

DOI: 10.5846/stxb202101030007

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.

Xia C Y, Dong Z Y Z, Chen B. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 116-126.

城市生态韧性时空变化及情景模拟研究 ——以杭州市为例

夏楚瑜¹,董照樱子²,陈彬^{1,*}

¹ 北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点实验室,北京 100875

² 浙江大学公共管理学院,杭州 310058

摘要:从韧性的特征角度研究城市生态韧性水平的变化机制,探究城市防范化解生态风险能力的时空差异,以此明确城市分区生态治理的重要任务,是实现韧性城市生态风险防控的有利途径。从抵抗力、适应力和恢复力 3 个方面构建了城市生态韧性评估模型,并以杭州为例,评估了其 1995—2015 年城市生态韧性时空变化格局,再者利用空间自相关模型对 2015 年杭州生态韧性分区管理模式进行了探究。最后,基于 FLUS 模型模拟了 2035 年基准和创新创业导向的两种情景下的城市土地利用空间格局,并评估了不同城市发展情景下的生态韧性水平空间分布情况。基于以上研究得到以下结论:(1) 1995—2005 年,生态韧性低值区域向东北和东南方向扩张,而生态韧性高值水平区域明显减少。2005—2015 年,杭州西北部和西部原本存在的中等韧性水平区域也转为低等水平。(2) 2015 年,城市东北区域呈现低韧性水平—高排污企业密度的集聚分布,说明该区域环境生态风险防范化解能力比较低,需要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。(3) 创新创业导向的“创新天堂”城市发展情景比基准情景下 2035 年杭州整体生态韧性水平更高,主要影响因素在于前者的抵抗力水平和适应力水平明显高于基准情景。研究结果为韧性城市生态环境发展提供了理论依据。

关键词:分区生态治理;韧性城市;生态韧性;空间分布

Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou

XIA Chuyu¹, DONG Zhaoyingzi², CHEN Bin^{1,*}

¹ State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Resilience is defined as the capacity of an ecosystem to respond to a perturbation or disturbance by resisting damage and recovering quickly. Among various methods, the zoning ecological governance provides us with a potentially efficient way to promote resilient city development by enhancing resilience abilities and preventing ecological risks in cities. Recently, resilient city construction has been a hot issue for many areas in China due to the frequent natural disasters and human-induced incidents. However, little is known about how to improve resilience from a zoning ecological governance perspective. It is therefore an effective way to realize the ecological risk prevention and control of resilient city by identifying the key task of urban zoning ecological governance via investigating change mechanism of urban ecologically resilient level in context of resilient characteristics and exploring the spatio-temporal differences of prevention and reconciliation capacity of ecological risks. This paper constructed an urban ecological resilience evaluation model from three perspectives, namely,

基金项目:国家自然科学基金项目(72091510,72091511,72004014,71961137009)

收稿日期:2021-01-03; **网络出版日期:**2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

resistance, adaptability, and restoring force. Then, taking Hangzhou as an example, we evaluated the spatio-temporal changes of urban ecological resilience from 1995 to 2015 and explored Hangzhou ecological resilience zone governance based on the spatial autocorrelation model. Finally, the study applied the FLUS model to evaluate the different spatial patterns of urban land use and spatial distribution of ecological resilience levels under the simulated benchmark scenario and Innovation Paradise scenario in 2035. The results show that (1) from 1995 to 2005, high-value ecological resilience areas decreased significantly, and low-value ecological resilience areas expanded to the northeast and southeast areas; from 2005 to 2015, the medium-value resilience areas in the northwest and west of Hangzhou turned to low-value areas. (2) In 2015, areas with low-value ecological resilience and high-value pollution enterprise density clustered in the northeastern parts, where the ability to prevent the environmental and ecological risks was relatively low. (3) The overall ecological resilience level under the Innovation Paradise scenario with a more compact urban growth mode was higher than that under the baseline scenario with extensive urban expansion. As such, there are some significant practical implications for the ecologically resilient construction of Hangzhou city. Firstly, it is suggested that local governments should strictly control the occupation of wetlands and strengthen the quality and quantity of ecological land, which can promote the balance of spatial difference of ecological resilience. Secondly, since there exists obvious spatial heterogeneity of ecologically resilient levels in Hangzhou, it is important to establish zoning management mode for a successful urban eco-environment governance based on precise grid control and regulation of eco-environmental risks. Thirdly, as to northeastern parts where gathered grids with low-value ecological resilience and high-value pollution enterprise density, it is urgent to transfer the high emission enterprises, accelerate the locally industrial upgrading, and strengthen the local monitoring level of ecological quality, which can reduce the local ecological risk and prevent the risk diffusion. Besides, green landscape development and compact urban development should be encouraged in the future urban planning of Hangzhou city. Finally, it is vital to establish a reasonably ecological compensation system within the city, which can help to re-allocate the resources including labor, technology, and investments among various districts and counties to guarantee the powerfully environmental governance and sustainable ecological protection.

