

长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应

戴云哲^{1,2}, 李江风^{1,2*}, 杨建新¹

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074; 2. 国土资源部法律评价工程重点实验室, 武汉 430074)

摘要:生境质量是评价生态环境的重要指标,掌握其对城市扩张的时空响应规律,有助于提升都市区城乡规划和生态管控的合理性。本文在运用InVEST模型对长沙都市区1995-2015年生境质量时空演化的基本特征进行分析的基础上,利用缓冲区由内向外逐层剖析,探讨长沙都市区近20年来城市扩张格局及其对生境质量的影响。结果表明:①长沙都市区建设用地面积从170.26 km²增至487.19 km²;三环线以内建设用地快速扩张,从三环线起向外扩张逐渐放缓;②生境质量中等及以上的区域占比从1995年的43.49%下降到2015年的27.22%,生境质量平均值则相应地从0.46下降到0.31,且退化最明显的区域从核心外围区(5-10号缓冲区)外移到三环线附近(10-15号缓冲区);③各圈层建设用地扩张强度与生境质量变化之间存在显著的空间负相关性,生境质量变化对城市扩张响应最强烈的区域始终位于核心外围区;④建设用地空间布局零散和几何形态不规则程度的增加加剧了生境质量的退化,并在三环线附近区域(10-15号缓冲区)表现最为明显,应成为未来长沙都市区城乡规划和生态管控的重点区域。

关键词:生境质量;InVEST模型;城市扩张;长沙都市区

1 引言

近20年来,中国城镇人口快速增长,到2016年底人口城镇化水平已经达到57.35%(中华人民共和国国家统计局,2017),并仍有进一步快速增加的趋势(韩立建,2018)。人口城镇化率的快速增加在土地利用方面直接表现为建设用地的快速扩张(瞿诗进等,2017),同时带来了包括湿地减少(Bolca et al, 2007)、城市土地承载力下降(吴永娇等,2009)、农田生态系统生物多样性下降(边振兴等,2014;王玉婷等,2014)、植被退化(裴凤松等,2015)、生物量损失(张童等,2016)、生境退化(孙泽祥等,2017)等一系列环境问题,这些问题不仅阻碍当地社会经济的发展,也导致城区及周边居民的生活质量下降,并影响城市的宜居水平。伴随城市扩张的诸多环境问题中,生境退化对城市宜居水平下降的影响尤为突出,掌握生境质量在快速城镇化进程中的演化趋势

对区域城乡规划具有重要意义。

生境质量评价方法在不同的对象和空间尺度存在一定差异,不同的数据来源对评价方法的选择具有决定性的作用。对于特定地区单一物种或群落的生境评价,往往选取与该物种密切相关的环境因子进行实地调查和多指标综合评价(王学志等,2008;甄江红等,2008;程珊珊,2018;童笑笑等,2018),当实地调查数据缺乏时,一般使用遥感数据提取相关环境因子。在大尺度区域,主要采用对植被覆盖和土地利用变化等要素的遥感识别而实现(范泽孟等,2012;祝萍等,2018)。在中小尺度区域,则以美国斯坦福大学、WWF(世界自然基金)和TNC(大自然保护协会)协作开发的InVEST(Integrate Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs Tool)模型的生境质量(Habitat Quality)模块为代表。基于对不同种类威胁源分布的分析方法得到广泛应用(荆田芬等,2016),在小尺度的城市地区,呈持续

收稿日期:2017-12-21;修订日期:2018-05-18。

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201511004) [Foundation: Special Fund for Public Welfare Research of Ministry of Land and Resources in China, No.201511004]。

作者简介:戴云哲(1990-),男,湖北恩施人,博士研究生,主要从事土地利用变化及其效应研究,E-mail: efflorescence@foxmail.com。

通讯作者:李江风(1957-),男,湖北武汉人,教授,博士,研究方向为土地利用规划,E-mail: jfli0524@163.com。

引用格式:戴云哲,李江风,杨建新. 2018. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应[J]. 地理科学进展, 37(10): 1340-1351. [Dai Y Z, Li J F, Yang J X. 2018. Spatiotemporal responses of habitat quality to urban sprawl in the Changsha metropolitan area[J]. Progress in Geography, 37(10): 1340-1351.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.10.004

扩张态势的建设用地是对生境产生剧烈干扰的重要威胁源,而InVEST模型是进行生境质量评价的有效方法。在InVEST模型的应用方面,Leh等(2013)对加纳和科特迪瓦2000-2009年期间的生境质量进行了估算;包玉斌等(2015)基于2000、2005、2010年土地利用类型数据对陕西省黄河湿地自然保护区的生境质量进行了动态评估及时空变化分析研究,形成了多时段、长时序评价的基本框架。Himal等(2014)证实了人类活动引发的土地利用变化和破碎化导致澳大利亚中南部的生境明显退化,钟莉娜等(2017)发现土地整治对生境质量具有先破坏后改善的作用。由此,人类活动和土地利用变化对生境质量的影响受到普遍重视。吴健生等(2013)以深圳市为例,采用InVEST模型生境质量评估模块等方法识别生态用地斑块,不仅将研究对象拓展到城市地区,而且生境质量评价的意义得到进一步延伸;陈妍等(2016)对北京市1990-2010年生境质量的变化进行了对比分析;邓越等(2018)在京津冀地区的研究进一步将生境质量退化的主要原因锁定在城市扩张,此后城市生境质量的变化开始受到更广泛的关注。然而以上研究都是对整个研究区的评价结果进行整体分析,而对研究区内部生境质量的分异规律剖析不够,有待进一步加强。

长株潭城市群作为中国中部新的经济增长极,城市扩张迅速,由此出现了诸多环境问题(Jiang et al, 2016),其中长沙市作为长株潭城市群的核心,城市快速扩张中的环境问题更为突出(Liang et al, 2017)。因此,本文以长沙都市区为例,分别对1995、2005、2015年的生境质量进行评价,并基于圈层梯度划分方法,刻画生境质量的变化及其对城市扩张的时空响应,探讨城市扩张与生境质量变化的空间相关性,为建设用地快速扩张背景下的城乡规划和生态管控提供重要参考。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

