于自然恢复力、人本恢复力的单位不同,因此本研究将这三者标准化到[0,1]。

自然恢复力:指生态系统遭受危害而恢复原样的能力与潜力^[19]。其测算公式参考根据 Peng 等人提出的生态弹性模型与系数^[14]:

$$R = \sum A_k \times R C_i \tag{2}$$

式中, R 是恢复力, A_k 是土地利用类型,土地利用类型 k 的恢复力系数,由于各土地利用类型的面积不断变化,不同地类的恢复能力具有差异性,为了突出不同土地利用类型的生态系统恢复力,用恢复力系数来表示一个地区生态系统恢复力的大小,生态恢复力系数参考 Peng 等人的研究^[14]。

人本恢复力:随着中国社会经济新常态的趋势,将会有更多的挑战。基于人本视角建设一个发展更加完善的城市,是人民日益增长的美好生活的充分保障,新时代的城市规划正向“人本规划”转型。2021 年 11 月 11 日,中共北京市委办公厅北京市人民政府办公厅印发《关于加快推进韧性城市建设的指导意见》,强调了积极培育城市韧性理念,把韧性城市理念、应急常识和能力教育纳入素质教育。同时应注重完善突发事件信息分级管理,及时回应社会关切。由此观之,以人为本的思想贯彻落实在建设更加完善的韧性城市进程之中。

结合现有研究成果^[20],并考虑到人本恢复力对城市生态韧性水平研究涉及人本要素众多,建立既通用又实用的人本恢复力指标体系难度很大^[21],本研究基于研究区的较小尺度从主观和客观两方面综合考虑人为因素对生态修复能力的影响:基于客观指标的测度方法和基于人本感知的测度方法。基于客观指标的人本恢复力测度方法主要采用社会经济统计数据指数进行计算,如:人均收入、经济多样性等。基于行动者感知的人本恢复力测度方法主要依据区域性出行等时圈数据分析、交通可达性分析、热力数据分析以及人对韧性城市的理念把控程度等。考虑到人本恢复力的尺度特征,将调查问卷资料和区域统计资料相结合^[21],研究不同群体对于“人本规划”中“安居乐业”的基本需求,用于定性和定量讨论人本恢复力与城市生态韧性水平的关系。关注人本恢复力与城市生态韧性水平协调发展,面向“人与自然”二元均衡发展,自然环境要和人本感知融入一体。

(3)适应力:指对城市生态系统未能有效地抵御灾害,而被动更新并形成对新环境、新系统的自适应干扰的能力^[10,22]。由于自然因素和人为因素会对生态系统中的景观结构产生直接干扰,导致景观结构进入不稳定状态,再次适应新环境需要一段时间的调整与平衡^[23]。因此本研究通过借助生态系统景观结构稳定性相关指标,来表述生态系统的适应力。而且生态系统景观结构越稳定,其适应力越高。由于生态系统的景观结构稳定性取决于景观异质性和景观连通性,因此,本研究进一步利用景观指数从景观异质性、景观连通性来评

价景观稳定性,景观指数可以反映景观生态空间格局,对景观区域自然资源的开发、改善和保护以及经营和管理,使景观区域的社会经济得到持续发展^[24]。景观异质性和景观连通性分别描述生态系统景观结构的两个方面,彼此不能替代,因此其权重可假设为相等^[25],具体指标如表 2。

表 2 景观指数及权重

Table 2 Landscape Index and Weight

	景观指数 Landscape pattern factor	权重 Weight
景观异质性 Landscape heterogeneity	香农多样性指数 SHDI	0.25
景观连通性 Landscape connectedness	面积加权平均斑块分形维数 AWMPFD	0.25
	景观破碎度 FI	0.5

(4) 韧性水平:由于抵抗力、适应力和恢复力的单位不同,因此本研究将这三者标准化到 $[0,1]$,计算韧性水平公式如下:

$$\text{Resilience} = \sqrt[3]{A \times P \times R} \quad (3)$$

式中, A 为适应力, P 为抵抗力, R 为恢复力。

在本研究中利用 ArcGIS 10.7 创建渔网(Create Fishnet)将北京市通州区均等分割为个 3847 个 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的网格,表示了 2020 年通州区城市生态韧性水平空间分布情况。

2.3 构建空间自相关模型

空间自相关模型是用于衡量空间变量的分布是否具有集聚性。全局空间自相关能反映整个区域的地域单元与相邻单元的总体聚集特征,但不能凸显局部区域单元的聚集状态;局部空间自相关(LISA)可以准确把握空间单元与邻近单元的聚集性与分异特征^[26],一般利用局部 Moran's I 值统计量进行度量。城市生态韧性水平受到地理要素分布、人本感知、社会发展水平、排污企业分布等因素的影响,且这些因素在空间上均具有随机性和结构性,存在着一定的空间关联性,因此可以运用空间自相关进行分析。本研究依据北京市通州区行政区划分,采用局部空间自相关的 LISA 加以分析,通过计算 Moran's I 值来表现韧性水平在局部空间集聚规律。