Key Words: zoning ecological governance; resilient city; ecological resilience; spatial patterns

随着国家经济快速发展,城市生态风险问题呈多发高发态势,其风险形势更加复杂和难以预测,给人民生命财产安全和生态环境质量造成了巨大损害^[1]。2020 年全球新冠疫情的爆发,从短期来看对医疗相关的生态环境保护(医疗废弃物等)提出额外的需求,从长期来看后疫情时代生产生活和社会经济的逐渐恢复会加剧资源供需的矛盾,引发新的城市生态风险。因此,如何提高城市应对生态风险的能力成为实现城市可持续发展的一个重要方向。2020 年 11 月 3 日,《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“推进以人为核心的新型城镇化。强化历史文化保护、塑造城市风貌,加强城镇老旧小区改造和社区建设,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。”更表明了建设韧性城市对我国经济社会的重要作用。

韧性这一概念最早源于生态系统学,指的是系统恢复平衡的速度,应对危机并恢复的能力,适应新环境的能力^[2]。城市研究的学者们后来借鉴这一概念,对城市韧性进行了研究。尽管学界对城市韧性的理解还未形成统一的定义,但大体都认为“城市韧性”指城市对灾害和突发性事件的反应、适应和应对能力,以减轻损失,并从中快速恢复^[3-5],其内涵包含了城市生态韧性、社会韧性、经济韧性、制度韧性和基础设施韧性等多个维度^[6]。近年来,纽约、伦敦、芝加哥、鹿特丹等城市纷纷提出最具代表性的韧性城市规划,这些韧性城市规划主要针对不同的气候风险,强调城市对未来气候风险的综合防护能力^[7-8]。

作为城市韧性的重要维度,生态韧性的评估也得到了学者们的关注,但大多数的关注点均从生态风险和

环境风险的防控角度出发^[9-12]。在评估思路方面,毕军和王华东提出要对“自然-社会-经济”复合系统进行

环境风险评估^[13];张小飞等从自然灾害、环境污染及生态退化 3 个方面,构建了城市综合生态风险评价的分析框架^[14];王祥荣等围绕长三角城市群重点产业、城市灾害生态风险和典型生态系统,构建集地表水、大气、土壤、生物多样性于一体,常规监测与应急预警相结合的长三角城市群生态安全评估与风险预测预警技术体系^[15]。但是,很少有研究从韧性的特征角度考虑城市生态韧性水平的空间变化,也忽略了生态韧性和风险的分区管理评估,导致其成果难以真正落实于城市规划应用。

基于以上考虑,本研究首先从韧性的基本特征(抵抗力、适应力和恢复力)3 个方面构建了城市生态韧性评估模型。其次,以杭州为例,评估了 1995—2015 年城市生态韧性时空变化格局;并利用空间自相关模型对 2015 年杭州生态韧性分区管理模式进行了探究;最后模拟了 2035 年基准和创新创业导向的两种情景下的杭州市城市扩张情况,并评价了不同情景下的城市抵抗力、适应力、恢复力,以及生态韧性水平。基于以上研究结果,以期对生态韧性城市建设以及产业空间布局提出一些可供操作的政策和规划建议。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区

杭州作为浙江省省会,位于浙江省的北部,属亚热带季风性气候,位于长三角腹地是中国东南地区最发达的城市之一。杭州市西部属浙西丘陵区,东部属于浙北平原,全市总体地势格局为西南高、东北低,自西南向东北倾斜,呈阶梯下降。

改革开放以来,杭州市经济发展迅速,人均 GDP 从 1995 年的 4614 元上升到 2015 年的 112600 元,在中国 35 个主要城市中排名第八。相关文献表明,近 20 年来杭州市空间外延式增长迅猛^[16—18],大量自然生态用地被占用,引起很多环境问题,包括城区生境质量下降、生态系统服务功能降低、城区温室效应加剧等等。此外,杭州在谋划“十四五”发展目标时,提出要以未雨绸缪的布局防范化解各类风险挑战,不断增强城市发展韧性。因此,以杭州为案例来研究其城市生态韧性时空变化具有重大意义。

1.2 数据来源

本研究利用 1995、2005 与 2015 年的遥感影像数据通过监督分类结合目视解译获得分类结果。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。首选通过监督分类得到林地、耕地、水域与湿地、建设用地这 4 个类别,精度检验结果表明分类的 Kappa 系数均达到 85% 以上。此外,杭州市重点排污单位名录来自杭州市生态环境局,其坐标信息来自其企业名称与 POI 兴趣点的匹配。

2 核算方法与模型构建

2.1 城市生态韧性评估模型构建

国际区域可持续发展协会(ICLEI, 2002)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,重点关注如何增强城市对抗冲击的能力,提升自身韧性强度,提高自身恢复能力,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。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。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评估模型。

抵抗力表示城市生态系统抵抗外力干扰的能力。很多研究指出,生态系统抵抗力与其生态系统服务功能密切相关^[19—21]。生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成的维持人类赖以生存的自然环境条件与功能^[22—24]。Costanza 等将全球生态系统类型、服务功能分成了 17 个类别^[25]。本研究从水、土、气等多介质出发选择气候调节、气体调节、水源涵养、土壤的形成与保护、废物处理等调节型生态系统价值构成了生态系统的抵抗能力(P)。

本研究利用生态系统服务价值的当量系数,进而获得生态系统服务价值系数。生态系统服务价值当量因子是生态系统潜在服务价值的相对贡献率,等于每年每公顷粮食价值的 1/7^[26]。杭州的生态系统服务价值

的计算公式如下:

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

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,其系数来自于长三角地区土地利用类型的部分生态系统服务价值系数^[27]。一个越稳定的生态系统,其适应力(A)越高^[28]。因此,本研究利用生态系统景观结构稳定性相关指标来表述其适应力。生态系统的景观结构稳定性取决于与空间异质性和景观连通性有关的景观格局组织稳定性^[29—31]。本研究利用景观指数从景观异质性和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,已经广泛应用于景观生态区划、生态规划、生态监测、生态预测、生态影响评价等,可以对景观生态空间做出有目的和适时的调控^[32—33]。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^[34],具体指标如表 1。