1995、2005、2015年3期土地利用覆被数据来自中国科学院资源环境科学数据中心制作的中国遥感影像解译数据,该数据将全国土地利用覆被划分为6个一级地类和25个二级地类,栅格分辨率为30 m×30 m(刘纪远, 1996)。铁路、高速公路、主要道路(国道、省道)和次要道路(县道)等矢量数据由国

家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn>)提供,通过ArcGIS 10.2的转换工具转为与土地利用覆被数据匹配的栅格数据,形成InVEST模型的输入参数之一。

2.2 城市的圈层划分

梯度分析方法可将研究对象按照水平或垂直的空间特征进行分解,进而对研究对象内部进行深入剖析(张新时等, 1997),在描述景观格局和生态服务功能演化方面得到较为成熟的应用。一般可分为地形梯度和圈层梯度,其中地形梯度适合于地形起伏较大的丘陵山区(赵艳霞等, 2014),由于城市形态一般呈环状,且地形起伏相对平缓,因而更适合采用圈层梯度(焦利民, 肖丰涛等, 2015)。圈层梯度通常从城市中心出发,以一定距离制作等距同心圆缓冲区,但在多中心城市分析中往往出现外围圈层数量过多且覆盖城区面积较少的问题(Zhang et al, 2013)。长沙都市区位于湘江与浏阳河汇合处,水体分布广泛,同时长沙县和望城区作为城市副中心发育迅速,因此制作等距同心圆缓冲区的方法并不适用。

在城市扩张研究中,一般通过提取不同时期城市遥感影像中的建设用地识别城市核心区和边缘区,了解城市的基本形态和扩张过程,同时实现对城市圈层的初步划分(Kane et al, 2014; Hu et al, 2015)。然而在城市环线道路发展较快的大中型城市,环线道路对城市土地景观及环境变化有着重要影响,以环线道路表征城市基本形态往往更加直观简便(岳文泽等, 2005; 李磊, 2014)。Irwin等(2007)用道路网对美国马里兰州多中心都市区进行梯度划分,使圈层划分更具有针对性,这对长沙都市区圈层划分具有借鉴意义。《长沙市土地利用总体规划(2006-2020年)》划定的都市区范围内具有清晰完整的环线道路,其中三环线能反映主城区的基本形态,故选择将其作为构建圈层梯度的起始边界。考虑到新城组团间生态廊道的控制宽度一般为0.5~1.0 km,参考焦利民、张欣(2015)对武汉都市区的划分方法,结合研究区具体情况,选择1 km作为缓冲距离,从长沙市三环线分别向内、外建立共25个圈层,最终形成图1所示的圈层结构,实现对研究区的基本覆盖,而三环线位于第13号缓冲区旁。在后续的分析中,使用中心采样(Center)方法对30 m×30 m分辨率的生境质量变化计算结果进行了栅格转点的处理,所有点均被划分到相应的缓冲区,避免了

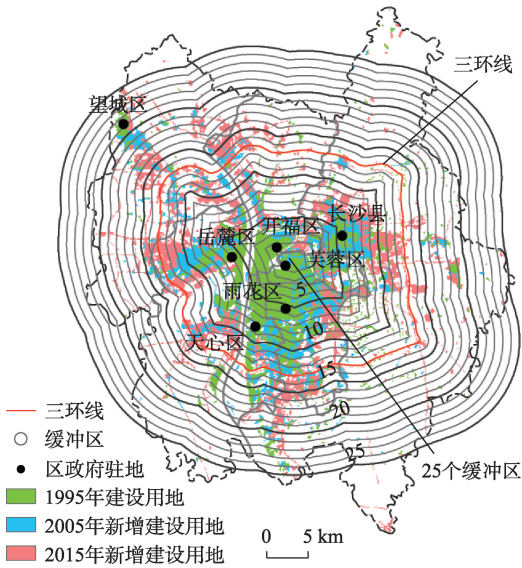


图1 长沙都市区范围及城市圈层划分^①

Fig.1 Concentric rings partition of the Changsha metropolitan area

某个栅格的计算结果被同时划分在两个及以上不同缓冲区中。

2.3 城市扩张表征

关于城市扩张的表征方式,基于不同的研究重点,采用的指标有所不同(Limin, 2015; 童陆亿等, 2016),结合圈层梯度的分析方法,城市扩张核心度指数(Urbanization Concentricity Index, UCI)和城市扩张强度指数(Urbanization Intensity Index, UII)可从城市扩张的形态和强度2个维度对长沙都市区城市扩张特点进行表征。

UCI表征的是城市扩张的紧凑程度,显示城市的基本形态,计算公式为:

$$UCI = \frac{N_{core}}{N_{core} + N_{fringe}} \quad (1)$$

式中: N_{core} 和 N_{fringe} 分别为城市核心区(市中心到建设用地密度正好 $\geq 50\%$ 的圈层之间的区域)(Schneider et al, 2008)和核心外围区(核心区边界到建设用地密度正好,而 $< 50\%$ 的圈层之间的区域)(Angel et al, 2010)的缓冲区数量。 UCI 值越小,城市形态越发散; UCI 值越大,城市形态越紧凑。

UII表征的是城市扩张的强度,是对不同时期各圈层建设用地的年平均扩张速度的标准化处理(Herold et al, 2005),计算公式为:

$$UII_{i,t-t+n} = \frac{UA_{i,t+n} - UA_{i,t}}{TA_i} \quad (2)$$

式中: $UII_{i,t-t+n}$ 为第*i*个缓冲区在*t-t+n*时段内的城市扩张强度指数; $UA_{i,t}$ 、 $UA_{i,t+n}$ 是第*i*个缓冲区在第*t*年和第*t+n*年的建设用地面积; TA_i 是第*i*个缓冲区的土地总面积。 UII 值越大,建设用地扩张强度越大。

2.4 生境质量评价

通常高强度的土地利用会引起威胁源数量和强度的增加,导致其邻近区域发生生境退化。在InVEST模型中,评估生境质量包括生境适宜度和退化度的计算,二者取值范围均为[0, 1],值越大表明适宜度越高(Hall et al, 1997)。其中,生境适宜度为评价单元作为生境的适宜程度,生境退化度是威胁源对生境的干扰强度。

