

DOI: 10.5846/stxb202102070402

胡凯群, 林美霞, 吝涛, 叶红, 张国钦, 睢晋玲, 陈天翼, 姚霞, 卢新. 快速城镇化过程中的城市蔓延与生态保护冲突空间识别与量化评估——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. 生态学报, 2022, 42(2): 462-473.

Hu K Q, Lin M X, Lin T, Ye H, Zhang G Q, Sui J L, Chen T Y, Yao X, Lu X. Spatial identification and quantitative evaluation of conflict space between urban sprawl and ecological protection in the process of rapid urbanization: A case study of the Yangtze River Delta Eco-Green Integrated Development Demonstration Zone. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 462-473.

快速城镇化过程中的城市蔓延与生态保护冲突空间识别与量化评估

——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例

胡凯群^{1,2}, 林美霞^{1,2}, 吝涛^{1,*}, 叶红¹, 张国钦¹, 睢晋玲^{1,2}, 陈天翼¹, 姚霞^{1,2}, 卢新¹

1 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 如何解决社会经济发展与生态环境保护之间的矛盾是实现区域和城市可持续发展的首要问题, 表现在空间上就是城市无序蔓延与生态环境保护用地的冲突, 本质上是建成区与非建成区的生态系统之间的冲突。以长三角生态绿色一体化发展示范区为例, 基于自然环境因子和社会经济因子构建城市蔓延风险空间量化评估模型, 得到城市蔓延风险空间分布并提取城市蔓延严重风险区; 利用生态侵蚀度指数识别评估生态保护压力空间并提取生态保护压力高值区。根据城市蔓延严重风险区与生态保护压力高值区的重合空间, 对城市无序蔓延与生态保护的冲突程度进行分析, 进而探讨快速城镇化发展过程中二者的协调关系, 为城市国土空间规划与区域生态保护决策提供科技支撑。长三角生态绿色一体化发展示范区案例研究结果表明: (1) 城市蔓延的严重风险区与生态保护压力高值区的重合面积达到 583.83 km²; 其中较高风险区与侵蚀度高的地区重合面积为 311.73 km², 冲突度为 53.39%; 高风险区与侵蚀度高的地区重合面积为 47.70 km², 冲突度为 8.17%。(2) 示范区内各类生态系统中, 耕地生态系统受城市蔓延冲突程度均为最高, 其在较高和高风险区的占比分别为 91.58%、8.42%; 其次是草地生态系统。为协调城市蔓延与生态保护空间的关系, 保障示范区生态绿色一体化发展。进一步识别了示范区内生态预警区和城市蔓延重点关注区, 其中生态预警区内需要充分的生态修复, 降低生态保护压力; 城市蔓延重点关注区在建设时要注意保护原有生态保护压力大的区域, 加强生态工程建设, 管控建设用地规模, 保障蓝绿空间占比。

关键词: 城市蔓延; 生态保护压力; 生态侵蚀度指数; 长三角生态绿色一体化发展示范区

Spatial identification and quantitative evaluation of conflict space between urban sprawl and ecological protection in the process of rapid urbanization: A case study of the Yangtze River Delta Eco-Green Integrated Development Demonstration Zone

HU Kaiqun^{1,2}, LIN Meixia^{1,2}, LIN Tao^{1,*}, YE Hong¹, ZHANG Guoqin¹, SUI Jinling^{1,2}, CHEN Tianyi¹, YAO Xia^{1,2}, LU Xin¹

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502702)

收稿日期: 2021-02-07; 网络出版日期: 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlin@iue.ac.cn

Abstract: How to solve the contradiction between the social economy and the ecological environmental protection is a basic problem to understand the regional and urban sustainable development, which is manifested in the conflict space between urban sprawl and ecological protection. It's an essential conflict between the ecosystem of built-up and unbuilt-up areas. This article selects the Yangtze River Delta Eco-Green Integrated Development Demonstration Zone as the research area. Based on natural environment and socio-economic factors, we constructed a spatially quantitative evaluation model for urban sprawl risks to generate the spatial distribution of several risk areas and extract the serious risk areas of urban sprawl. Moreover, the ecological erosion index was used to identify and evaluate the ecological protection pressure space and extract the high value areas of ecological protection pressure. According to the overlapping space between the serious risk area of urban sprawl and the high value area of ecological protection pressure, the conflict degree between urban sprawl and ecological protection was analyzed for the coordinated relationship between the urban sprawl and ecological protection in the process of rapid urbanization. We aim to provide scientific and technological support for urban territorially spatial planning and regionally ecological protection decision-making. The results showed that: (1) the overlap space between the serious risk area of urban sprawl and the high value area of ecological protection pressure reached 583.83 km². The overlap area between the areas with higher urban sprawl risk and the areas with higher ecological erosion degree was 311.73 km² and the conflict degree was 53.39%. The overlap area of the highest risk area and the highest erosion area was 47.70 km², and the conflict degree was 8.17%. (2) In the demonstration area, the cultivated land ecosystem suffered the highest degree of urban sprawl conflict, accounting for 91.58% and 8.42% in the higher and the highest risk areas, respectively, followed by the grassland ecosystem. In order to coordinate the balance between urban sprawl and ecological protection, and ensure the sustainable development of the Demonstration Zone, this article further identified the ecological early warning area and key concern area in the demonstration area of integrated development of ecological green in the Demonstration Zone. In the construction of the key areas of urban sprawl, attention should be paid to the protection of the original areas under great ecological protection pressure, the ecological engineering construction should be strengthened, the scale of construction land should be controlled, and the proportion of blue and green space should be guaranteed.

Key Words: urban sprawl; ecological protection pressure; eco-erosion index; Yangtze River Delta Eco-Green Integrated Development Demonstration Zone

在快速城镇化进程中,由于城市化和工业化进程的推进使得城市无序蔓延持续对生态环境产生负面影响,这在中国尤为显著^[1]。当前中国正处在社会经济快速发展阶段,自改革开放以来,中国已成为世界第二大经济体^[2],经济产业的发展对用地空间的需求使得城市不断向外扩张,通过侵蚀城市边缘的其他用地空间来满足发展的需要。近年来中国的城镇化率已由 1978 年的 17.92% 提高到 2019 年的 60.60%,年均一个百分点的增长速度在全球范围内领先。城市群作为高度一体化的城市集群,是中国空间城镇化的主要形式,区域化的城镇开发模式是目前城镇建设的主流。尽管我国实施了严格的城市规划体系,但城镇化带来人口和经济增长同时,仍经常伴随着城市无序蔓延与生态破坏问题。城市蔓延,即失控的城市化地区蔓延现象,是一种低效、无序的空间开发模式,也是郊区化的特别形式,城市的形态往往呈现分散、低密度、依赖汽车交通的特点。城市的“边缘”无序蔓延到周边的自然景观,人类频繁的活动干扰使得城市周边及内部的自然生态系统退化和破碎,所有这些都对区域范围内的生态系统造成了相当大的压力^[3]。城市蔓延对生态环境存在显著的负面影响^[4],具体表现在侵占耕地资源、破坏湿地资源、生物多样性受损、碳排放增加、环境污染等问题^[5-7],严重影响城市的可持续发展。