表 1 景观指数及权重
Table 1 Analysis of landscape pattern factor

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

生态系统恢复力也可以称为生态弹性,体现生态系统遭受危害而恢复原样的能力与潜力^[35]。当遇到外部压力(例如气候或地质灾害)时,接近自然生态系统的土地利用类型更容易恢复,而人为主导的建设用地类型在面对外部压力时恢复能力较低,因此遭受的破坏更大。其测算公式参考根据 Peng 等人提出的生态弹性模型与系数^[34],具体如下:

$$R = \sum A_k \times RC_i \quad (2)$$

式中, R 是生态系统恢复力, A_k 是土地利用类型,土地利用类型 k 的生态恢复力系数,系数参考 Peng 等人的研究^[34]。

此外,抵抗力、适应力和恢复力的计算具有不同的单位,因此在使用多个指标进行评估时需要数据标准化。本研究将这三者标准化到 $[0,1]$ 这个区间,计算韧性水平的具体公式如下:

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

式中, A 为适应力, P 为抵抗力, R 为恢复力。

2.2 空间自相关模型

空间自相关分析是用于衡量空间变量的分布是否具有集聚性,是分析空间格局的重要方法和有效手段。生态韧性与自然地理要素分布、社会经济发展状况相关,这些因素在空间上均具有随机性和结构性,具有地学特征,存在着一定的空间关联性,可以运用空间自相关进行分析。此外,空间自相关模型在生态系统分区管理方面也已经进行了大量应用^[36—39]。空间自相关分析可分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析,一般利用 Moran's I 指数来表示。本研究采用采用局部空间自相关的 LISA 来表现韧性水平在局部空间集聚规律^[40]。

2.3 城市土地利用变化模型

FLUS 模型是基于 GeoSOS 软件开发,主要结合人工神经网络(ANN)算法、自适应惯性与竞争机制对传统 CA 模型进行了改进,更加适用于多地类情景模拟^[41]。FLUS 模型主要包括两个方面:人工神经网络(ANN)和自适应惯性竞争元胞自动机。人工神经网络(ANN)是通过训练样本来估计每个单元网格上的每种土地利用类型的可能性,而自适应惯性和竞争机制是用来处理土地利用类型之间的相互作用。FLUS 模型已经在城市

土地利用扩张模拟方面进行了广泛应用^[42-45]。

本研究设置二种情景来模拟 2035 年杭州市城市扩张情况,这二种情景分别为基准情景以及创新创业导向的“创新天堂”情景,并利用 GeoSOS-FLUS 软件实现 FLUS 模型的土地利用格局模拟。

基准情景根据 2005 年、2015 年两期的土地利用变化情况,采取原始土地利用转移矩阵预测得到的土地利用规模,综合其他研究对于土地利用变化驱动因子的分析及探究^[46-47],以及规划实践过程中实际影响杭州城市发展的因素,最终选择从社会经济、自然条件、交通条件、规划因素等方面选择驱动因子(表 2)。

“创新天堂”情景这个概念来自于 2017 年《杭州市总体城市设计修编(草案)》所提出的“风雅钱塘,诗画江南,创新天堂”的杭州未来城市定位。“创新天堂”情景是一种创新产业发展视角且耕地保护比较严格,与基准情景相比,该情景设置耕地转为建设用地的比例下降 15%。此外,“创新天堂”情景增加了创新驱动因素(表 2),根据《杭州市智能制造产业发展“十三五”规划》与《杭州城东智造大走廊发展规划纲要》提取相关的规划制造业创新中心与主要产业平台,计算每个栅格到创新中心与主要产业平台的距离并赋值,得到杭州创新中心与主要产业平台驱动因子。最后,本研究将以上创新因素驱动图层作为为创新产业发展视角下额外因子,输入至人工神经网络,计算适宜性概率图层,进行后续创新产业发展视角下的用地空间格局的预测模拟。

表 2 城市土地利用变化驱动因素
Table 2 Driving factors of urban land use change

类别 Type	数据 Data	权重赋值 Weight
社会经济 Socioeconomic factors	人口	采用 2015 年实有人口(常住人口+暂住人口)点数据作为驱动因子,计算杭州市研究区内人口核密度,以此作为驱动图层
	公共服务设施与商业服务设施	选取教育培训、医疗、文化传媒、运动健身、政府机构等类别作为公共服务设施 POI, 计算其核密度,以此作为公共服务设施驱动图层。 采用金融、美食、酒店、购物、休闲娱乐作为商业服务设施 POI,计算其核密度,以此作为商业服务设施驱动图层
	高程	将高程做倒数处理,并进行归一化处理,得到高程驱动图层
自然条件 Natural conditions	坡度	按照坡度划分等级进行赋值 ^[48] ,在再进行归一化处理,得到坡度驱动图层
	河流影响开发	通过欧式距离计算建立各栅格至附近河流水系距离图层,在再进行归一化处理,得到驱动图层
交通条件 Traffic conditions	公路 城市道路	通过线密度分析得到,得到驱动图层
	交通设施站点	计算交通设施站点 POI 的核密度,得到驱动图层
规划因素 Urban planning factors	永久基本农田 生态保护红线	将生态保护红线内区域与永久基本农田保护区为禁止建设区,并设定建设用地不能转换为水域与湿地的约束条件
创新因素 Innovation factors	创新产业中心与主要产业平台	从《杭州市智能制造产业发展“十三五”规划》与《杭州城东智造大走廊发展规划纲要》提取相关的规划制造业创新中心与主要产业平台;未来科技城、青山湖科技城、云栖小镇、萧山浙江 3D 打印产业园、杭州高新开发区(滨江)、杭州钱塘智慧、城大江东产业集聚区、杭州经济开发区、萧山经济开发区、余杭经济开发区(钱江经济开发区)、临空经济示范区、杭州仁和先进制造业基地。在此基础上,计算研究区栅格至规划创新中心与主要产业平台距离图层,归一化处理,得到驱动图层