2.4 构建驱动力分析模型

由于以最小二乘法(OLS)构建的驱动力分析模型在空间上有一定的局限性,因此以此为基础利用地理加权回归分析模型(Geographical weighted regression, GWR)对城市生态韧性水平进行了进一步的计算与推测。GWR 模型可以将数据的空间位置嵌入到模型中,是一种对区域内自变量和因变量之间的变化关系进行建模的非参数局部空间回归模型^[27]。在本研究采用空间计量经济学理论方法中的 GWR 模型^[28],对城市生态韧性水平驱动因素进行刻画,内嵌了各社会经济驱动因子的空间位置数据,GWR 模型能够分析不同区域的社会经济驱动因子随着地理距离变化的空间作用机制,反映城市生态韧性水平的空间异质现象,并可以实现对参数的局部估计,进而分析社会经济驱动因子对城市生态韧性水平的影响,公式为^[17]:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, Y_i 代表 i 区域内的城市生态韧性水平, $\beta_k = (u_i, v_i)$, ($k = 0, 1, \dots, p$) 为空间地理位置函数, (u_i, v_i) 为区域 i 的空间位置, X_{ik} 代表第 k 个社会经济驱动因子在区域 i 的值, k 为不同区域的个数, ε_i 代表残差。城市作为人类经济社会政治文化活动的重要场所^[29],一类以人类活动为主要特征的“社会—经济—自然复合生态系统”。社会经济的发展在不同区域内存在差异,其明显特征是城市功能多样性存在差异,发展越完善的区域,其城市功能多样性水平越高;并且由于区域在城市发展过程中功能定位的变化,其城市生态韧性水平所受驱动力也随之转变^[30]。自然和人为因素均可以对城市生态韧性水平、空间构型以及斑块特征等产生显著驱动,但人为活动无疑占据着优势地位^[31],在空间上驱动着城市生态韧性水平。

由于人文社会经济作用在短时间小尺度内的强烈程度与合理力度对城市生态韧性水平将产生显著影响^[32],是主要外部驱动力。因此本研究根据 2020 年北京市通州区土地利用情况、人口规模、人本感知、经济发展水平、商业服务设施 POI、公共服务设施 POI 等数据和现有研究结果^[33],选取其中 9 个社会经济指标:常住人口、城镇人口、乡村人口、城镇化率、地区生产总值、第一产业占 GDP 比重、第二产业占 GDP 比重、第三产业占 GDP 比重、城乡建设用地减量,对驱动力进行量化,找出其主导影响因素并分析其内部关联机制。综合其他研究对于城市生态韧性水平驱动因子的分析及探究,以及规划实践过程中实际影响北京市通州区各个行政区划分街区发展的因素,最终选择从社会经济方面再次细化选择 4 个驱动因子:人口^[34]、城市功能多样性^[35-36]、地区生产总值^[37]、产业结构^[34,38]。其中,城市功能多样性结合社会经济指标与人本视角下的问卷访谈结果,从景观满意度、社交舒适性、休闲舒适性、交通可达性四个方面进行测度^[35-36]。利用 GWR 模型,从众多的社会经济指标中找出影响城市生态韧性水平的主要驱动因子,从而进行后续人本视角下的城市生态韧性水平空间格局的预测模拟。

3 结果与讨论

3.1 城市生态韧性水平空间分布分析

城市生态韧性水平是由抵抗力、恢复力、适应力共同作用的结果。

通州区由于受到城市扩张和快速城镇化的影响,且缺乏相对适宜的整体规划和统筹安排,使城市生态系统的循环体系受到了影响,导致绿地减少,生物多样性降低;东南地区的地类由耕地转换为建设用地,林地转换为建设用地,水域和草地均有少量转变为建设用地^[26],生态系统服务价值低,从而导致抵抗力弱。同时,近年来降水点的南移使得大量水资源在城市热岛效应的作用下流失,再加上华北平原水资源缺乏,水源涵养能力弱,导致北京市的水源大部分从外省调用^[18],通州区东南部及通州大运河沿线区域内恢复力呈现出大范围低值水平。

通州区的城市发展重心在西北部近北京市中心地带的抵抗力、恢复力都处于较高水平区域,但其适应力仍为低值水平。其中该区域内北部绿色空间大运河森林公园根据绿地规划建设,一定程度上优化了局部整体的景观斑块多样性、连接性和整体性^[39],使通州区北部部分地区生境质量较高,抵抗力、恢复力为高值水平。由于城市副中心建设较发达,与人类活动关系密切,且在宜居风貌区内绿地分布较分散,绿地尺度较小,斑块密度低,使得景观破碎度高,进而导致适应力下降。北京城市副中心建设,作为非首都功能集中承接地,着力营造多组团集约紧凑发展的生态城市布局,使得大量农村务工人员涌入城市,致使住房用地需求增加,部分耕地转变为建设用地,加剧了耕地资源不足的严峻挑战。综合上述因素,通州区城市生态韧性水平整体呈现出大部分低值水平。

从空间上来看,2020 年通州区城市生态韧性水平区域差异不大,大部分区域处于低值水平。高值区域零星分布于通州区偏西部地区和偏南部地区,中等区域同样为零散的小栅格,生态韧性水平在空间结构上呈分散状态,分布于城市西部、南部;且大面积中等区域中会产生小范围的高值区域。在空间结构上,通州区城市生态韧性水平呈分散状态。城市生态韧性水平低值区域最多,占比为 52.80%,主要分布于通州区北部、东北部、中部偏西及东南部。城市生态韧性水平总体分布情况为韧性水平低值区域空间分布呈现出面状连片;人类活动所导致的城市扩张是生态风险的主要来源,使城市周边大量优质耕地被占用,所以在国土空间规划中应对分区生态治理加以考量。后期的“建设蓝绿交织的森林城市”政策,虽然在一定程度上促进城绿融合发展,但是在建设时没有基于人们的获得感,仍存在没有考虑“以人为本”的规划诉求,导致耕地、林地等大量生态资源被动转变其用地类型,进一步导致通州区生态用地景观破碎,城市生态韧性水平低,对灾害风险应对有着一定的不足(图 2)。