与按照城市规划的空间发展不同,城市蔓延是一种自发性现象,尤其是当已有的城市空间达到饱和,市场或政府自然会寻求适宜建设的用地空间进行开发;同时经济水平的提升导致居民对生活水平的要求上升,相比紧凑的城市空间,向郊区寻求更大、更优质生的活空间的需求是城市人口郊区化转移的重要原因之一^[8]。

市场经济的自发推动和政府政策的推波助澜是城市蔓延的内部因素,而自然资源条件的优越性往往是促使城市向其蔓延的外部因素。城市向外扩张、产业发展的初期必然会对生态环境造成破坏^[9],然而城市蔓延与生态保护是相互耦合的,城市蔓延中如果被转换的用地使用得当,几乎不会对生态环境质量造成损害^[10],但城市蔓延若不加以管控,最终会反噬城市发展,使得区域生态系统受到侵蚀、生态保护压力增大。因此,在这一阶段,探讨如何对城市蔓延与生态保护的空间进行协调,减少和控制城市蔓延对生态环境的负面影响是很有必要的,其关键就是识别城市蔓延与生态保护的冲突空间,但目前在该领域对两者之间产生冲突的空间位置和面积大小的专项量化研究仍有不足。以中国为例,在城市扩张过程中采取的生态保护措施通常是考虑生态系统自身的重要性和脆弱性来划定生态红线、重要保护区以及永久性农田,但城市蔓延和生态保护的冲突空间,即建成区与非建成区的生态系统之间的冲突却很少被关注到。建成区与非建成区的生态冲突表现在两方面,一是建成区侵占非建成区的用地空间的风险,二是与建成区邻接较多的非建成区因人为活动增加造成的生态系统退化或破坏的生态压力。二者存在协同效应,即一个地区的生态系统同时面临这两种情况,产生的生态破坏就会增加,重合面积越大,冲突程度就越高。因此,精确地识别建成区与非建成区的两种生态冲突在空间上的重合部分,量化城市蔓延造成的生态冲突度,是有效控制城市蔓延带来的负面影响,协调城市蔓延与生态保护空间的前提。

中国的新型城镇化和生态文明发展战略,要求从社会-经济-自然复合生态系统的角度建设和管理城市,以实现城市发展和生态环境耦合,从而达到可持续发展^[11-12]。在区域和城镇建设中识别和解决城市无序蔓延与生态保护的关系可以为当地居民提供可持续福利,维持和改善区域和城市的生态系统服务能力^[13]。在城市群中,城市蔓延与生态保护的关系更为复杂,研究两者的协调关系,有助于制定知识型城市规划战略,实现有效的城市扩张途径^[14]。长三角城市群是我国“一带一路”和长江经济带的重要交汇处,其生态效应无论是在科学研究还是国家政策上都受到广泛关注。长三角生态绿色一体化发展示范区(下文简称“示范区”)是实施长三角一体化发展战略的先手棋和突破口,是探讨如何协调生态保护与城镇化,实现区域可持续发展和生态文明建设的一大尝试。本研究以长三角生态绿色一体化发展示范区为例,通过从土地利用变化的角度评估城市蔓延风险,并结合从空间邻接关系的角度评估生态压力的量化空间分析方法,以期:(1)识别现有城市蔓延和生态保护的冲突空间的地理位置与面积大小;(2)提出城市蔓延和生态保护空间协调的应对策略。

1 示范区概况及数据源

1.1 示范区概况

长三角生态绿色一体化发展示范区(30°45′ 0″—31°17′38″N, 120°, 21′ 50″—121° 19′ 26″E),位于我国东部沿海,范围包括上海市青浦区、江苏省苏州市吴江区、浙江省嘉兴市嘉善县,面积约 2413 km²(含水域面积约 350 km²)。示范区属于亚热带季风气候,温和湿润,四季分明,雨量充沛,年平均气温在 16—18℃ 左右,地形以平原为主,地势低平,平均海拔高度为 4m 左右。示范区内的生态环境质量较好,生态价值重要,地处太湖流域东部的碟形洼地,是江南水乡的核心地区,水系发达,河港湖塘纵横,分布有吴淞江、太河泾港、太浦河、大寨河、圩水港、贺汇港、斜塘等河流湖泊。截止至 2018 年,示范区现状建设用地上 728 km²,开发强度达到 30.2%,常住人口 310.8 万人,长三角生态绿色一体化发展示范区以民营经济和外向型制造业为主,单位建设用地 GDP 仅 4.8 亿元/km²,在上海、苏州、嘉善县级行政单元中处于下游。

2020 年出台的《长三角生态绿色一体化发展示范区国土空间总体规划(2019—2035 年)草案公示稿》(以下简称草案)是指导长三角生态绿色一体化发展示范区长远发展和总体空间安排的法定规划,明确了空间战略、区域协同和底线管控等原则。草案在区内同步设置了发挥先行示范作用的先行启动区,启动区范围包括金泽、朱家角、黎里、西塘、姚庄五个镇,全域约 660 km²。在空间结构上将示范区分为青浦城区、吴江城区、嘉善城区、盛泽镇区和先行启动区五片城镇集群,在未来建设中将以城镇集群的形式进行开发建设。