3 结果与讨论

3.1 生态韧性时空变化

图 1 表示了 1995—2015 年期间,每间隔 10 年的杭州城市生态韧性水平的时空变化。如图 1 所示,从时间上来看,城市生态韧性水平呈现下降趋势,从网格水平上统计其均值下降了 32.86%,最高值下降了 20.27%,标准差也下降了 34.33%。

空间分布来看,1995 年杭州生态韧性水平区域差异不大,大部分区域处于中等和高值生态韧性水平,低值生态韧性水平区域只要分布在城市东北区域和中心区域偏西北、东北部分。随着城市扩张,2005 年生态韧

性低值区域向东北和东南方向扩张,东北和东南区域原本连续分布的高值区域变为零散分布。由于缺乏相对适宜的整体规划和统筹安排,位于东南和东北部分的萧山区乡镇企业发展迅速,这些工厂多呈小规模散落分布,占用了大量的自然资源,生态服务功能降低,景观破碎度提高,导致其韧性水平大幅度下降。此外,城市东北部靠近杭州湾,原本存在大量优质湿地资源,其东北部围垦过度大大破坏了自然生态景观。2015 年杭州城市总体生态韧性水平不高,大部分区域处于低值水平,高值区域零星分布,而中等区域仅在城市东南分布,西北部和西部原本存在的中等韧性区域也转为低值水平。快速土地城镇化占用了大量的耕地和林地,大量农村务工人员涌入城市,致使住房用地需求增加,部分耕地被占,转变为建设用地,又进一步加剧了耕地资源不足的严峻挑战。

杭州 1995—2015 年生态韧性水平时空变化与大连^[49]、京津冀^[50]等地的相关研究呈现出一定相似:随着城镇化发展,生态韧性水平总体分布规律为城市中心城区周边的逐渐降低,韧性水平低值区域从面状零散分布变化至面状连片分布。尽管杭州与大连、京津冀等地交通、经济等区位相差较大,但是我国城市早期“摊大饼”式的城市扩张模式都趋同。以工业园区建设为主导的粗放的城市扩张模式导致城市周边大量优质耕地被占用,而后期的“耕地占补平衡”政策虽然在表面上保证了 18 亿亩耕地红线,但是在地方实际操作中往往出现“占优补劣”等现象,导致林地、湿地等大量生态资源被侵占作为重要耕地补充来源,进一步导致中心城区周边生态用地景观破碎,降低了其生态韧性水平。

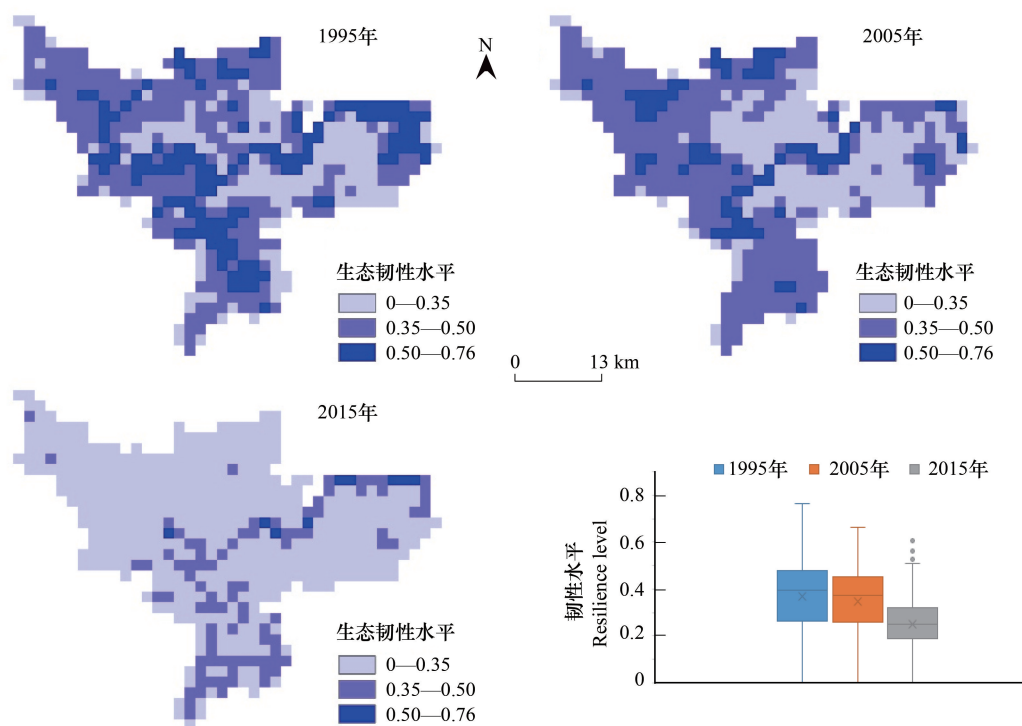


图1 杭州 1995—2015 生态韧性水平时空变化

Fig.1 Temporal and spatial changes of ecological resilience level in Hangzhou from 1995 to 2015