3.2 空间自相关

本研究利用 Arcgis10.7 对通州区重点排污单位进行了核密度分析,并利用 Geoda 对重点排污企业密度进

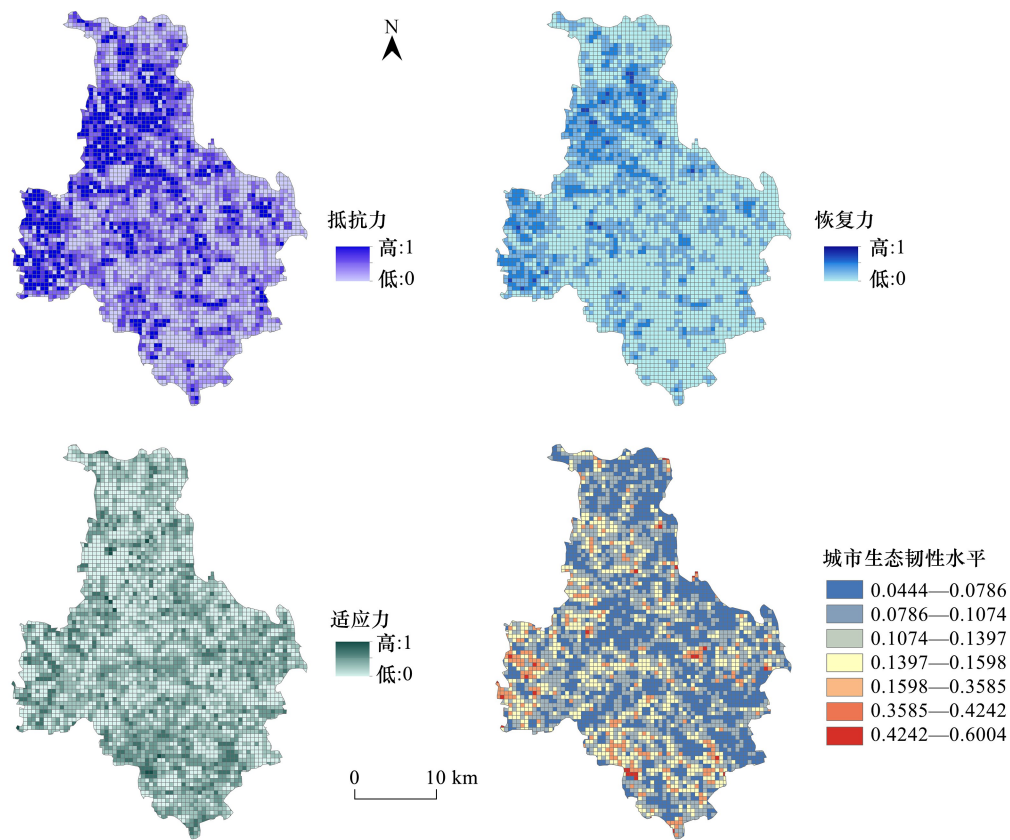


图2 2020年通州区城市生态韧性水平空间分布

Fig.2 Spatial Distribution of Ecological Resilience Level in Tongzhou District, Beijing in 2020

行了单变量空间自相关分析,结果如图3所示。

通过融合GIS技术与数学模型等多种技术手段进行城市生态韧性水平模拟^[40],通过核密度分析可以从空间维度上判断高排污企业的位置与密度,并可针对该区域加大环境监测和生态治理的资金投入,严防重大环境污染事件的发生,不仅可以为生态韧性产生引导,还能指导未来国土空间规划。结果如图3显示,重点排污企业主要集中在通州区的中心区域偏北部和西部,主要为土壤环境污染重点监管单位、水环境重点排污单位,由于北部临近通州大运河,该区域内的水环境重点排污单位起到了承接北京80%的污水排放至关重要的作用。北部和西部两区域地理环境优越,靠近北京市中心城区且交通便利,承接了通州区高污染产业的转移:从2013年开始,通州区一直按照北京市相关要求,进行产业结构调整,对高能耗、高污染、高排放进行逐步调整退出;从2014年下半年开始,随着低端产业的退出,化工、铸造等高污染企业和低端产业和高端产业的进入,按照既定的产业布局目标,通州区的产业结构正在进一步优化。

通过局部空间自相关分析可知重点排污企业分布呈现出较高的正相关性 with 空间聚集性,可以用来判断不同区域环境污染风险程度与城市生态韧性水平之间的联系,从而针对防范化解能力较低区域进行因地制宜地强化,构建基于生态风险防范的区域景观格局,为未来国土空间规划起到一定的引导^[10,41]。由结果图3可知,通州区重点排污企业以高-高型聚集和低-低型聚集分布形式为主,重点排污企业低值区域在研究区内北部、南部至中心、东部出现集聚,而高值区域在中心区域偏北部、西部出现集聚,分布在玉带河、北运河、潞源北街、马驹桥镇等排污热点区域。其中玉带河投入大量资金进行排污沟工程的修建,改变了通州区生态环境,使人民群众可以在玉春园公园健康休闲娱乐。北运河沿线的运河森林公园的建设提升了对北运河水质起到了生物净化的作用。重点排污企业借助林地、水域等生态资源通过发挥其生态屏障作用来阻断不利因素和灾害