1.2 数据来源及处理

本研究涉及的数据包括:(1)GDEMDEM 30m 分辨率的数字高程数据,来自地理空间数据云(<http://www.>

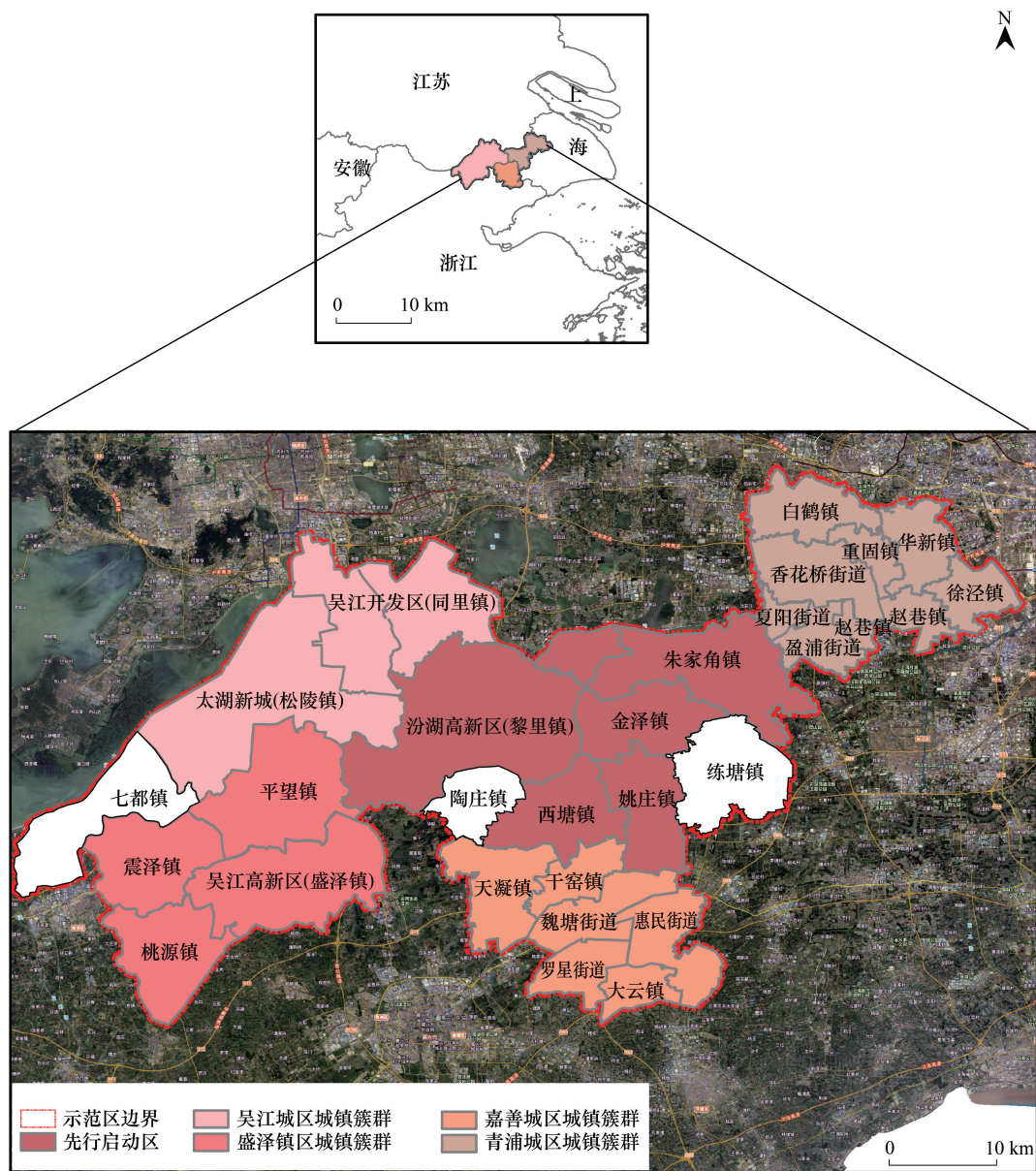


图1 示范区地理位置示意图

Fig.1 Sketch map of geographic location of study areas

gscloud.cn/);(2)空间分辨率为30m的2015年土地利用现状和土地覆盖数据以及人口空间分布数据,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)和国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);(3)长三角生态绿色一体化发展示范区范围矢量数据,由2015年全国行政边界数据裁剪获得;(4)公共设施(包括道路、基础设施、银行网点等)的空间数据集,来源于2016年百度地图和高德地图的兴趣点(POIs)。所有数据均在ArcGIS中的WGS-84坐标系中进行地理校准。

2 研究方法

2.1 城市蔓延风险空间预测

城市蔓延风险评价需要囊括城市蔓延的内外驱动条件,基于社会经济因素和自然环境因素量化城市蔓延风险过程中将非建成区转变为建成区的风险,是表征建成区与非建成区生态系统之间冲突程度的评价方法。

目前对城市蔓延的测量研究,大多是通过人口密度、城市路网可达性、土地利用现状、中心区活力等多维测度指标^[15-16]的多年数据来衡量城市蔓延的程度,本研究提出的城市蔓延风险评价的重点是从土地利用的角度,以乡镇行政边界为评价单元,预测识别城市蔓延风险的空间分布,并进一步提出重点关注区。

城市蔓延,从土地利用结构上看,是非建设用地向建设用地转换的过程,对土地的要求主要是地形和地质条件,同时也受到经济、交通、区位、生态、政策等多方面的影响^[17-18]。风险评价的指标选取参考城市蔓延度的多维指标^[19-21],基于因地制宜原则、可获取性和可操作性原则、选择稳定性原则、因子相关性原则,将风险评价因子分为自然环境因子和社会经济因子两大部分,选取坡度、高程、地形起伏度、到水体距离、土地利用现状、人口密度、路网可达性、经济活力、基础设施完善度、建成区距离等持续影响城市蔓延风险的参评因子,构建风险评价指标体系(指标选取依据及解析详见表1),通过 ArcGIS 数据处理得到单因子评价结果。

表 1 城市蔓延风险空间评价指标体系
Table 1 Evaluation Index System of Urban Sprawl Risk Space

目标层 Target layer	准则层 Points target layer	指标层 Index layer	指标解析 Indicators of parsing
城市蔓延风险空间评价 Evaluation of urban sprawl risk space	自然环境因子	坡度	是反映地形条件的基本因子,决定了用地开发的难易程度,坡度越大,建设工程难度越大,是城市蔓延风险评价中必须考虑的因素。
		高程	是反映地形条件的基本因子,建设用地一般建在地势平缓地区,地势过高不宜开发,对城市蔓延的用地选取有重要的参考价值。
		地形起伏度	是指在一个特定范围内的海拔最高点与最低点之间的差值,地形起伏剧烈的地区不适宜建设,进一步用来修正风险评价结果。
		到水体距离	指以水体为中心构建缓冲区的距离,水体对附近土地的开发建设适宜性影响较大,距离水体越近越不适宜开发建设。
		土地利用现状	是城市当前的用地结构,决定了各类用地转换为建设用地的难易程度,对城市蔓延风险评估尤为重要。
	社会经济因子	人口密度	人口密度的空间分布能对城市蔓延风险评价进一步校正,人口密度相对较低或呈下降趋势代表城市蔓延。人口密度划分标准参考 ^[22] 。
		交通优势度	交通的便利性对城市用地选择具有很强的导向性,道路的建设会助长城市的蔓延,本研究选取路网密度 ^[23] 即各评价单元(本研究为 1km 网格)的公路通车里程与其土地面积的比值表征交通优势度。
		经济优势度	经济活动对城市开发具有很强的导向性,经济活力高的区域城市蔓延风险高,本研究选取银行网点密度 ^[24] 表征经济优势度,银行网点为大量离散点,调用 ArcGIS 的 Kernel Density 工具计算银行网点密度。
		基础设施完善度	指城市已有基础设施的完善程度,基础设施建设是城市正常运转发展的重要保障,完善度越高的区域城市蔓延的可能性越大。本研究选取公厕设施 POIs 密度来表征基础设施完善度。
		建成区距离	指以已有建成区为中心构建缓冲区的距离 ^[25] ,建成区的集聚效应对城市蔓延的用地开发具有辐射带动作用。