InVEST模型默认将林地、草地、湿地定义为生境,是动植物主要的栖息地;将建设用地、耕地和道路定义为威胁源,是人类活动的主要场所。假设威胁源对生境的干扰强度呈线性衰减,则生境类型在位置的退化度为:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} r_y \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (4)$$

式中: r_y 、 ω_r 、 i_{rxy} 分别为威胁源*R*在位置的干扰强度、权重及对生境产生的干扰; β_x 、 S_{jr} 分别为生境的抗干扰能力及其对各种威胁源的相对敏感程度; r_y 、 ω_r 、 i_{rxy} 、 β_x 、 S_{jr} 的取值范围均为[0, 1]; Y_r 为威胁源栅格总数; d_{xy} 为位置的生境与威胁源的欧氏距离; d_{rmax} 为威胁源*R*的最大干扰半径。

生境质量计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (5)$$

式中: H_j 为生境类型*j*的生境适宜度; D_{xj} 为生境类型*j*中位置*x*上的生境退化度; k 为半饱和常数,即最大退化度的一半; z 为归一化常量,一般取值为2.5。在模型运行前需要对威胁源和生境的相关参数进行设置:将城镇用地、农村居民点、耕地、铁路、高速公路、主要道路、次要道路的威胁半径分别设定为12 km、10 km、8 km、12 km、12 km、10 km、8 km,相

^①图中数字表示各圈层的缓冲区带号。

应的权重设定为1.0、0.8、0.7、1.0、1.0、1.0、0.8;生境适宜度及其对各威胁源的相对敏感程度结合模型的推荐值和文献调整确定(图2)(Nelson et al, 2009; Goldstein et al, 2012)。

2.5 双变量空间自相关分析

学者们对湿地减少(Bolca et al, 2007)、城市土地承载力下降(吴永娇等, 2009)、农田生态系统生物多样性下降(边振兴等, 2014)、植被退化(裴凤松等, 2015)、生物量损失(张童等, 2016)、生境退化(孙泽祥等, 2017)等环境问题对城市扩张的响应机制已进行了一定的梳理,对本文具有重要的参考意义。然而,不同圈层生境质量对建设用地扩张的响应存在局部不平稳性,这种空间差异可通过计算空间自相关指数Moran's *I*并绘制LISA集聚图而体现(Ord et al, 1995; Anselin et al, 2002)。Moran's *I*的计算公式为:

$$I = \frac{x'_k - \bar{x}_k}{\sigma_k} \sum_{j=1}^n w_{ij} \frac{x'_l - \bar{x}_l}{\sigma_l} \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为空间权重矩阵; x'_k 是空单元*i*属性*k*的值; x'_l 为空单元*j*属性*l*的值; \bar{x}_k 和 \bar{x}_l 是属性*k*、*l*的平均值; σ_k 和 σ_l 是属性*k*、*l*的方差。*I*的取值范围为

$[-1, 1]$, $I > 0$ 表示正相关,即相似的变量趋于空间集聚; $I < 0$ 表示负相关,即变量趋于离散。

3 结果分析

3.1 城市扩张空间特征

长沙的主城区最初呈带状,沿湘江呈南北向展布,1995年建设用地面积为170.26 km²,*UCI*值较小(0.67),比全国大部分大型城市都要松散(焦利民, 张欣, 2015)。到2005年建设用地面积为290.21 km²,*UCI*提高到0.75,说明建设用地扩张不仅向外围推进,同时在核心区也进行深度挖潜,从而使建设用地的空间结构比1995年更加紧凑。随着核心区建设用地扩张潜力的枯竭、土地价格的逐年攀升(常疆等, 2011),新增建设用地开始向核心区外围扩张,而外围建设用地原有比例较低,对新增建设用地的限制因素较少,空间分布趋于离散,最终导致1995-2015年建设用地面积增加了316.93 km²,达到487.19 km²,*UCI*则小幅下滑到0.72(表1)。总的来说,长沙都市区1995-2015年*UCI*略有增加,表明近20年来的核心区和都市区边缘的扩张比较同步,城

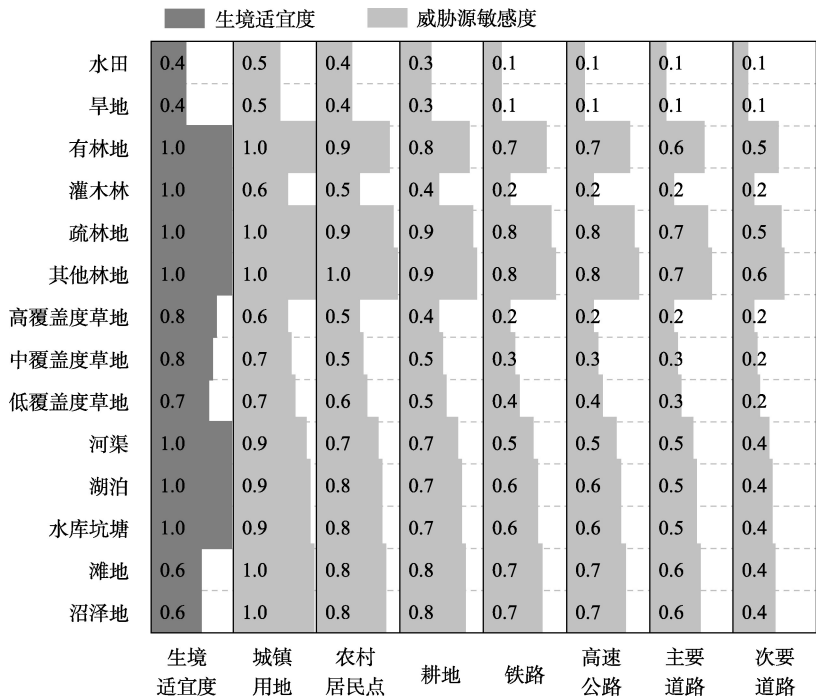


图2 不同生境类型的生境适宜度及其对各威胁源的相对敏感程度^②
Fig.2 Suitability of different habitat types and their sensitivity to each threat