的影响,对于提高生态韧性、防范化解生态风险具有重大作用。

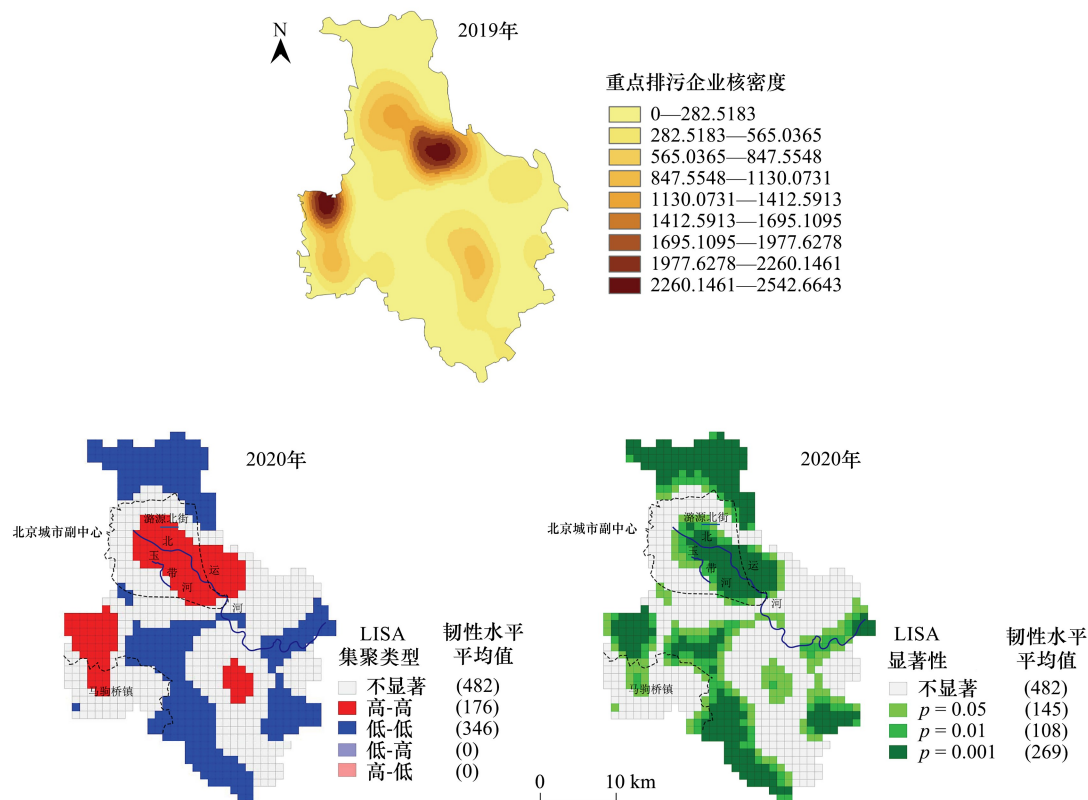


图3 2020年通州区重点排污企业局部空间自相关(LISA)结果

Fig.3 Local Spatial Autocorrelation LISA Results of Key Pollutant Discharge Enterprises in Tongzhou District, Beijing in 2020

此外,韧性水平的空间自相关分析结果(图4),表明城市生态韧性水平低值区域在通州区北部以及中心偏西区域出现集聚,而高值区域在通州区西部、南部出现集聚。其中, P 值用来检验相关性水平, $P < 0.05$ 说明相关性显著, P 值越小相关性越显著。由结果(图4)可知,城市生态韧性水平呈零散的栅格单元分布于通州区内部。为了直观反映各空间单元的局部空间自相关程度,将通州区各空间单元城市生态韧性水平核密度估计值的局部 Moran's I 分解绘制成 Moran's I 散点图,由图4可知,城市生态韧性水平 Moran's I 值为 0.46,表明城市生态韧性水平空间正相关性较为明显,且存在空间集聚的现象。

综合图3、图4,可发现通州区的中心偏北地区呈现低韧性水平-高排污企业密度的集聚分布,这与通州区承接首都功能的城市策略密切相关。通州区中心偏北地区为副中心核心地带,地势平坦,以玉带河、北运河为主要水系,承接了中心城区的以水污染为重点排污单位的转移。由于该区域生态韧性水平比较低,且高排污企业密度高,说明其环境污染风险比较大,但是其防范化解能力比较低。因此需要加大对热点地区的环境监测和生态治理的资金投入,严防重大环境污染事件的发生。

3.3 生态韧性分区治理

针对通州区生态韧性水平局部空间自相关 LISA 结果(图4),按各街道、乡镇边界对其进行划分,如图5。

根据图5可得知,城市生态韧性水平高值区在通州区西部、西北地区及西南地区出现集聚,为台湖镇、于家务乡、永顺镇以及永乐店镇;城市生态韧性水平低值区在通州区分布较为广泛,主要为中心偏北区域、东北地区以及东部地区出现集聚,为新华街、中仓街、玉桥街、宋庄镇、西集镇、潮县以及张家湾与台湖镇的交界处,这些区域内应对环境生态风险的能力较低,要通过加强该区域生态空间保护与建设满足未来国土空间规划的诉求。此外,位于通州区西北部的城市副中心城市生态韧性水平高值区域较少,大多为不显著水平。由此观