前文提到,城市蔓延存在内因与外因的推动,城市建成区的扩张往往趋向于自然条件优越的地区。基于城市蔓延的外部因素,从城市开发建设的适宜与难易程度的角度考虑,地势平缓、距离水体有一定距离、容易开发并转换为建成区的平地相较于地势过高、靠近水体、不易开发的山地,更容易产生城市蔓延现象;未利用地和建设用地是最适宜转化为建成区的地块,其次是草地、耕地、林地和水域湿地。从城市蔓延的内部因素来看,当一个区域的人口密度相对较低或呈现下降趋势则代表该区域可能出现城市蔓延现象^[26-27];由于城市蔓延现象在建成区边缘出现的可能性相对较高,因此本研究认为,距离建成区越近,出现城市蔓延的风险越大;公共交通越便利、城市经济活力越高与基础设施越完善的地区,出现城市蔓延现象的可能性也越高。考虑到示范区的土地利用现状数据中没有未利用地,基于实际情况,根据等分原则并参考相关评价指标的划分依

据^[28-30],构建城市蔓延风险空间评价指标划分标准,见表2。

本研究采用 AHP 法对相应指标权重进行计算,根据两两对比,构建判断矩阵^[31],确定参评因子的权重。对不同指标按风险低到风险高五个等级依次赋值为 1、2、3、4、5,其中 1 表示在单因子风险评价中处于风险最低的区域,5 则表示该图层在单因子风险评价中处于最高的风险区。结合指标权重(表 2),利用 ArcGIS 系统的栅格计算器将单因子评价结果进行叠加,叠加后的图层取值范围在[1,5]之间,将叠加后的结果分为五类^[32],[1]为低风险区,[2]为较低风险区,[3]为中风险区,[4]为较高风险区,[5]为高风险区,由此确定预测的示范区城市蔓延风险空间评价结果。根据评价结果提取较高风险区与高风险区合并为城市蔓延的严重风险区,并通过与现有建成区比对,进一步得到城市蔓延风险空间中的重点关注区。

表 2 城市蔓延风险空间评价指标划分标准与权重

Table 2 Standard and Weight of Evaluation Index of Urban Sprawl Risk Space

目标层 Target layer	准则层及权重 Points target layer and weight	指标层 Index layer	单位 Unit	5	4	3	2	1	权重 Weight
城市蔓延风险 空间评价 Evaluation of urban sprawl risk space	自然环境因子 (0.5)	坡度	°	<3	38	8—15	15—25	>25	0.24
		高程	m	≤5	6—25	26—50	51—70	>70	0.11
		地形起伏度	°	0—4	4—10	10—20	20—40	>40	0.1
		到水体距离	m	>150	100—150	50—100	30—50	0—30	0.20
		土地利用现状		建设用地	草地	耕地	林地	水域湿地	0.35
	经济社会因子 (0.5)	人口密度	人/km ²	<400	400—500	500—1000	1000—2000	>2000	0.06
		交通优势度		0.2—0.4	0.1—0.2	0.06—0.1	0.02—0.06	0—0.02	0.38
		经济优势度		0.87—1.2	0.58—0.87	0.32—0.58	0.14—0.32	0—0.14	0.3
		基础设施完善度		0.63—1	0.36—0.63	0.16—0.36	0.05—0.16	0—0.05	0.15
		建成区距离	m	建成区内	建成区距离 <500	建成区距离 <1000	建成区距离 <1500	建成区距离 >2000	0.11

2.2 生态保护压力空间识别

生态保护压力空间识别是通过评估区域内生态系统受城市蔓延带来的胁迫程度,以此识别和判断生态系统的结构和功能是否受到破坏^[33],从而得到需要进行生态保护的空间,是表征建成区与非建成区生态系统之间冲突程度的评价方法。城市蔓延过程中的生态压力主要是来源于人类频繁的经济和社会活动干扰,国内外专家学者常用生态指标来评估城市化造成的区域生态压力,但是往往忽略了城市与景观之间的空间邻接关系,运用景观指标来量化城市蔓延导致的人类频繁活动干扰对生态系统的压力被证明是一种有效的方法^[34]。城市用地扩张对周边自然生态系统造成了强烈的压力,林美霞等^[35]认为人工景观与生态景观之间的空间镶嵌关系对探索城市化对区域生态压力的影响有很大的潜力。由于两者空间镶嵌关系导致其生态胁迫效应主要发生在景观边界处^[36],所以本研究从生态系统结构和功能易受外部干扰的角度出发,对示范区进行生态压力评价,通过计算城市蔓延过程中建设用地与非建设用地的“交接地带”之间的邻接斑块边长与面积变化,识别出最易受到城市蔓延胁迫的生态保护压力空间的分布。

由于本研究关注的是快速城镇化过程中城市建成区扩张造成的生态冲突,在生态保护压力评价中重点考虑的是人工景观中的建成区景观对区域内生态景观的胁迫。而耕地本身具有生态系统功能,并且是城市扩张的主要受胁迫者,因此将其作为生态景观进行分析。基于此,根据国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),将示范区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地 6 大类,人工景观主要为建设用地,生态景观包括耕地、林地、草地、水域等。本研究通过土地利用数据,基于景观空间邻接关系,在综合考虑区域人工景观面积以及人工景观与生态景观的邻接边长、面积和斑块数量等情况下,引入林美霞等^[35]所提出的生态侵蚀指数(Ecological Erosion Index, EEI)来识别示范区的生态保护压力空间分布。

生态侵蚀指数是计算每一个评价单元里人工景观对生态景观的胁迫程度,由于计算过程的复杂性,计算

一个规则的格网里的生态侵蚀度相对于不规则的行政边界要更为容易操作,并且更加科学准确。考虑到建成区社区单元是表征城市的最小单元,再结合以往长三角相关项目的工作经验与示范区实际情况,25km²可以近似看做一个建成区社区单元面积。因此,本研究以5km格网为尺度,通过地理空间统计分析计算每个格网单元里的生态侵蚀指数来表征快速城镇化进程中的生态保护压力,其计算公式如下:

$$V_i = (L_i + U_i) / 2 \quad (1)$$

$$EEI = A + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

式中,EEI为人工景观对生态景观的生态侵蚀指数,指数越大,生态侵蚀度越高;A表示人工景观面积占全部景观面积的比例;n代表生态景观类型的数量。当A达到1的情况除外,此时全部景观均为人工景观。当A不为1时,EEI越大,则人工景观可侵蚀扩张的空间越小,其区域生态景观可自发演变更新的空间也越小。 V_i 指生态景观受人工景观的胁迫指数; L_i 代表第*i*个生态景观类型与人工景观的空间邻接长度占其边缘总长的百分数; U_i 代表第*i*个生态景观类型与人工景观类型的空间邻接斑块数目占其斑块总数的百分数。

EEI值越大,生态景观受到人工景观的胁迫越高,其理论值的范围在0—2之间。林美霞等^[35]在研究中发现EEI的取值范围随着空间尺度的变化而变化,尺度越大,EEI值越小,例如5km栅格尺度下的EEI值范围为0—2。将EEI值和 V_i 值分为5个等级(EEI<0.2为侵蚀度低、0.2≤EEI<0.5为侵蚀度较低、0.5≤EEI<0.8为侵蚀度中等、0.8≤EEI<1为侵蚀度较高、EEI≥1为侵蚀度高),侵蚀度低的地区生态保护压力小,侵蚀度较低的地区生态保护压力较小,侵蚀度中等的地区生态保护压力中等,侵蚀度较高的地区生态保护压力较高,侵蚀度高的地区生态保护压力高。提取侵蚀度较高区域和侵蚀度高区域合并为本研究中的生态保护压力高值区。