本研究利用 ArcGIS 10.2 对杭州市重点排污单位进行了核密度分析,并利用 Geoda 分别对韧性水平和韧性水平—排污企业密度进行了单变量和双变量空间自相关分析,其结果如图 2 所示。图 2 显示,重点排污企业主要集中在城市北部和东北部,分别靠近余杭临平工业园和萧山大江东产业集聚区,这两个区域地势平坦、产业优惠政策丰富且交通便利,承接了杭州主城区高污染产业的转移;杭州市从 2002 年起陆续确定杭州中策、杭氧集团、油脂化工、杭州卷烟厂、杭州电缆有限公司、杭州汽车发动机厂、杭华油墨、杭州重型机械有限公司等数家企业的整体搬迁计划,这些企业大多将迁入配套齐全和产业集聚的江东、临江工业园区和余杭、钱江

经济开发区。此外,韧性水平的空间自相关分析结果(图2)表明生态韧性低值区域在城市中部和西北部出现集聚,而高值区域在城市东南、东北以及中心区域偏西南部分出现集聚,近年来,政府投入大量资金以提高靠近杭州湾的城市东北部分和城市中心区域的西湖风景区的湿地质量,湿地生态资源可以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、防范化解生态风险具有重大作用。城市生态韧性水平—排污企业密度的双变量空间自相关结果表明(图2),城市的东北区域呈现低韧性水平—高排污企业密度的集聚分布,这与杭州整体向东发展的城市策略密切相关。杭州东北部地势平坦,且紧邻杭州湾,与宁波、上海等长三角核心城市交通便利,形成大江东产业集聚区,同时承接了周边城市的以印染化工为主的传统制造业的转移。产业集聚区的发展带动东北区域建设用地的扩张,侵占周边生态用地资源,使得生态用地斑块破碎化,导致该区域生态韧性水平降低。同时,该区域生态韧性水平比较低,而高排污企业密度高,说明其环境污染风险比较大,但是其防范化解能力比较低。因此需要加大该区域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。

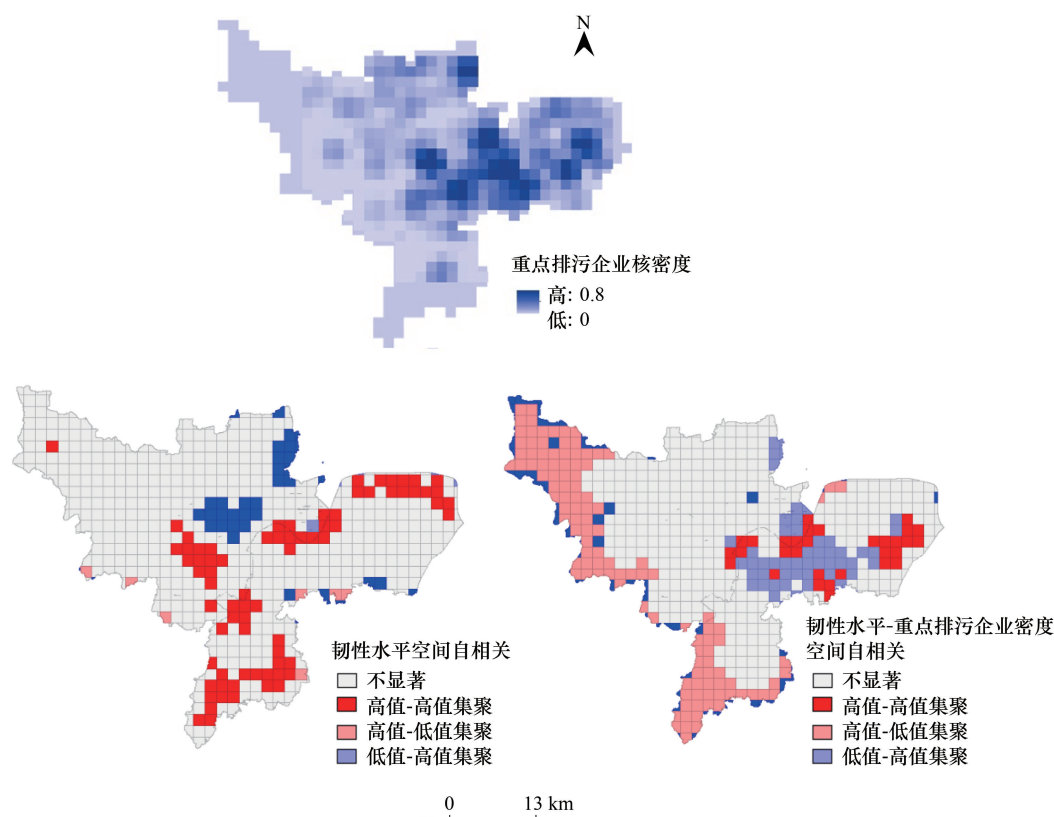


图2 2015年杭州生态韧性水平局部空间自相关结果

Fig.2 Results of local spatial autocorrelation of ecological resilience level in 2015

3.2 城市扩张背景下的生态韧性情景模拟

本研究基于2005、2015年两期杭州城市土地利用数据模拟2035年其空间格局,这10年期间土地利用转移情况如表3所示。2005—2015年期间林地、建设用地规模比较稳定,很难转化为其他用地,而耕地、水域比较容易向其他地类进行转换。耕地是建设用地的主要来源,占全部向建设用地转移的70.49%。此外,水域向耕地转移占全部向耕地转移的68.52%,这与杭州东北区域湿地复垦密切相关。

图3是基于FLUS模型模拟的2035年杭州市城市土地利用空间格局结果。图3显示,基准情景的2035年建设用地更多地以边缘式发生在主城区的近郊,且并未呈现明显集聚,是一种类似摊大饼城市扩张模式。“创新天堂”情景是一种紧凑增长模式,建设用地主要增长在城市西北和东南部。这些部分是未来科技城、云