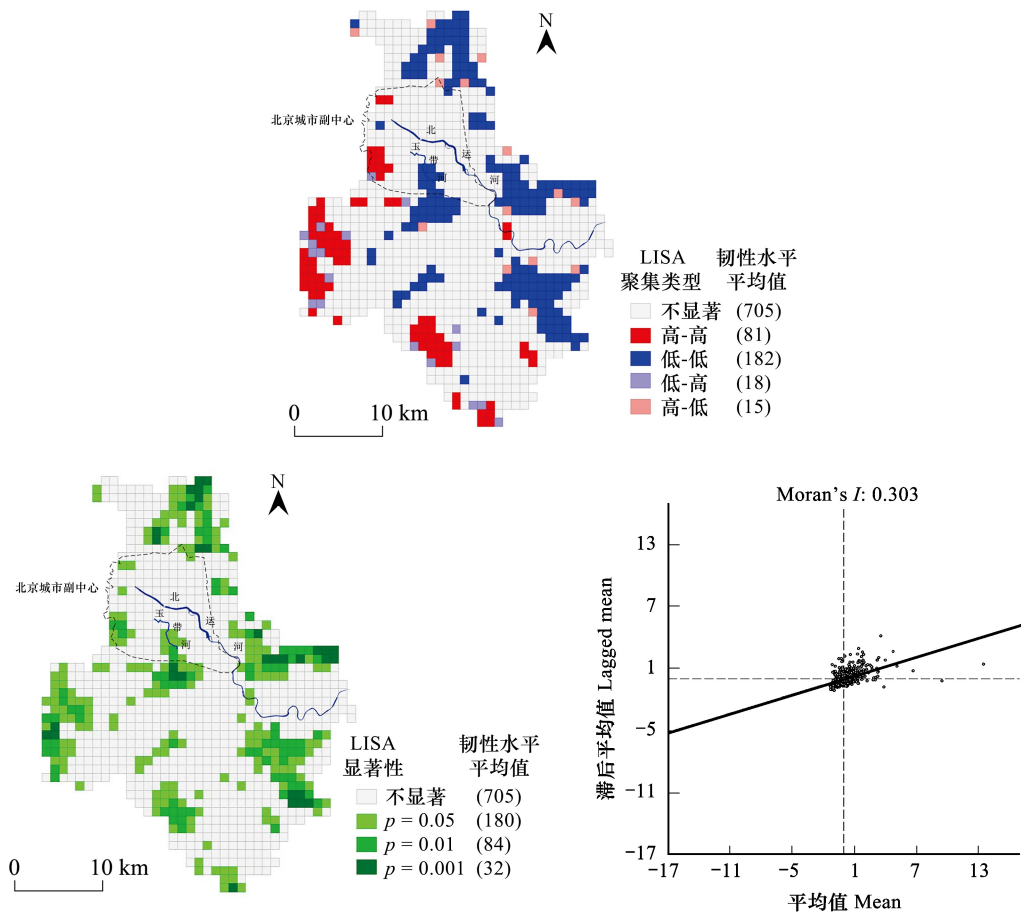


图4 2020年通州区城市生态韧性水平局部空间自相关 LISA 结果及城市生态韧性水平 Moran's I 值

Fig.4 local spatial autocorrelation Lisa results and Moran's I value of ecological resilience level in Tongzhou District, Beijing in 2020

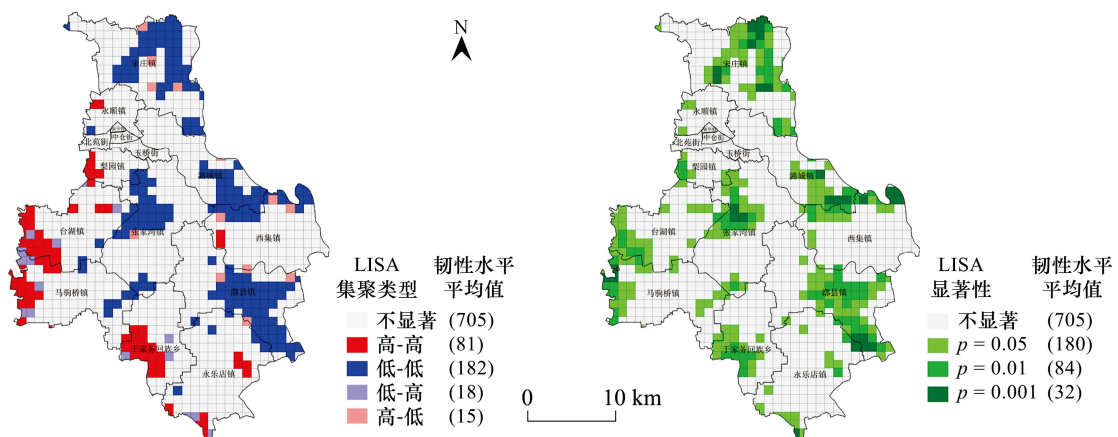


图5 2020年北京市通州区各乡镇、街道城市生态韧性水平局部空间自相关 LISA 结果

Fig.5 Local Spatial Autocorrelation LISA Results of Ecological Resilience Level of Townships and Streets in Tongzhou District, Beijing in 2020

之,在北京城市副中心内以大运河森林公园为代表的线性绿色空间,虽然起着促进周边用地类型演变,以此提升生境质量的作用^[23],但是仍对城市生态韧性水平作用不大。因此在这一核心区域内的生态韧性分区治理

需要更大力度完善生态廊道和丰富生物多样性的功能,从而提高该区域内城市生态韧性水平。

采用 Moran's I 值作为测度通州区城市生态韧性水平在空间上自相关性的指标,基于 ArcGIS 10.7 和 GeoDa 平台,对通州区城市生态韧性水平进行局部空间自相关分析。从乡镇、街道数据来看,53.3%的地区 Moran's I 值高于 0.5,表明通州区城市生态韧性水平表现出较强的空间正相关性;各乡镇、街道的 Moran's I 值内部差异性较小,但乡镇与街道之间 Moran's I 值差异性较大。就 Moran's I 值的具体大小来看,在空间分布上 Moran's I 值最高的区域是台湖镇(图 6),为 0.604,表明城市生态韧性水平空间正相关性最高,在空间格局上其空间变异性相对最弱,表现为集聚的态势;城市生态韧性水平 Moran's I 值最低的区域是新华街(图 6),位于副中心核心地带,为 0.247,表明城市生态韧性水平空间正相关性较为不明显,在空间格局上表现为相对分散,空间集聚现象较弱,与副中心地区韧性水平较低有关。由此可以解读出,在未来城市生态韧性水平稳固及提升过程中,可结合各个乡镇、街道实际情况,基于现有分区采取优先对空间集聚较弱的区域进行改善,积极改善绿色生态空间保护战略,从而对城市生态韧性水平进行整治提升,消除差异化城市生态韧性水平空间格局。