2.3 城市蔓延与生态保护冲突空间量化识别

考虑到当一个区域同时存在城市蔓延风险与生态保护压力时,由于协同效应,该区域面临的生态冲突也会相应增加,因此本研究将城市蔓延风险与生态保护压力的重合部分定义为冲突空间,其中各组分占重合面积的比例为生态冲突度。本研究认为冲突空间重点要关注的是城市蔓延风险评价结果中的严重风险区与生态压力评价结果中的生态保护压力高值区重合的部分。根据2.1和2.2提到的方法得到严重风险区和生态保护压力高值区,并通过空间叠加,得到二者的重合部分即为城市蔓延风险和生态保护压力存在严重冲突的空间,根据重合部分的占比计算出它们的生态冲突程度。

通过以上方法得到的城市蔓延风险与生态保护压力的冲突空间指明了城市蔓延过程中现有建成区与非建成区之间的生态冲突在空间上的具体位置与分布,将2.1中提到的城市蔓延风险的重点关注区叠加生态保护压力高值区,就可以进一步得到示范区在未来城市扩建中需要关注的生态预警区及其生态冲突程度。结合2.2中公式(1)提到的生态景观受人工景观的胁迫指数 V_i ,可以量化生态冲突空间与生态预警区中各类自然生态系统被建成区侵蚀的面积、占比及空间位置,为生态保护或生态修复规划制定提供科学依据。

3 研究结果

3.1 示范区城市蔓延风险空间评价结果

根据以上评价方法,将单因子评价结果进行空间叠加得到最终的示范区城市蔓延风险空间综合评价结果(图2)。基于风险评价模型计算结果,将示范区划分为低风险区、较低风险区、中风险区、较高风险区、高风险区5类区块。各类风险区的面积及比例见表3。

从示范区城市蔓延风险分区面积分布来看,中风险区的分布最广,面积达到1337.67km²,占比为57.15%;较高风险区的面积为939.07km²,占比40.12%,位居第二。示范区的城市蔓延高风险区占比仅2.20%相对较小,面积为51.45km²。将尺度缩放到示范区内的城镇簇群来看,盛泽镇区城镇簇群的较高风险区和高风险区占比最高,面积为219.31km²,主要分布在吴江高新区(85.47km²)、平望镇(50.46km²)、震泽镇(43.84km²)、桃

源镇(39.55km²);吴江城区城镇集群、嘉善城区城镇集群、青浦城区城镇集群、先行启动区的较高、高风险区分布比例相似,分别为17.29%、17.30%、18.54%、18.61;空间分布上,吴江城区主要出现在吴江开发区(84.83 km²)、嘉善城区主要出现在魏塘街道(43.62km²)、青浦城区主要出现在香花桥街道(58.08km²)、先行启动区主要出现在汾湖高新区(79.42km²)。

根据2.1中的方法,将现有的建成区空间分布与通过城市蔓延风险评价得到的严重风险区叠加,进一步得到示范区未来可能出现城市蔓延风险的重点关注区(图3),其空间分布符合城市蔓延分散式、破碎化、放射状的分布特征。在重点关注区中,主要以较高风险区为主,面积为433.78 km²,主要分布在盛泽镇区城镇集群(103.14 km²)。

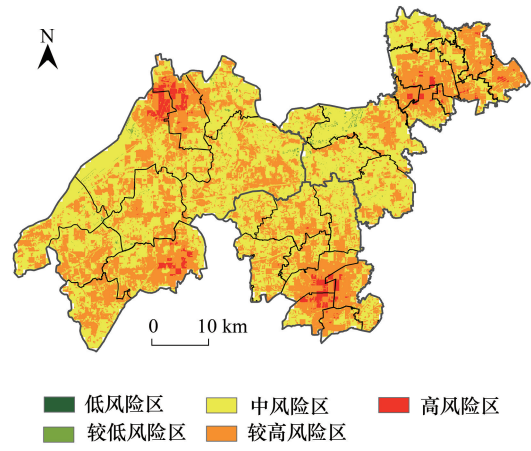


图2 示范区城市蔓延风险空间综合评价结果
Fig.2 Comprehensive Evaluation of Urban Sprawl Risk Space of Demonstration Zone

表3 示范区各级风险区面积汇总表

Table 3 Summary of the Division of Risk for Demonstration Zone

风险区 Risk Area	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	风险区 Risk Area	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
低风险区 Low risk area	0.0009	0	较高风险区 Higher risk area	939.07	40.12
较低风险区 Medium low risk area	12.45	0.53	高风险区 Highest risk area	51.45	2.20
中风险区 Medium risk area	1337.67	57.15	合计 Total	2340.64	100

3.2 示范区生态保护压力空间评价结果

根据上述评价方法计算示范区的生态侵蚀指数,得到五类非城市建设用地生态系统受建设用地的胁迫指数 V_i 和综合指数EEI,以此得到示范区的生态压力空间评价与分布结果(图4)。生态侵蚀度分级面积及占比见表4。

从示范区各级生态侵蚀程度的面积分布来看,侵蚀度中等的区域面积最大,为1032.80 km²,占比约为43%。侵蚀度高即生态保护压力大的区域主要分布在吴江城区、盛泽镇区、青浦城区、嘉善城区四片城镇集群,与城市蔓延高风险区分布相似。该区域生态侵蚀度指数大于1,说明生态景观受到人工景观的胁迫程度高,生态景观自发演变修复的空间被占据,生态破碎化严重。

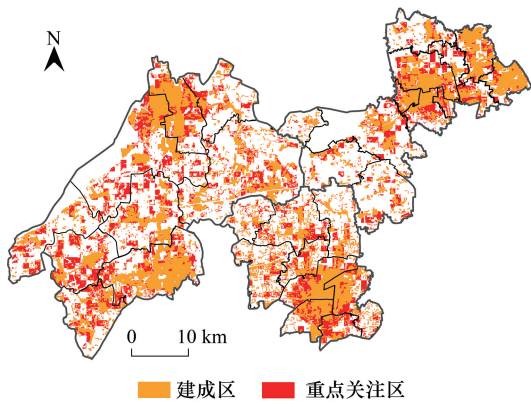


图3 示范区城市蔓延风险重点关注区
Fig.3 Urban Sprawl Risk Focus Space of Demonstration Zone

表4 示范区生态侵蚀度分级面积汇总表

Table 4 Summary of the Area of Ecological Erodibility Classification for Demonstration Zone

侵蚀度等级 Erosion grade	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	侵蚀度等级 Erosion grade	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
侵蚀度低 Low erosion	10.60	0.4	侵蚀度较高 Higher erosion	487.80	20.3
侵蚀度较低 Medium Low erosion	388.80	16.2	侵蚀度高 Highest erosion	480.70	20.1
侵蚀度中等 Moderate erosion	1032.80	43	合计 Total	2400.70	100