栖小镇、大江东产业集聚区、杭州经济开发区、萧山经济开发区、余杭经济开发区(钱江经济开发区)、萧山临空经济示范区、杭州仁和先进制造业基地所在的区域,说明“创新天堂”情景更好的契合了创新产业发展规划的产业发展需求。

表 3 2005—2015 年的土地利用变化转移/ km^2

Table 3 Land-use changes from 2005 to 2015

2005	2015			
	林地 Forest	耕地 Farmland	水域 Water	建设用地 Construction land
林地 Forest	—	46.3	11.0	63.5
耕地 Farmland	59.8	—	73.9	351.9
水域 Water	10.1	100.8	—	84.5
建设用地 Construction land	21.3	60.3	27.1	—

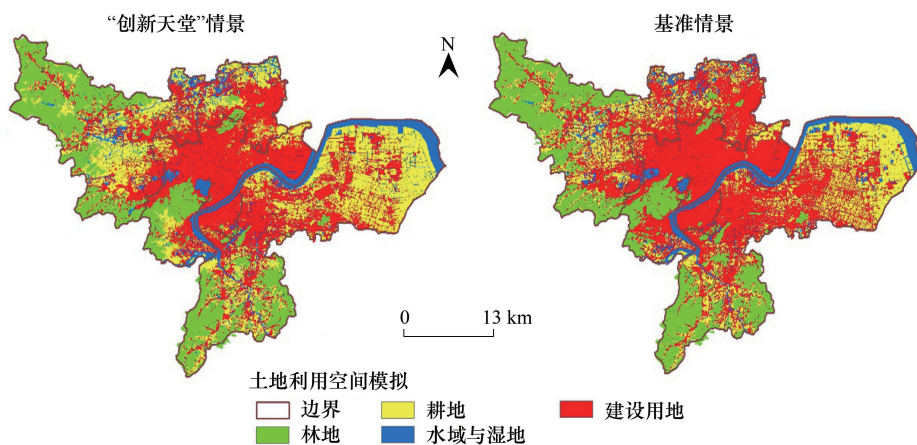


图 3 2035 年杭州市城市土地利用模拟空间分布

Fig.3 Spatial distribution of urban land use of Hangzhou in 2035

图 4 和图 5 分别是创新创业导向的“创新天堂”和基准情景的杭州生态韧性空间分布水平。相比基准情景,“创新天堂”城市发展情景下杭州整体生态韧性水平更高。从抵抗力、适应力和恢复力 3 个方面来看,两者的恢复力水平差异不是很大,而“创新天堂”情景的抵抗力水平和适应力水平明显高于基准情景。特别是适应力水平,基准情景下区域分异尤为明显,展现由四周向中心梯次递减的趋势,两极化现象较为明显,在城市中心区域出现明显低值集聚现象,而“创新天堂”情景的适应力水平的空间差异不大,没有出现明显的低值集聚现象。这与两种情景的城市扩张方式相关,“创新天堂”情景是一个更为紧凑填充式的城市增长模式,而基准情景的城市增加以边缘式发生在建成区的近郊。虽然边缘式增加可以提高景观多样性,提高景观异质性,但是会提高其破碎程度并降低景观连通性。本研究的适应力指标体系设计中(表 2),景观破碎度权重(0.5)大于景观多样性(0.25),这是因为考虑到快速城镇化的后期,各种景观类型相互渗入以及建设用地小斑块,逐渐变成以建设用地为主导的景观格局,其景观多样性会降低,而这种稳定状态对适应力提高并没有正面作用。

4 结论与建议

本研究从抵抗力、适应力和恢复力 3 个方面构建了城市生态韧性评估模型,并以杭州为例,评估了 1995—2015 年城市生态韧性时空变化格局,再者利用空间自相关模型对 2015 年杭州生态韧性分区治理模式进行了探究。最后,基于 FLUS 模型模拟了 2035 年基准和创新创业导向的两种情景下的城市土地利用空间

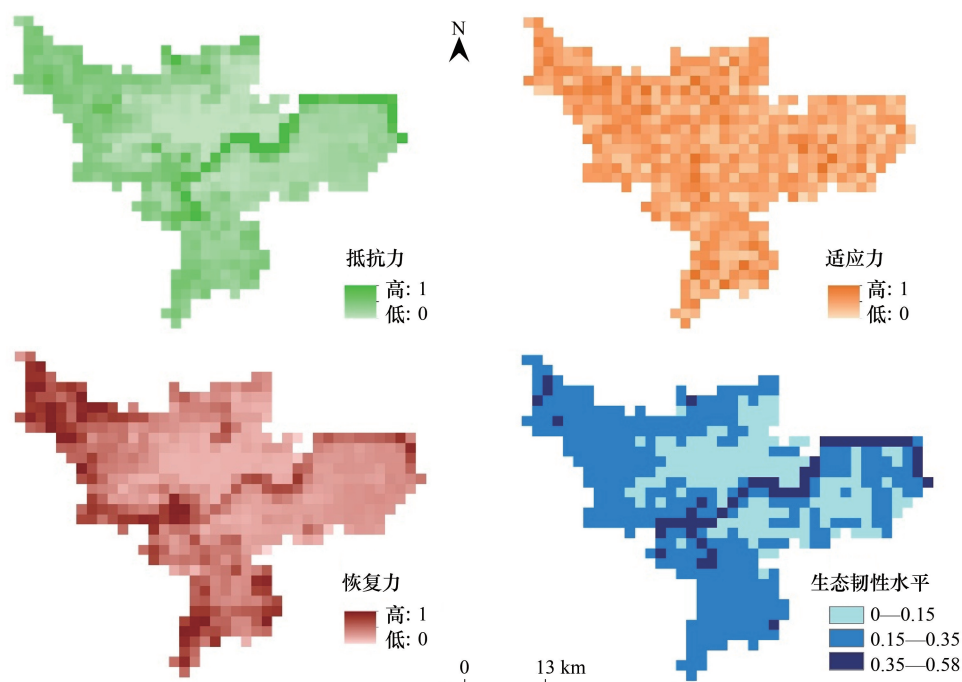


图4 “创新天堂”城市发展情景下生态韧性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological resilience under the *Innovation Paradise* scenario