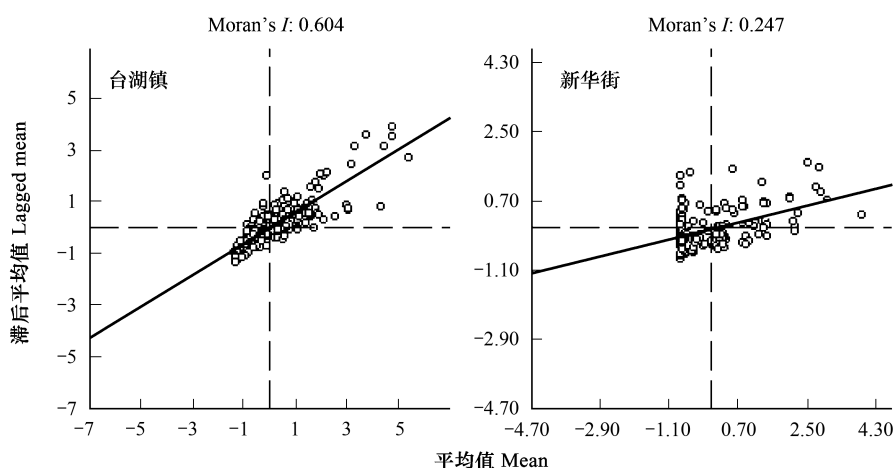


图 6 2020 年北京市通州区台湖镇、新华街生态韧性水平局部空间自相关结果

Fig.6 local spatial autocorrelation results of ecological resilience level in Taihu town and Xinhua Street, Tongzhou District, Beijing in 2020

3.4 驱动力分析

在具体研究城市功能多样性这一社会经济驱动因子时,将 2019 年 12 月三调(0813 版本)数据中的公共服务设施、商业服务设施的用地面积、空间位置进行统计,通过对公共服务设施核密度空间分布、商业服务设施核密度空间分布进行分析,研究城乡发展问题;并对各街道城市功能多样性所涵盖的基础教育设施、文化设施、体育设施以及医疗设施的现状进行可视化表达。通过对解释变量 t 检验的结果表明,各个解释变量回归系数均通过了 1%水平的显著性检验。

综合上述结果可知:通州区西北部的公共服务设施、商业服务设施配备齐全,城市功能多样性较高;其余部分地区(以南部为主)基础设施配套不足,城市功能多样性较低。总体呈现出发展北重南轻不均衡;南部乡镇的城乡融合发展动力不足,在公共服务设施方面短板较大。其中在公共服务设施方面,文化设施、体育设施、基础教育设施(幼儿园)等方面存在较大短板,副中心内幼儿园严重不足,服务半径仅覆盖 27%的居住区。由于近年来以农家乐为主要形式的体验活动吸引了众多游客,而且位于通州区南部的于家务乡、永乐店镇有着丰富的绿色空间,因此通州区将公共服务设施、商业服务设施与绿色空间相结合,从而增强了局部的城市功能多样性。

由图 7 所示,人口、地区生产总值这两个驱动因子对通州区的南部地区、北部地区影响较为显著;由图 7 所示,产业结构驱动因子对通州区的西部及西北部地区影响较为显著,该区域靠近主城区;由图 7 所示,城市

功能多样性则对通州区北部及西北部地区影响较为显著。此外,产业结构的弹性系数为负值,说明产业结构升级会降低城市生态韧性水平,即第一产业、第二产业、第三产业的投入与城市生态韧性水平呈负相关。城市功能多样性的系数同样为负值且绝对值大于前者,说明城市功能多样性增加在更大程度上会降低城市生态韧性水平。

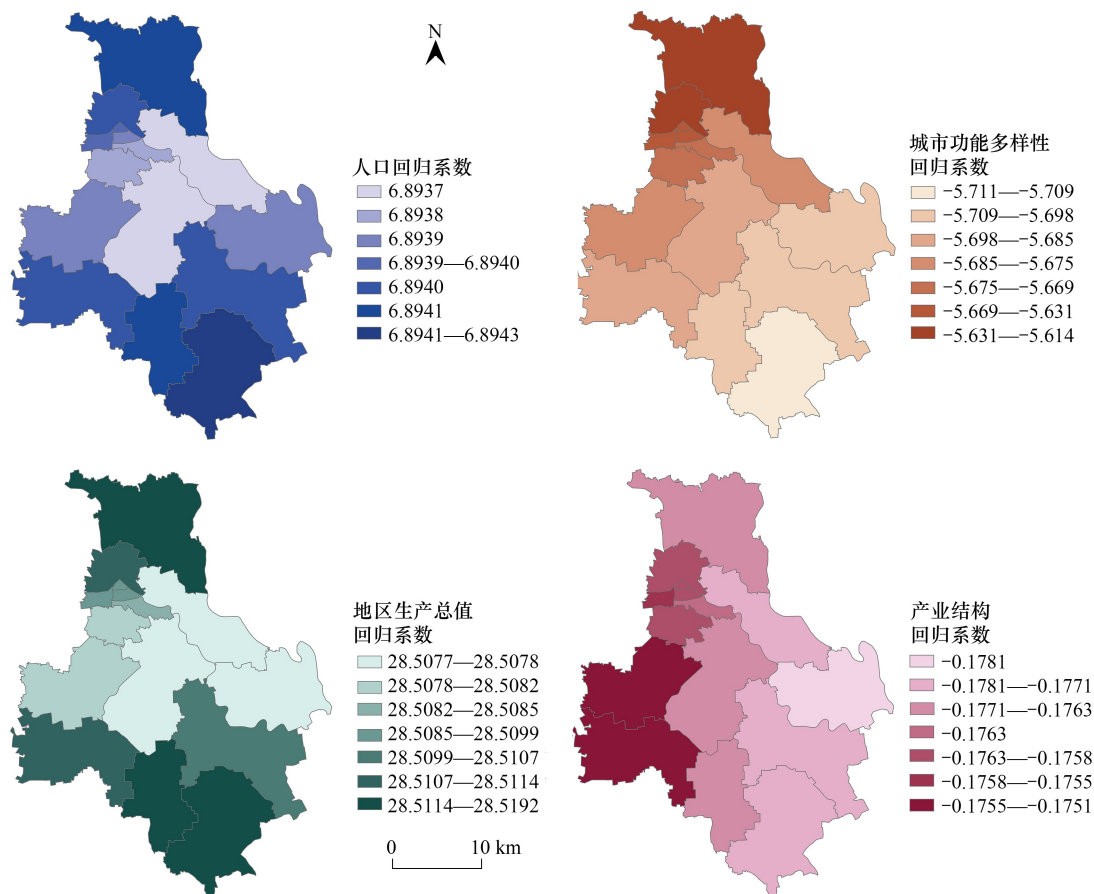


图7 社会经济驱动因子回归系数空间分布

Fig.7 Spatial Distribution of Regression Coefficients of Socio-economic Driving Factors