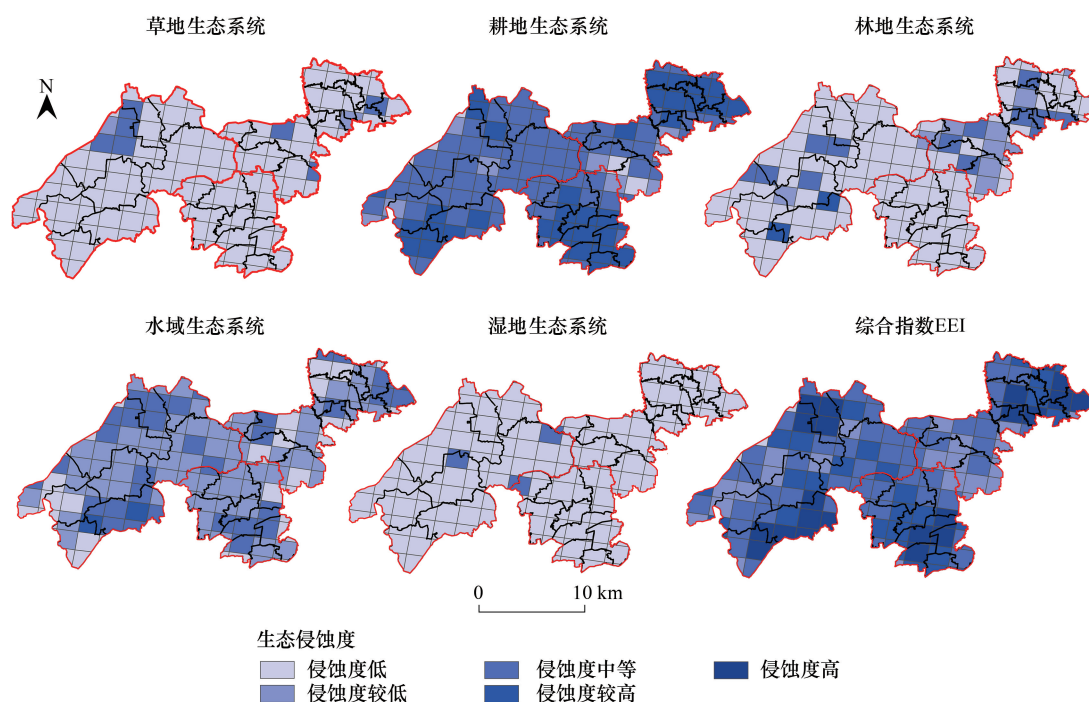


图4 示范区生态压力评价结果

Fig.4 Comprehensive Evaluation of Ecological Stress of Demonstration Zone

结合五类非城市建设用地生态系统的受侵蚀空间分布,可以发现,示范区内耕地生态系统的生态保护压力最大,其次是水域生态系统和林地生态系统,草地生态系统侵蚀情况主要分布在建成区内部。吴江城区城镇簇群的草地生态系统和耕地生态系统遭到人工景观即建设用地的胁迫程度高,占比达到 22.22% 和 64.44%,是造成该区域的生态保护压力大的主要原因。盛泽镇区城镇簇群生态保护压力大的原因则是由于该区域内的耕地、林地、水域生态系统遭到了严重侵蚀,占比分别为 44.12%、19.12%、14.71%。嘉善城区城镇簇群的建设用地侵占耕地生态系统是造成生态保护压力大的主要原因,占比高达 79.10%。青浦城区城镇簇群的草地、耕地、水域生态系统遭到建设用地侵蚀是该区域生态保护压力大的原因,占比分别为 7.14%、29.37%、28.57%。先行启动区的生态保护压力相比其他四个区域较低,该区域遭到胁迫的生态系统主要是草地、耕地和湿地生态系统,草地生态系统侵蚀状况存在于朱家角镇,占比为 2.13%;耕地生态系统侵蚀的占比为 78.72%,其中有 28.38% 的侵蚀集中发生在汾湖高新区;湿地生态系统侵蚀占比为 5.32%,有 60% 的侵蚀状况发生在汾湖高新区。

3.3 城市蔓延与生态保护冲突空间分析

根据 2.1 和 2.2 提到的方法,分别提取城市蔓延风险评价结果中的严重风险区和生态压力评价中的生态保护压力高值区,通过空间叠加,得到城市蔓延与生态保护的冲突空间(图 5),并计算他们的生态冲突程度。严重风险区与生态保护压力高值区的重合部分面积及占比如表 5 所示,两者的重合空间达到 583.83 km²,其中较高风险区与侵蚀度高的地区重合面积为 311.73 km²,冲突度为 53.39%;高风险区与侵蚀度高的地区重

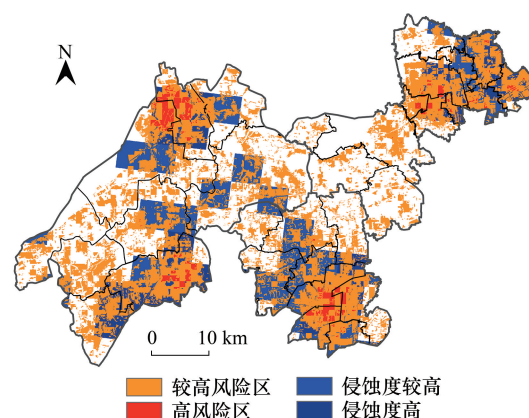


图5 示范区城市蔓延风险与生态压力评价空间冲突分布

Fig.5 Spatial Conflict Distribution of Urban Sprawl Risk and Ecological Stress Evaluation of Demonstration Zone

合面积为 47.70 km²,冲突度为 8.17%。如图 5 所示,城市蔓延严重风险区本身就存在着极大的生态保护压力,其中较高风险区与生态侵蚀度高冲突最高的区域主要分布在青浦城区城镇簇群(133.62 km²)中的香花桥街道和徐泾镇;其次是盛泽镇区城镇簇群(123.00 km²)中的吴江高新区。

表 5 示范区城市蔓延风险与侵蚀度重合空间面积及冲突度

风险区 Risk Area	侵蚀度较高 Moderate high erosion degree		侵蚀度高 High erosion degree	
	重合面积 Overlap area/km ²	冲突度 Conflict degree/%	重合面积 Overlap area/km ²	冲突度 Conflict degree/%
较高风险区 Higher risk area	221.69	37.97	311.73	53.39
高风险区 Highest risk area	2.71	0.46	47.70	8.17

各类非城市建设生态系统的胁迫指数 V_i 高值区在城市蔓延的严重风险区中的面积及占比如表 6 所示,耕地生态系统作为转换成建设用地的首选,受到的冲突程度都是最高的,在较高和高风险区的占比分别为 91.58%、8.42%,其次是草地生态系统,第三分别是水域生态系统、林地生态系统和湿地生态系统,量化说明了示范区在城市蔓延过程中最易受到胁迫和侵蚀风险的生态系统类型及其空间布局。