②城镇用地、农村居民点、裸土地、裸岩石质地的生境适宜度为0,对威胁源无敏感性。

市形态较1995年更加紧凑,由于道路、供电、供水等基础设施的逐步完善,城市扩张的空间得到拓宽,建成区开始向垂直于湘江的东西方向延展。

1995年长沙都市区的核心区较小,集中在1-4号缓冲区,虽然建设用地密布,但仍然存在一定扩张潜力。1995-2005年,扩张强度波峰出现在5号缓冲区并向外递减(图3),该区域地处1995年核心区边缘,且可开发利用土地的数量较大,因此城市扩张强度明显高于其他缓冲区;最中心的1号缓冲区是扩张强度最大的区域,其直接原因是芙蓉区的耕地全部转变为建设用地。2005-2015年,核心区附近可转变为建设用地的土地较少,非建设用地以绿地、水体为主,尤其1号缓冲区在2005年建设用地比例已经超过85%,非建设用地主要是烈士公园、蓉园、马王堆汉墓等所占绿地和水体,*UII*曲线的峰值出现在10号缓冲区并向外递减,甚至超出了2015年的核心区边界(8号缓冲区)。

1995-2015年,长沙都市区的*UII*曲线出现了2个比较明显的波峰,表明近20年来扩张已经出现了

类似卫星城市的副中心,这与望城区建设用地在此期间快速扩张是吻合的。在三环线以内,城市扩张强度偏高的缓冲区从内向外不断推移,由于建设用地扩张潜力的下降,核心区扩张强度明显减小;三环线以外由于建设用地占比较低,扩张强度持续增大,空间上呈现出向外逐层递减的趋势,说明三环线构成了长沙都市区的基本空间格局,因而城乡规划应以三环线附近区域为重点,加强环线附近的交通可达性,减轻核心区的交通拥堵压力(黄晓燕等, 2014),并避免城区盲目向外扩张,保持较高的土地利用集约度(童陆亿等, 2016)。

3.2 生境质量变化

为便于比较和说明长沙都市区生境质量变化趋势,将3期生境质量评价结果划分为5段(图4-5):

表1 1995-2015年长沙都市区城市扩张核心度指数及核心区、核心外围区边界变化

Tab.1 Changes of urbanization concentricity index values and the edge of core area and fringe area in Changsha metropolitan area, 1995-2015

年份	建设用地 总面积/km ²	核心区边界 带号	核心外围区边界 带号	UCI
1995	170.26	4	10	0.67
2005	290.21	6	14	0.75
2015	487.19	8	19	0.72

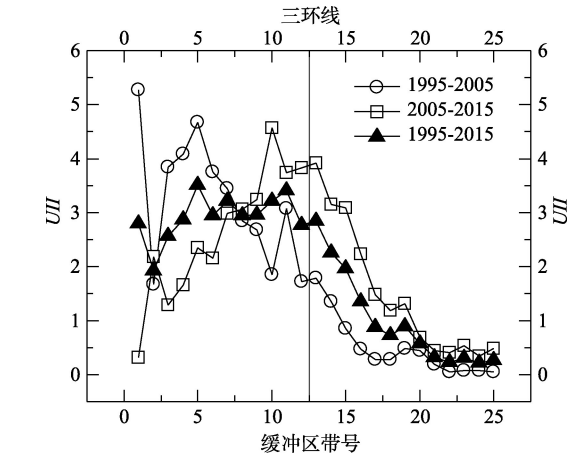


图3 1995-2015年长沙都市区城市扩张强度的圈层分异
Fig.3 Urbanization intensity index on different concentric rings of the Changsha metropolitan area, 1995-2015

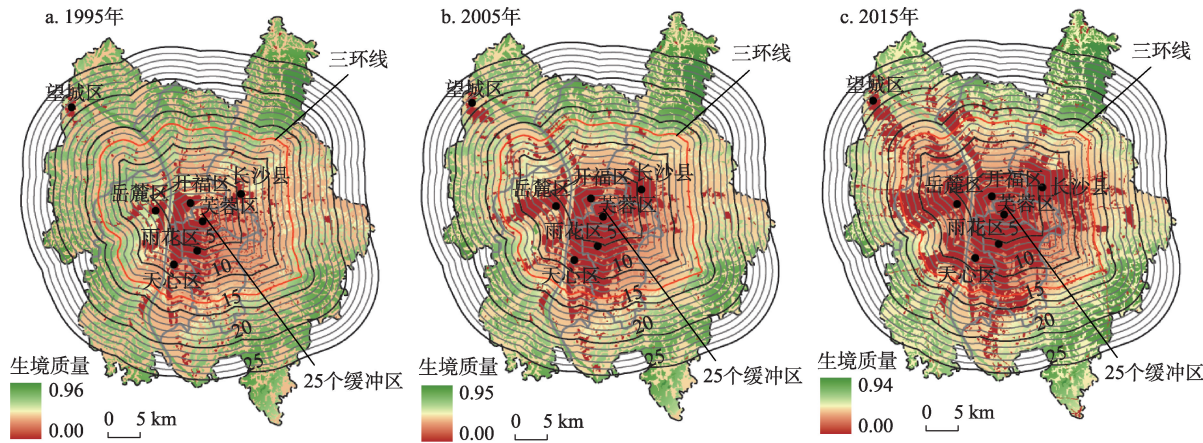


图4 1995-2015年长沙都市区生境质量空间分布
Fig.4 Spatial distribution of habitat quality in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

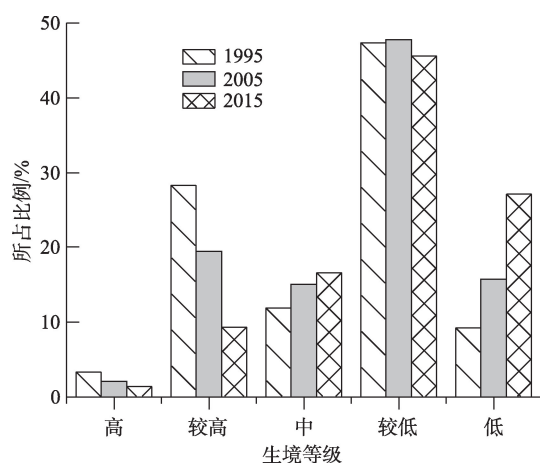


图5 1995-2015年长沙都市区各等级生境质量面积比例

Fig.5 Areal proportion of each habitat quality level in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