基于上述分析,可推测出研究区内所承载的城市功能多样性增强对城市生态韧性水平造成的压力最大。由于通州区作为快速城市化典型的地区,人口密度高,产业发展主要以第三产业发展为主,第二产业发展已经逐渐萎缩,近10年来,搬迁了一批大型工业项目及重点排污企业,传统工业转向现代制造业、高新技术产业,促进了通州区第二产业的迅速转型。

从“以人为本”的视角来看,在和谐宜居之都示范区建设初具成效的期间,在区域绿色空间生态发挥功能的时段,提高城市功能多样性的均衡规划等手段是实现“人本规划”中“安居乐业”的现代城市发展模式。在政策落实方面,北京环球主题公园等工作持续推进,极大提升了城市基础设施和公共服务设施水平,同时也促进了现代服务业的快速发展。在驱动力分析的指标选取方面,将代表城市功能多样性的社会经济指标与人本视角下的问卷访谈结合,其中景观满意度、社交舒适性、交通可达性等均涉及“以人为本”的理念。城市发展动力的提升应更加关注以人为本的新型城镇化,实现生态环境、产业结构和服务水平等一系列重要转变。现阶段的当务之急是明确“人本规划”是建设更加完善的韧性城市的必要保障,创造良好的生态环境,不断满足安居乐业的美好需求^[42]。

4 结论与建议

本文以北京市通州区为研究区域,从抵抗力、适应力和恢复力三个方面构建了城市生态韧性水平评估模型,评估了 2020 年城市生态韧性水平空间格局;再者利用空间自相关模型分析 2020 年北京市通州区生态韧性分区治理模式;最后通过人本驱动力分析进一步研究对城市生态韧性水平空间影响较大的驱动因子。基于以上研究,本文得到以下结论:

(1)从空间分布来看,2020 年通州区城市生态韧性水平呈分散状态。城市生态韧性水平低值区域最多,占比为 52.80%,主要分布于通州区北部、东北部、中部偏西及东南部;高值区域最少,占比 0.83%,零星分布于偏西部地区和偏南部地区。中等值区域同样为零散的小栅格,城市生态韧性水平在空间结构上呈分散状态,分布于通州区的西部、南部,且大面积中等区域中会产生小范围的高值区域。

(2)综合通州区重点排污企业局部空间自相关结果和 2020 年北京市通州区城市生态韧性水平局部空间自相关结果,表明通州区显著呈现低韧性水平-高排污企业密度的集聚分布于中心偏北地区的副中心核心地带,说明此区域承载着通州区乃至北京市的重点排污功能,所面临的环境污染风险大,依靠生态系统自身韧性来防范化解风险能力比较低。城市生态韧性水平空间上总体呈现出较高的正相关性与空间聚集性,城市生态韧性水平热点区域主要集中在城市生态韧性水平低值区域内的副中心核心地带,即新华街、中仓街、玉桥街等,具体表现为低-低聚集和不显著集聚。

(3)结合 GWR 模型对分区城市生态韧性水平驱动因素进行分析,发现不同地区驱动因素的影响程度不同。影响城市生态韧性水平的 4 个因素的影响程度由大到小依次为:城市功能多样性>产业结构>地区生产总值>人口。城市功能多样性作为主要外部社会经济驱动因子,对城市生态韧性水平带来的负面影响最大,该现象在通州区西北部的城市副中心最为显著。说明北京城市副中心在增强城市功能多样性,推进和谐宜居之都示范区建设的进程之中,城市扩张侵占了生态用地,从而导致城市生态韧性水平下降,因此该区域在将来要提高对土地的集约化利用水平。

基于此,本文提出以下建议:

(1)提升核心地带城市生态韧性水平:鼓励在核心地带投入更多的资金用于风险防控基础设施建设。严守生态保护底线,稳固自然生态格局和基底,实现城市与自然生态协调发展。为满足日益增长的人口及生活需求,应在城市化过程之中更加强调对核心地带生态用地的保护与再生,发展城市绿色功能多样性,维护核心区域内良好的生态环境。

(2)结合街区控规,加强城市生态韧性分区治理:通过研究城市生态韧性水平空间分布规律,对副中心核心地带,即新华街、中仓街、玉桥街等热点区域重视应对生态韧性管理的系统性,加强应急响应资源的优化配置。其中呈现显著低韧性水平-高排污企业密度集聚分布的地区,亟需尽快搬移高污染排放企业,加速当地产业升级,同时加强该区域的环境生态质量监测水平,以此降低局部生态风险,防止局部风险扩散引起全域连锁风险效应。根据“比较优势”的原则,实现“物以类聚”的目的,只有各乡镇、街道的生态韧性水平保持均衡的协调性,才能体现城市生态韧性水平最大化。

(3)从人本视角出发,完善绿色公共空间空间体系:在建设蓝绿交织的森林城市的进程之中,在建设以人为本的韧性城市的进程之中,通州区的绿色空间本身的在逐渐向稳定且完整的趋势发展,但是斑块密度仍处于低水平。为提高绿色空间整体斑块密度,不能忽视周边的用地类型斑块对它的影响,如:建设用地穿插于绿色空间的斑块中,使区域内整体的斑块密度上升,进一步提高城市生态韧性水平,实现可持续发展。在绿色公共空间体系中,要努力完善城市文化和环境品质提升政策,让市民有更多的获得感和幸福感,实现“安居乐业”的美好愿景。

参考文献 (References):

- [1] 赵瑞东,方创琳,刘海猛.城市韧性研究进展与展望.地理科学进展,2020,39(10):1717-1731.