表 6 城市蔓延严重风险区中各类生态系统 V_i 高值面积与冲突度

风险区 Risk Area	草地生态系统 Grassland ecosystem		耕地生态系统 Cultivated land ecosystem		林地生态系统 Woodland ecosystem		水域生态系统 Aquatic ecosystem		湿地生态系统 Wetland ecosystem	
	重合面 积/km ²	冲突度/%	重合面 积/km ²	冲突度/%	重合面 积/km ²	冲突度/%	重合面 积/km ²	冲突度/%	重合面 积/km ²	冲突度/%
较高风险区 Higher risk area	66.46	81.42	419.18	91.58	31.27	98.25	34.86	86.32	17.30	100
高风险区 Highest risk area	15.17	18.58	38.53	8.42	0.56	1.75	5.53	13.68	0	0

基于 2.3 提到的方法,将城市蔓延风险的重点关注区叠加生态保护压力高值区,可以进一步得到示范区在未来城市扩建中需要关注的生态预警区(图 6)。该区域既是城市蔓延过程中可能受到侵蚀的用地空间,本身也存在着严重的人为干扰造成的生态压力,其中有 21.57 km² 的草地生态系统受到严重侵蚀,主要分布在吴江城镇簇群(太湖新城)和青浦城镇簇群(徐泾镇、赵巷镇);青浦、嘉善、吴江、盛泽四个城镇簇群以及先行启动区中共有 130.75 km² 的耕地生态系统受到严重侵蚀,其中作为示范区实施生态绿色一体化政策的先行启动区,西塘镇的耕地生态系统的破坏应当重点关注;占地 14.16 km² 的林地生态系统和 11.24 km² 的水域生态系统的侵蚀主要发生在盛泽城镇簇群(桃源镇、吴江高新区)。

4 讨论

快速城镇化进程中,城市蔓延和生态保护的空间协调问题是实现区域和城镇可持续发展的核心问题,重点就在于识别建成区与非建成区生态系统之间的冲突。从土地利用角度看,两者的生态冲突表现为建成区侵

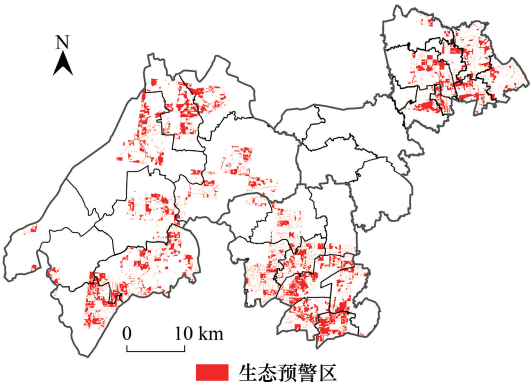


图 6 示范区生态预警区
Fig.6 Ecological Warning Area of Demonstration Zone

占非建成区的风险;从空间邻接关系看,两者的生态冲突表现为与建成区邻接较多的非建成区由于人为活动会对生态系统本身产生负面影响,进而造成生态系统退化或者破坏的压力。当一个区域同时存在这两种情况的时候,由于协同效应,该区域面临的生态冲突也会相应增加。本研究通过分析驱动城市蔓延的内因与外因,基于自然环境因子与经济社会因子,构建城市蔓延风险评价模型,以此预测城市蔓延即建成区侵占非建成区的风险空间;通过生态侵蚀指数,对人为活动影响造成的生态压力进行空间量化,得到生态保护的壓力空间;通过空间叠加,对两者的重合空间进行分析,计算区域生态系统在同时面临被建成区占用的风险与被建成区内的人类活动负面影响的情况下,产生的生态冲突程度。

城市蔓延风险评价模型区别于常见的城市蔓延度计算,是基于研究区的生态系统现状,在城市蔓延测度指标的基础上,考虑城镇开发中土地利用转换的难易程度,构建相应的评价指标体系,预测未来在城市蔓延过程中可能存在的风险空间,并且通过与现有建成区叠加,进一步识别城市蔓延风险空间中的重点关注区。而通过生态侵蚀度指数识别生态保护压力空间的方法也与常见的生态压力评价不同,是在考虑空间占用和邻接关系的基础上,计算每个评价单元里人工景观对生态景观的胁迫程度以及各类生态系统受到的胁迫程度。同理,该方法也可以用来评估不同生态景观之间的相互作用,例如退耕还林、退耕还草、湿地建设等受人为调控比较显著的生态景观之间的转换,但本研究重点关注建成区对其他生态景观的作用。

本研究提出的方法在尺度上能精确识别到乡镇级别的城市蔓延风险与生态保护压力,在关注重点上能明确提出各类生态系统受到的胁迫程度以及它们的空间分布。识别城市蔓延风险与生态保护压力的冲突空间以及因为协同效应增加的生态冲突空间位置,对相关部门开展生态修复规划、诊断生态修复空间、划定生态控制线等措施具有指导意义。研究过程中,对城市蔓延风险评价的指标因子权重选取带有一定的主观因素,且由于数据获取的局限性,难免有遗漏其他评估指标,在未来的研究中,对城市蔓延风险评价指标体系的构建以及生态侵蚀指数的利用还需要根据地方特征进一步进行科学论证,满足实际需求。

5 结论

本研究基于长三角生态绿色一体化发展示范区案例得到以下结论:

(1)将评价尺度缩放到乡镇级别,可以发现城市蔓延严重风险区主要是分布在盛泽镇区城镇集群内的吴江高新区、嘉善城区城镇集群内的魏塘街道、青浦城区城镇集群内的香花桥街道和先行启动区内的汾湖高新区。其中,城市蔓延风险重点关注区的面积为 433.78 km^2 ,主要分布在盛泽镇区城镇集群。未来城市建设中,建议对蔓延风险重点关注区中已经存在生态侵蚀情况的区域进行保护,避免二次破坏,应当加强生态修复工程建设,管控建设用地规模,保障蓝绿空间占比。

(2)长三角生态绿色一体化发展示范区的生态保护压力高值区的面积为 968.5 km^2 ,主要分布在吴江城区、盛泽镇区、青浦城区、嘉善城区四片城镇集群。其中,以耕地生态系统受到的建成区侵蚀的程度最高,五片城镇集群的耕地生态系统都受到了不同程度的侵蚀,以嘉善城区城镇集群和先行启动区内的耕地生态系统受到的侵蚀程度最严重。这是因为耕地是多种用地类型中最容易转换为建设用地的土地,在城市扩张过程中,耕地资源是最先遭到破坏的。除了耕地生态系统外,各个城镇集群其他生态系统受到严重侵蚀的类型大不相同,吴江城区城镇集群的草地生态系统,盛泽镇区城镇集群的林地生态系统,青浦城区城镇集群的水域生态系统,先行启动区的湿地生态系统是除耕地生态系统外主要的侵蚀类型。因此,本研究建议,未来城市规划中,要根据实际情况,保护现有耕地,并修复受损耕地资源。根据各区域生态系统受侵蚀的类型,有针对性的开展相关生态修复项目。