[0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)、[0.8, 1], 并分别定义为: 低、较低、中、较高、高5个等级, 各等级生境所占百分比如图所示。1995年中等及以上生境占43.49%, 生境质量平均值为0.46。2005年, 中等及以上生境降低至36.60%, 且生境质量平均值从0.46降低到0.39。从图6生境质量变化的空间分布来看, 雨花区、岳麓区、长沙县的生境退化最为严重, 西北方向湘江滨江地带建设用地增加十分明显, 对湿地生境产生了较大威胁。到2015年, 生境质量平均值下降到0.31, 而中等及以上生境下降到27.22%。望城区、长沙县的退化比较严重; 生境质量提高的区域主要集中在湘江沿岸和湖泊周边, 说明湿地生态环境的保护逐渐受到重视, 周边环境较

2005年有明显改善。

长沙都市区生境质量变化的圈层分异曲线表明(图7), 1995-2005年生境退化主要发生在5-10号缓冲区, 平均下降0.1以上, 三环线以外生境退化程度逐渐减轻; 2005-2015年三环线外围的建设用地扩张较快, 导致生境质量下降最严重的区域从5-10号缓冲区向外推移至10-15号缓冲区, 且下降程度比前10年更严重。综合1995-2015年的城市扩张态势可以看出, 新增建设用地主要分布在核心外围区, 5-15号缓冲区是过去20年来长沙都市区生境质量退化最严重的区域, 未来随着城市的进一步扩张有可能继续向外部推移。

综上所述, 1995-2015年是长沙都市区生境质量严重退化的时期。随着建设用地的不断扩张, 生境质量高和较高区域面积锐减, 中等及以下区域面积增加, 三环线附近是生境退化最严重的区域。目前城市扩张的主要区域基本控制在三环线以内, 但三环线以外的望城区生境质量亦有大幅退化; 岳麓区由于建设用地快速增加, 导致岳麓山景区和橘子洲景区的生境质量下滑, 而这2个景区是长沙市民和游客重要的休闲、度假和观光的场所, 需要控制周边的建设用地扩张以保护景区生境质量。

3.3 城市扩张的生境质量响应

根据InVEST模型原理, 建设用地作为威胁源, 其扩张导致生境退化属于正常现象, 随之配套修建的道路对生境质量也有明显的负面影响, 然而这些影响在不同圈层存在差异。利用GeoDa空间分析工具, 建立空间权重矩阵, 计算1995-2015年期间不

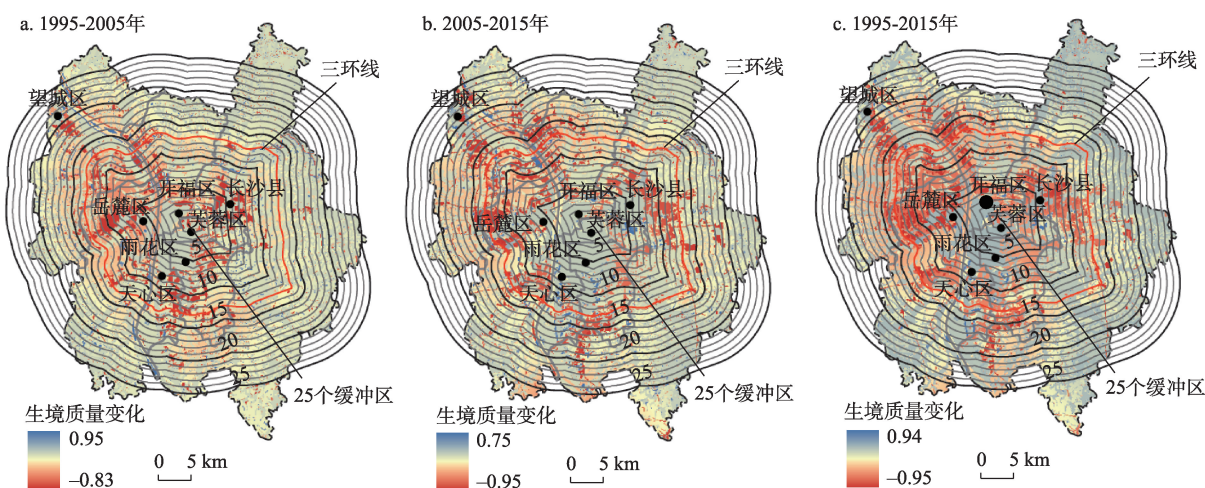


图6 1995-2015年长沙都市区生境质量变化空间分布

Fig.6 Spatial distribution of habitat quality change in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

同圈层建设用地扩张强度与生境质量变化之间的全局空间自相关指数 Moran's I , 1995-2005、2005-2015、1995-2015 年的结果均通过了显著性检验, I 值分别为 -0.83、-0.67、-0.74, 表明二者间存在强烈的空间负相关关系, 即建设用地扩张越剧烈, 生境质量的退化越严重。

从双变量局部空间自相关 LISA 集聚图(图8)可以看出, 大量圈层在不同时段表现出高一低负相关或低一高负相关。其中, 1995-2005 年表现为核心外围区(5-10号缓冲区)的高一低负相关和都市区边缘(22-25号缓冲区)的低一高负相关, 其他区域相关关系不显著; 核心外围区建设用地扩张强烈, 生境质量退化严重; 都市区边缘新增建设用地较少, 生境质量退化程度也较低。2005年以后核心区(1-6号缓冲区)建设用地扩张潜力枯竭, 因此扩张强度

很低, 生境质量并未出现明显退化, 这也是 Moran's I 出现下降的主要原因; 在2号缓冲区甚至出现了高一高正相关, 虽然建设用地面积有少量增加, 但其内部部分区域生境质量比2005年以前更好, 其原因主要是由于核心区发展到一定程度开始注重宜居性的提高, 公共绿地出现增长(Rob, 1979; 刘星光等, 2014); 尽管都市区边缘建设用地扩张并不强烈, 但建设用地持续向外的推进已导致生境遭受到一定威胁, 不再表现为低一高负相关。