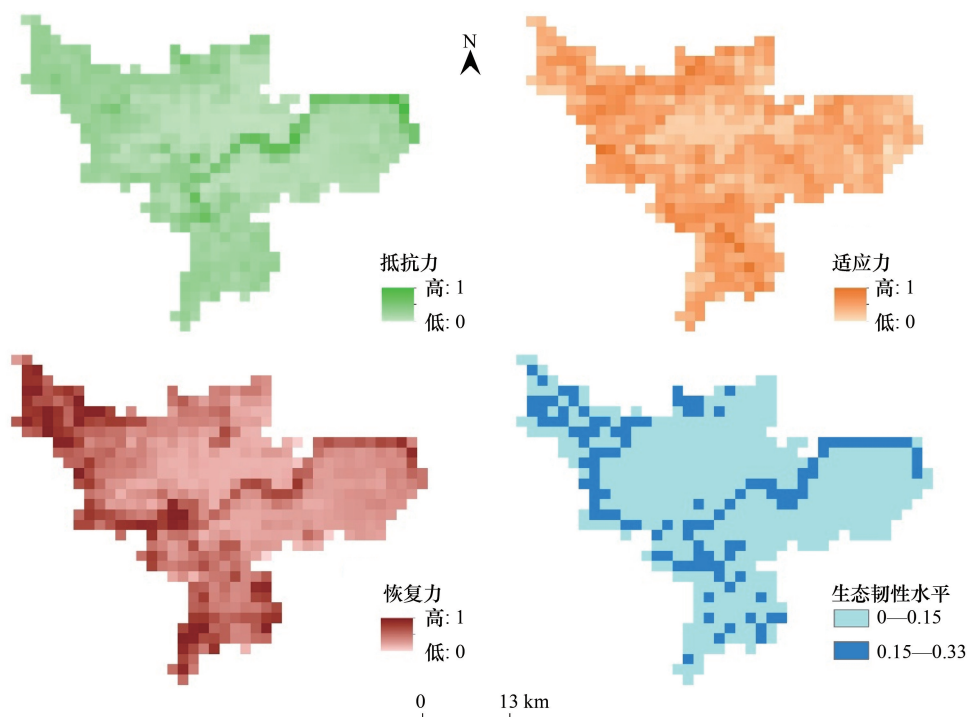


图5 基准情景下生态韧性空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological resilience under the baseline scenario

格局,并评估了不同城市发展情景下的生态韧性水平空间分布。基于以上研究,本文得到以下结论:

(1) 总体来看,杭州 1995—2015 年城市生态韧性水平呈现下降趋势,从网格水平上统计其均值下降了

32.86%,最高值下降了 20.27%,标准差也下降了 34.33%,说明更多网格呈现低值集聚。从空间分布来看,1995—2015 年期间,全域城市生态韧性水平低值区域呈零散分布变化至面状连片分布;1995—2005 年,生态韧性低值区域向东北和东南方向扩张,这与东北部湿地围垦过度以及被建设用地侵占密切相关。2005—2015 年,杭州西北部和西部原本存在的生态韧性中等水平区域也转为低等水平,该区域大量优质林地生态资源的被侵占是其变化的重要原因。

(2)从空间分布来看,2015 年生态韧性低值区域在城市中部和西北部出现集聚,而高值区域集聚在城市东南、东北以及中心区域偏西南部分。同时,城市生态韧性水平—排污企业密度的双变量空间自相关结果表明杭州的东北区域显著呈现低韧性水平—高排污企业密度的集聚分布,这说明此区域环境污染风险比较大,依靠生态系统自身韧性来防范化解风险能力比较低。

(3)相比基准情景,紧凑填充式的城市增长的“创新天堂”城市发展情景下 2035 年杭州整体生态韧性水平更高。尽管两者的恢复力水平差异不是很大,但是“创新天堂”情景的抵抗力水平和适应力水平明显高于基准情景。

根据以上研究结果,本文为杭州生态韧性城市建设提出以下三点建议:

(1)促进市域均衡开发,严格控制湿地开发,加强生态用地质量与数量建设,提升城市整体韧性:杭州应当在全域范围内统筹发展资源,避免在中心城区形成严重的景观压力和城市蔓延问题,降低过度集中导致的生态韧性降低,同时也使发展机会得以分享。此外,杭州紧接杭州湾,拥有大量湿地资源,一方面要尽量避免城市东北部的侵占湿地的围垦活动,加强湿地景观的重塑;另一方面尽量避免城市建设用地对城市中心城区湿地资源的进一步侵占和切割,保护生态用地,重点在于保持西溪湿地、西湖、以及东北部杭州湾湿地的完整性,发挥其生态屏障作用,阻断不利因素和灾害的影响。

(2)实施城市环境生态治理分区管理模式:生态韧性低值集聚的中部和西北区域,应对环境生态风险的能力较低,未来国土空间规划中要通过加强该区域生态空间保护与建设来消除差异化城市生态韧性空间格局;东北区域呈现显著低韧性水平—高排污企业密度集聚分布的部分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。