- [2] 李迅. 防控重大风险 建设韧性城市. 城市发展研究, 2020, 27(4): 1-6.
- [3] 施生旭, 周晓琳, 郑逸芳. 韧性社区应急治理: 逻辑分析与策略选择. 城市发展研究, 2021, 28(3): 85-91.
- [4] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. 生态学报, 2018, 38(12): 4307-4316.
- [5] 郑艳, 翟建青, 武占云, 李莹, 史巍娜. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.
- [6] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [7] 杜文瑄, 施益军, 徐丽华, 翟国方, 陈伟, 陆张维. 风险扰动下的城市经济韧性多维测度与分析——以长三角地区为例. 地理科学进展, 2022, 41(6): 956-971.
- [8] 李嘉艺, 孙聰, 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(7): 2609-2621.
- [9] 余欣, 余瑞林, 孙松峰, 邓伟平. 基于 CiteSpace 的生态风险评价研究进展与启示. 生态学报, 2022, 42(24): 1-14.
- [10] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126.
- [11] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [12] 刘媛媛, 李霞, 王小博, 王绍强, 钱钊晖. 2001—2018 年中国-老挝交通走廊核心区植被稳定性对极端干旱的响应. 生态学报, 2021, 41(7): 2537-2547.
- [13] 任海, 邬建国, 彭少麟, 赵利忠. 生态系统管理的概念及其要素. 应用生态学报, 2000, 11(3): 455-458.
- [14] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [15] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 高阳, 王宏亮, 李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2018, 33(2): 195-207.
- [16] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 郑度. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地学报, 2003, 21(1): 50-55.
- [17] 滕菲, 王艳军, 王孟杰, 李少春, 林云浩, 蔡恒藩. 长三角城市群城市空间形态与碳收支时空耦合关系研究. 生态学报, 2022, 42(23): 1-15.
- [18] 付迎春, 郭碧云, 王敏, 覃小玲. 社会—生态系统适应性治理视角下绿地空间恢复力的演化——广州旧城区更新案例. 自然资源学报, 2022, 37(8): 2118-2136.
- [19] Yu G M, Yu Q W, Hu L M, Zhang S, Fu T T, Zhou X, He X L, Liu Y A, Wang S, Jia H H. Ecosystem health assessment based on analysis of a land use database. Applied Geography, 2013, 44: 154-164.
- [20] 陈志端, 仇保兴, 陈鸿. 韧性城市系统韧健水平提升与强健模型研究——基于复杂适应系统理论(CAS). 城市发展研究, 2021, 28(8): 1-9.
- [21] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展. 地理学报, 2020, 75(5): 891-903.
- [22] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 刘玲玉. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展. 生态学报, 2022, 42(14): 6016-6029.
- [23] 林佳, 宋戈, 宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例. 生态学报, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [24] 赵景柱. 景观生态空间格局动态度量指标体系. 生态学报, 1990, 10(2): 182-186.
- [25] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [26] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟. 生态与农村环境学报, 2019, 35(12): 1531-1540.
- [27] 李子贻, 许有鹏, 何玉秀, 王强, 林芷欣, 于志慧, 高斌. 城市化下平原河流水系变化及空间响应. 生态学报, 2021, 41(22): 8953-8964.
- [28] 马明义, 郑君薇, 马涛. 多维视角下新型城市化对中国二氧化碳排放影响的时空变化特征. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2474-2486.
- [29] 陈晓红, 许晓庆, 刘艳军, 王颖, 张明轩, 马灵玉, 刘爽. 基于三生空间质量的哈长城市群城市脆弱性时空演变格局及驱动力研究. 生态学报, 2022, 42(15): 6395-6405.
- [30] 王海军, 张彬, 刘耀林, 刘艳芳, 徐嫻, 赵雲泰, 陈宇琛, 洪松. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. 地理学报, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [31] Nüsser M. Understanding cultural landscape transformation: a re-photographic survey in Chitral, eastern Hindukush, Pakistan. Landscape and Urban Planning, 2001, 57(3/4): 241-255.
- [32] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力. 生态学报, 2015, 35(13): 4357-4366.
- [33] 张伟, 单芬芳, 郑财贵, 胡蓉. 我国城市收缩的多维度识别及其驱动机制分析. 城市发展研究, 2019, 26(3): 32-40.
- [34] 肖宏伟, 易丹辉. 基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究. 统计与信息论坛, 2014, 29(2): 83-89.
- [35] 浩飞龙, 杨宇欣, 王士君. 城市舒适性视角下长春市创新产出的空间特征及影响因素. 人文地理, 2020, 35(5): 61-68, 129.
- [36] 刘彦平. 城市韧性系统发展测度——基于中国 288 个城市的实证研究. 城市发展研究, 2021, 28(6): 93-100.
- [37] 张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与发展水平的协调性对比研究. 城市发展研究, 2019, 26(1): 82-91.
- [38] 唐志鹏, 刘卫东, 宋涛. 基于混合地理加权回归的中国省域碳生产率影响因素分析. 资源科学, 2017, 39(12): 2223-2232.
- [39] 张梦迪. 北京市通州区绿色空间格局演变及其对生境质量变化的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [40] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [41] 吴健生, 王仰麟, 张小飞, 彭建, 刘焱序. 景观生态学在国土空间治理中的应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 14-25.
- [42] 于涛, 张京祥, 罗小龙, 陈眉舞. 人本视角下的城市发展动力与治理创新——基于南京实证研究. 城市规划, 2018, 42(3): 50-58.