总体而言, 长沙都市区 1995-2015 年期间城市扩张强度与生境质量变化呈现出显著的空间负相关性, 前10年的快速发展已经确定了长沙都市区核心区的基本形态, 低一高负相关出现在都市区边缘22-25号缓冲区, 高一低负相关出现在9-12号缓冲区, 位于历年核心外围区(5-19号缓冲区)的中心。

3.4 建设用地景观特征对生境质量的影响

建设用地除了面积扩张与生境退化有明显关联外, 其景观特征对威胁程度也有一定的影响(Hargis et al, 1999)。为在类型水平上分析长沙都市区各圈层建设用地景观特征及其演变, 选择以下2个能体现建设用地空间布局和几何形态2个主要方面的指标: 斑块密度(PD, 个/ km^2), 反映单位面积上建设用地的斑块数, 值越大, 建设用地的空间布局越零散; 边缘密度(ED, m/hm^2), 反映建设用地斑块边缘的复杂程度, 值越大, 建设用地的几何形态越不规则。各景观指数计算由 Fragstats 4.2 软件完成(Saura et al, 2009), 计算公式见相关参考文献(O'Neill et al, 2010), 1995-2015 年期间长沙都市区各圈层 PD、ED 的变化情况见图9。

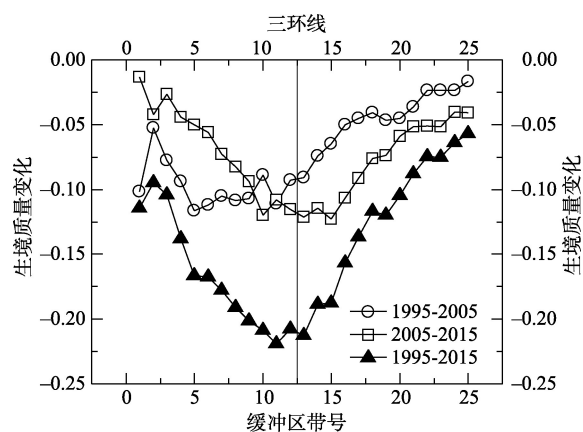


图7 1995-2015年长沙都市区生境质量变化的圈层分异

Fig.7 Quantitative changes of habitat quality on different concentric rings in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

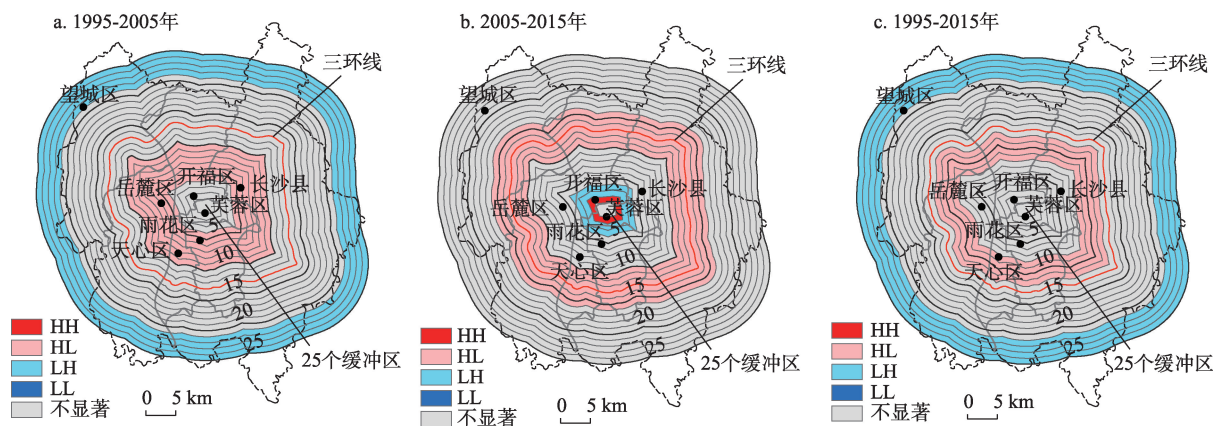


图8 1995-2015年长沙都市区城市扩张强度与生境质量变化双变量空间自相关的LISA集聚图

Fig.8 Spatial corresponding patterns of bivariate spatial autocorrelation between urbanization intensity index and habitat quality change in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

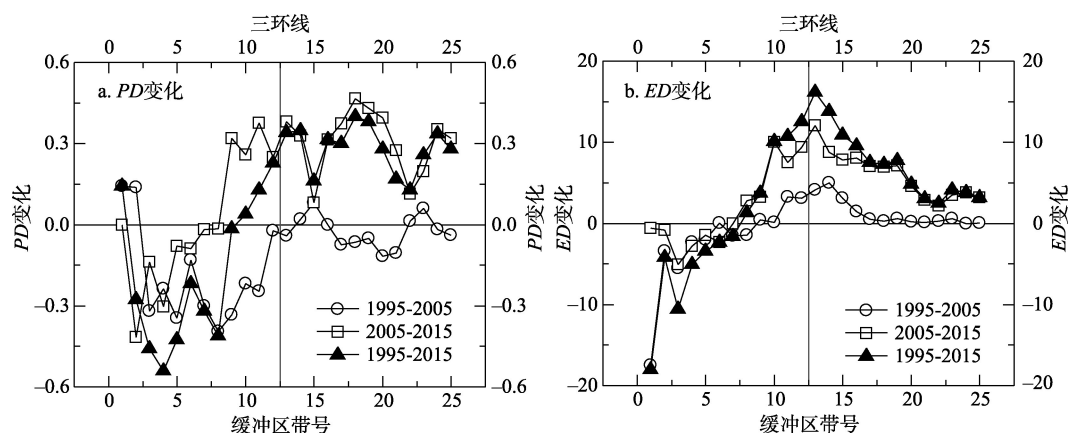


图9 1995-2015年长沙都市区建设用地景观指数变化的圈层分异

Fig.9 Change in landscape indices of construction land on different concentric rings in the Changsha metropolitan area, 1995-2015