(3)通过城市蔓延风险重点关注区与生态保护压力高值区的空间叠加,得到的长三角生态绿色一体化发展示范区生态预警区的面积为 2018.02 km^2 ,其中有 $21.57.75 \text{ km}^2$ 的草地生态系统、 130.75 km^2 的耕地生态系统、 4.16 km^2 的林地生态系统、 11.24 km^2 的水域生态系统受到严重侵蚀。该区域既是城市蔓延过程在可能侵蚀的用地空间,本身也存在着严重的人为干扰造成的生态压力,主要分布在现有建成区边缘,具有放射状、分

散式、破碎化的特征,但这些区域并未在已有城市规划中作为重点关注的生态保护区或者缓冲区。因此,需要对该区域的生态系统现状进一步评估,结合实际,对已经存在的生态问题开展生态修复,降低生态脆弱度,并以冲突较小的景观区域为核心进行生态廊道建设。

参考文献 (References):

- [1] Monkkonen P, Comandon A, Escamilla J A M, Guerra E. Urban sprawl and the growing geographic scale of segregation in Mexico, 1990—2010. *Habitat International*, 2018, 73: 89-95.
- [2] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352 (6292): 1455-1459.
- [3] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [4] 李强, 高楠. 城市蔓延的生态环境效应研究——基于 34 个大中城市面板数据的分析. *中国人口科学*, 2016, (6): 58-67.
- [5] 王家庭, 赵丽, 冯树, 赵运杰. 城市蔓延的表现及其对生态环境的影响. *城市问题*, 2014, (5): 22-27.
- [6] Sarkodie S A, Owusu P A, Leirvik T. Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034049.
- [7] Wang S J, Wang J Y, Fang C L, Li S J. Estimating the impacts of urban form on CO₂ emission efficiency in the Pearl River Delta, China. *Cities*, 2019, 85: 117-129.
- [8] 张卫良. 杭州城市空间蔓延与区域发展逻辑. *杭州师范大学学报: 社会科学版*, 2020, 42(5): 111-120.
- [9] Feng D, Li J, Li X T, Zhang Z S. The effects of urban sprawl and industrial agglomeration on environmental efficiency: evidence from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Sustainability*, 2019, 11(11): 3042.
- [10] Chen D L, Lu X H, Liu X, Wang X. Measurement of the eco-environmental effects of urban sprawl: theoretical mechanism and spatiotemporal differentiation. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 6-15.
- [11] Zhao J Z, Dai D B, Lin T, Tang L N. Rapid urbanisation, ecological effects and sustainable city construction in Xiamen. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2010, 17(4): 271-272.
- [12] 刘佳坤, 吝涛, 张箫, 邓富亮, 张国钦, 赵宇, 叶红, 李新虎. 中国快速城镇化地区生态城市建设问题与经验——以厦门市为例. *中国科学院大学学报*, 2020, 37(4): 473-482.
- [13] 赵景柱, 崔胜辉, 颜昌宙, 郭青海. 中国可持续城市建设的理论思考. *环境科学*, 2009, 30(4): 1244-1248.
- [14] Lu C Y, Li L, Lei Y F, Ren C Y, Su Y, Huang Y F, Chen Y, Lei S H, Fu W W. Coupling coordination relationship between urban sprawl and urbanization quality in the West Taiwan strait urban agglomeration, China: observation and analysis from DMSP/OLS nighttime light imagery and panel data. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3217.
- [15] 苏建忠, 魏清泉, 郭恒亮. 广州市的蔓延机理与调控. *地理学报*, 2005, 60(4): 626-636.
- [16] Burke B M. Book review: who sprawls most? How growth patterns differ across the U.S. William Fulton, Rolf Pendall, Mai Nguyen, and Alicia Harrison. Washington, DC: The Brookings Institution, July 2001 (www.brook.edu/urban/fulton%2d%2dpendall.htm). *Population and Environment*, 2002, 23(4): 428-434.
- [17] 李坤, 岳建伟. 我国建设用地区适宜性评价研究综述. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(S1): 107-113.
- [18] 祝仲文, 莫滨, 谢芙蓉. 基于土地生态适宜性评价的城市空间增长边界划定——以防城港市为例. *规划师*, 2009, 25(11): 40-44.
- [19] Frenkel A, Ashkenazi M. The integrated sprawl index: measuring the urban landscape in Israel. *The Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 99-121.
- [20] 岳文泽, 吴桐, 刘学, 张琳琳, 吴次芳, 叶艳妹, 郑国轴. 中国大城市蔓延指数的开发. *地理学报*, 2020, 75(12): 2730-2743.
- [21] 蒋芳, 刘盛和, 袁弘. 北京城市蔓延的测度与分析. *地理学报*, 2007, 62(6): 649-658.
- [22] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析. *地理学报*, 2009, 64(2): 202-210.
- [23] 宋成豪. 标准路网条件下的道路网密度研究[D]. 西安: 长安大学, 2013: 58-58.
- [24] 程林, 王法辉, 修春亮. 城市银行网点及其与人口—经济活动关系的空间分析——以长春市中心城区为例. *人文地理*, 2015, 30(4): 72-78.
- [25] Zhao Y, Zhang G Q, Lin T, Liu X F, Liu J K, Lin M X, Ye H, Kong L J. Towards sustainable urban communities: a composite spatial accessibility assessment for residential suitability based on network big data. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4767.
- [26] 赵睿, 焦利民, 许刚, 徐智邦, 董婷. 城市空间增长与人口密度变化之间的关联关系. *地理学报*, 2020, 75(4): 695-707.
- [27] Lopez R, Hynes H P. Sprawl in the 1990s: measurement, distribution, and trends. *Urban Affairs Review*, 2003, 38(3): 325-355.
- [28] 宋丽美. 基于 GIS 的建设用地生态适宜性评价研究——以株洲市云龙示范区为例[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
- [29] 程辉, 王晓伟. 基于 GIS 的东南沿海县域国土资源适宜性研究. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(9): 45-48.
- [30] 秦坤, 刘耀林. 基于 GIS 的城镇建设用地发展适宜性评价——以常州市金坛区为例. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(11): 102-107.
- [31] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- [32] 任群. 基于土地利用变化的长三角城市群生态安全格局构建[D]. 厦门: 厦门大学, 2018: 90-90.
- [33] Tian J Y, Gang G S. Research on regional ecological security assessment. *Energy Procedia*, 2012, 16: 1180-1186.
- [34] Wang Z, Zhou J Q, Loaiciga H, Guo H C, Hong S. A DPSIR model for ecological security assessment through indicator screening: a case study at Dianchi Lake in China. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0131732.
- [35] Lin M X, Lin T, Sun C G, Jones L, Sui J L, Zhao Y, Liu J K, Xing L, Ye H, Zhang G Q, Li X H. Using the Eco-Erosion Index to assess regional ecological stress due to urbanization: A case study in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106028.
- [36] 林美霞, 吝涛, 邱全毅, 孙彩歌, 邓富亮, 张国钦. 不同类型城市快速扩张区域人工景观对自然景观的生态安全胁迫效应比较. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1326-1336.