(3)优化新区发展模式,鼓励紧凑的城市发展:城市东部是杭州未来重要的发展空间,要防止形成“摊大饼”式的开发局面,并大力建设绿色景观。此外,建议杭州政府采用产业升级和转型策略来缓解中心城区的人口和土地压力,并投入更多的资金用于常态下环境治理与生态保护,加大技术与人才流通,努力消除未来城市增长带来的城市内部的生态韧性差异化格局。在未来城市向东部发展的过程中,建议杭州政府逐步探索城市内部的区县之间以生态风险转移为主体的生态补偿制度,缓和城市内部区域生态韧性差异化格局,提高城市整体防范化解生态风险的能力。

参考文献 (References):

- [1] 毕军. 新时期我国环境风险防控面临的多元化挑战. 中国环境管理, 2020, 12(2): 42-43.
- [2] Holling, C.S. Engineering resilience versus ecological resilience. Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [3] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 许义平, 潘军标, 童宁军, 徐继荣, 朱永官. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践. 生态学报, 2018, 38(15): 5297-5304.
- [4] Zhang X L, Li H. Urban resilience and urban sustainability: what we know and what do not know? Cities, 2018, 72: 141-148.
- [5] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望. 地理学报, 2019, 74(11): 2401-2410.
- [6] 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.
- [7] 王祥荣. 崇明世界级生态岛规划建设的国际经验对标、路径与对策. 城乡规划, 2019, (4): 24-29, 44-44.
- [8] 王祥荣, 谢玉静, 徐艺扬, 鲁逸, 李昆. 气候变化与韧性城市发展对策研究. 上海城市规划, 2016(01): 26-31.
- [9] 陈绍晴, 房德琳, 陈彬. 基于信息网络模型的生态风险评价. 生态学报, 2015, 35(7): 2227-2233.
- [10] 陈辉, 李双成, 郑度. 基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 586-593.
- [11] Findlay C S, Zheng L G. Estimating ecosystem risks using cross-validated multiple regression and cross-validated holographic neural networks. Ecological Modelling, 1999, 119(1): 57-72.

- [12] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [13] 毕军, 王华东. 沈阳地区过去 30 年环境风险时空格局的研究. 环境科学, 1995, 16(5): 72-75.
- [14] 张小飞, 王如松, 李正国, 李锋, 吴健生, 黄锦楼, 于盈盈. 城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例. 生态学报, 2011, 31(20): 6204-6214.
- [15] 王祥荣, 樊正球, 谢玉静, 李昆, 曾刚, 苏德, 关庆伟, 任引, 高峻. 城市群生态安全保障关键技术与集成示范——以长三角城市群为例. 生态学报, 2016, 36(22): 7114-7118.
- [16] 张琳琳, 岳文泽, 范蓓蕾. 中国大城市蔓延的测度研究——以杭州市为例. 地理科学, 2014, 34(4): 394-400.
- [17] 陆张维, 徐丽华, 吴次芳, 岳文泽, 吴亚琪. 基于凸壳原理的杭州城市扩展形态演化分析. 地理科学, 2015, 35(12): 1533-1541.
- [18] 夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 史舟, 刘婧鸣, 李效顺. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析——以杭州为例. 生态学报, 2018, 38(01): 73-85.
- [19] 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.
- [20] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [21] 任海, 郭建国, 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.
- [22] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50.
- [23] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
- [24] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [25] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [26] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [27] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [28] 任海, 郭建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估. 热带地理, 2000, 20(4): 310-316.
- [29] Peterson G D. Contagious disturbance, ecological memory, and the emergence of landscape pattern. Ecosystems, 2002, 5(4): 329-338.
- [30] Turner M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20(1): 171-197.
- [31] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与进展. 生态学报, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [32] 赵景柱. 景观生态空间格局动态度量指标体系. 生态学报, 1989, 10(2): 182-186.
- [33] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 童菊儿, 史舟. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系. 生态学报, 2018, 38(17): 6302-6313.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 许倍慎, 周勇, 徐理, 于雷, 吴文斌. 湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征. 生态学报, 2011, 31(24): 7379-7387.
- [37] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局. 生态学报, 2014, 34(2): 247-257.
- [38] 王千, 金晓斌, 周寅康, 阿依吐尔逊·沙木西. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因. 生态学报, 2011, 31(1): 247-256.
- [39] 董玉红, 刘世梁, 安南南, 尹艺洁, 王军, 邱扬. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1860-1871.
- [40] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [41] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [42] 赵林峰, 刘小平, 刘鹏华, 陈广照, 何家律. 基于地理分区与 FLUS 模型的城市扩张模拟与预警. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 517-530.
- [43] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 石洪, 欧金沛. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
- [44] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [45] Zhang D, Wang X R, Qu L P, Li S C, Lin Y P, Yao R, Zhou X, Li J Y. Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region, China. Ecological Indicators, 2020, 119: 106841.
- [46] 赵轩, 彭建东, 樊智宇, 杨晨, 杨红. “双评价”视角下基于 FLUS 模型的武汉大都市区土地利用模拟和城镇开发边界划定研究. 地球信息科学学报, 2020, 22(11): 2212-2226.
- [47] Yue W Z, Liu Y, Fan P L. Measuring urban sprawl and its drivers in large Chinese cities: the case of Hangzhou. Land Use Policy, 2013, 31: 358-370.
- [48] 刘卫东, 谭永忠, 彭俊, 连纲, 张常新, 曹宇. 土地资源学. 上海: 复旦大学出版社, 2010.
- [49] 修春亮, 魏冶, 王绮. 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.
- [50] 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.