由图9可见,1995-2005年,三环线内零散的建设用地斑块大量合并,空间布局更加集中,几何形态也趋于规则,导致PD明显下降,三环线外变化相对较小;ED在1-10号缓冲区同样呈现减小趋势,但在三环线附近(10-15号缓冲区)由于建设用地的小规模扩张导致ED出现明显增长。2005-2015年出现了核心外围区ED、PD均大幅增长的现象,三环线附近尤为突出,建设用地布局零散和几何形态不规则的程度明显加剧。

1995-2015年1-8号缓冲区PD、ED均呈减小趋势,而9-16号缓冲区PD、ED则大幅增加。虽然二者在1995-2015年的城市扩张强度相近,但三环线附近的9-16号缓冲区生境退化程度明显更大,说明在威胁源增加数量相近的情况下,其空间布局的零散化与几何形态的不规则化会进一步加剧生境退化的程度。

4 结论与讨论

4.1 结论

在运用InVEST模型对长沙都市区1995-2015年生境质量时空演化基本特征进行分析的基础上,以三环线为基础构建缓冲区,从内向外逐层剖析探讨了长沙都市区近20年城市扩张格局及其对生境质量的影响。主要结论如下:

(1) 三环线以内建设用地快速扩张,从三环线起向外建设用地扩张逐渐减缓。长沙都市区建设用地最初主要呈带状沿湘江展布,分布比较松散;近20年来逐渐向更紧凑的方向演进,且主要向垂直于湘江的东西方向扩张。随着核心区建设用地扩

张潜力的下降,核心区边界逐渐向外扩展,在1995、2005、2015年分别到达4号、6号、8号缓冲区,核心外围区边界也随之外移,分别到达10号、14号、19号缓冲区。9-12号缓冲区是城市扩张最迅速的区域,三环线以外区域的扩张强度明显降低。

(2) 生境严重退化,且退化最明显的区域始终位于各时期的核心外围区。1995-2015年期间生境质量0.4以上的区域面积从43.49%下降到27.22%,平均值从0.46下降到0.31。整体来看,5-15号缓冲区生境退化最为严重,其中1995-2005年主要发生在5-10号缓冲区,而2005-2015年随着三环线附近的建设用地的剧烈扩张,生境退化最严重的区域外移至10-15号缓冲区,且退化愈发严重。

(3) 生境质量对城市扩张的响应明显,二者间空间负相关性强烈,响应最强烈的区域始终位于核心外围区。其中1995-2005年核心外围区(5-10号缓冲区)建设用地扩张强烈,生境质量退化严重,都市区边缘(22-25号缓冲区)新增建设用地较少,生境质量退化程度相应较低。2005-2015年由于公共绿地增加,2-4号缓冲区生境在建设用地持续扩张的情况下并没有出现明显退化;而建设用地扩张且生境退化严重的区域外移到三环线附近的11-16号缓冲区,仍位于核心外围区(9-19号缓冲区)内。

(4) 在建设用地增加数量相近的情况下,其空间布局的零散化与几何形态的不规则化会进一步加剧生境退化程度。1995-2015年1-8号缓冲区PD、ED均减小,而9-16号缓冲区PD、ED均增加,其中2005-2015年的变化幅度明显大于1995-2005年,在1995-2015年的城市扩张强度相近的情况下,三环线附近的9-16号缓冲区生境退化程度明显更大。

4.2 讨论

(1) 在长沙都市区城乡规划和生态管控中,三环线附近由于其建设用地快速、零散、不规则的扩张特征,应成为重点关注的区域。一方面,要对存量建设用地深入挖潜,合理提高容积率,避免城区向核心外围区以外盲目扩张,使得建设用地空间布局更加紧凑,几何形态更加规整,从而减轻城市扩张对生境的破坏;另一方面,要加强公共绿地和湿地建设,在控制和改善生境质量的同时增加居民休闲和游憩场所,从而进一步优化人居环境。

(2) 本文生境质量基于土地利用覆被的面状威胁源和铁路公路建设的线状威胁源进行计算,对污染物排放等非恒态点状威胁源的影响缺乏研究,未来需加强对点状威胁源数据的收集,进一步补充并优化模型参数,以期得出更加精确的分析结果,从而更好地为城乡规划和生态管控服务。

参考文献(References)

- 包玉斌,刘康,李婷,等. 2015. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 32(3): 622-629. [Bao Y B, Liu K, Li T, et al. 2015. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shaanxi Province as an example[J]. Arid Zone Research, 32(3): 622-629.]
- 边振兴,李金泓,宇振荣,等. 2014. 城市扩张对农田生态系统中土壤动物的影响:以辽宁省沈阳市沈北新区为例[J]. 资源科学, 36(4): 824-830. [Bian Z X, Li J H, Yu Z R. 2014. The effect of urban area expansion on soil animals in farmland ecosystems[J]. Resources Science, 36(4): 824-830.]
- 常疆,廖秋芳,王良健. 2011. 长沙市区地价的空间分布特征及其影响因素[J]. 地理研究, 30(10): 1901-1909. [Chang J, Liao Q F, Wang L J. 2011. Spatial distribution and influencing factors of urban land price in Changsha City[J]. Geographical Research, 30(10): 1901-1909.]
- 陈妍,乔飞,江磊. 2016. 基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J]. 北京大学学报:自然科学版, 52(3): 553-562. [Chen Y, Qiao F, Jiang L. 2016. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 52(3): 553-562.]
- 程珊珊,沈小雪,柴民伟,等. 2018. 深圳湾红树林湿地不同生境类型沉积物的重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 北京大学学报:自然科学版, 54(2): 415-425. [Cheng S S, Shen X X, Chai M W, et al. 2018. Assessment of heavy metals contamination in three kinds of habitat of Futian Mangrove Forest in Shenzhen Bay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 54(2): 415-425.]
- 邓越,蒋卫国,王文杰,等. 2018. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降[J]. 生态学报, 38(12): 4516-4525. [Deng Y, Jiang W G, Wang W J, et al. 2018. Urban expansion led to the degradation of habitat quality in the Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(12): 4516-4525.]
- 范泽孟,张轩,李婧,等. 2012. 国家级自然保护区土地覆盖类型转换趋势[J]. 地理学报, 67(12): 1623-1633. [Fan Z M, Zhang X, Li J, et al. 2012. Transition trends of land cover in national nature reserves of China[J]. Acta Geographica Sinica, 67(12): 1623-1633.]
- 韩立建. 2018. 城市化与PM2.5时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 37(8): 1011-1021. [Han L J. 2018. Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China [J]. Progress in Geography, 37(8): 1011-1021.]
- 黄晓燕,张爽,曹小曙. 2014. 广州市地铁可达性时空演化及其对公交可达性的影响[J]. 地理科学进展, 33(8): 1078-1089. [Huang X Y, Zhang S, Cao X S. 2014. Spatial-temporal evolution of Guangzhou subway accessibility and its effects on the accessibility of public transportation services [J]. Progress in Geography, 33(8): 1078-1089.]
- 焦利民,肖丰涛,许刚,等. 2015. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应[J]. 资源科学, 37(8): 1650-1660. [Jiao L M, Xiao F T, Xu G, et al. 2015. Spatial-temporal response of green land fragmentation patterns to urban expansion in Wuhan metropolitan area[J]. Resources Science, 37(8): 1650-1660.]
- 焦利民,张欣. 2015. 基于圈层建设用地密度分析的中国主要城市扩张的时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 24(10): 1721-1728. [Jiao L M, Zhang X. 2015. Characterizing urban expansion of main metropolises in China based on built-up densities in concentric rings[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 24(10): 1721-1728.]
- 荆田芬,余艳红. 2016. 基于InVEST模型的高原湖泊生态系统服务功能评估体系构建[J]. 生态经济, 32(5): 180-185. [Jing T F, Yu Y H. 2016. Highland lakes ecosystem services evaluation system based on InVEST model[J]. Ecological Economy, 32(5): 180-185.]
- 李磊. 2014. 城市发展背景下的城市道路景观研究:以北京二环城市快速路为例[D]. 北京:北京林业大学. [Li L.

2014. Research on urban road landscape under the background of urban development: Taking Beijing Second Ring road as an example[D]. Beijing, China: Beijing Forestry University.]
- 刘纪远. 1996. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社. [Liu J Y. 1996. Macro-scale survey and dynamic study of natural resources and environment of China by remote sensing[M]. Beijing, China: China Science and Technology Press.]
- 刘星光, 董晓峰, 刘颜欣. 2014. 中国主要城市宜居性发展的地域差异研究[J]. 干旱区地理, 37(6): 1281-1290. [Liu X G, Dong X F, Liu Y X. 2014. Spatial differentiation of urban livability of major cities in China[J]. Arid Land Geography, 37(6): 1281-1290.]
- 裴凤松, 黎夏, 刘小平, 等. 2015. 城市扩张驱动下植被净第一性生产力动态模拟研究: 以广东省为例[J]. 地球信息科学学报, 17(4): 469-477. [Pei F S, Li X, Liu X P. 2015. Dynamic simulation of urban expansion and their effects on net primary productivity: A scenario analysis of Guangdong Province in China[J]. Journal of Geo-information Science, 17(4): 469-477.]
- 瞿诗进, 胡守庚, 童陆亿, 等. 2017. 长江中游经济带城镇建设用地转型的时空特征[J]. 资源科学, 39(2): 240-251. [Qu S J, Hu S G, Tong L Y, et al. 2017. Spatiotemporal patterns of urban land use transition in the middle Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 39(2): 240-251].
- 孙泽祥, 刘志峰, 何春阳, 等. 2017. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响: 以呼和浩特—包头—鄂尔多斯城市群地区为例[J]. 自然资源学报, 32(10): 1691-1704. [Sun Z X, Liu Z F, He C Y, et al. 2017. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the drylands of northern China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos urban agglomeration region[J]. Journal of Natural Resources, 32(10): 1691-1704.]
- 童陆亿, 胡守庚. 2016. 中国主要城市建设用地扩张特征[J]. 资源科学, 38(1): 50-61. [Tong L Y, Hu S G. 2016. Characterizations of urban sprawl in major Chinese cities[J]. Resources Science, 38(1): 50-61.]
- 童笑笑, 陈春娣, 吴胜军, 等. 2018. 三峡库区澎溪河消落带植物群落分布格局及生境影响[J]. 生态学报, 38(2): 571-580. [Tong X X, Chen C D, Wu S J, et al. 2018. Spatial distribution pattern of plant community and habitat impact analysis of the drawdown zone of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(2): 571-580.]
- 王学志, 徐卫华, 欧阳志云, 等. 2008. 生态位因子分析在大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)生境评价中的应用[J]. 生态学报, 28(2): 821-828. [Wang X Z, Xu W H, Ouyang Z Y, et al. 2008. The application of ecological-niche factor analysis in giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*) habitat assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(2): 821-828.]
- 王玉婷, 丁圣彦, 梁国付. 2014. 农田背景下景观结构对半自然生境生物多样性的多尺度影响[J]. 地理科学进展, 33(12): 1704-1716. [Wang Y T, Ding S Y, Liang G F. 2014. Multi-scale effects analysis for landscape structure and biodiversity of semi-natural habitats and cropland in a typical agricultural landscape[J]. Progress in Geography, 33(12): 1704-1716.]
- 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 2013. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 33(13): 4125-4133. [Wu J S, Zhang L Q, Peng J, et al. 2013. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(13): 4125-4133.]
- 吴永娇, 马海州, 董锁成, 等. 2009. 城市化进程中生态环境响应模型研究: 以西安为例[J]. 地理科学, 29(1): 64-70. [Wu Y J, Ma H Z, Dong S C, et al. 2009. Modelling the interaction of urbanization and eco-environment[J]. Scientia Geographica Sinica, 29(1): 64-70.]
- 岳文泽, 徐建华, 谈文琦, 等. 2005. 城市景观多样性的空间尺度分析: 以上海市外环线以内区域为例[J]. 生态学报, 25(1): 122-128. [Yue W Z, Xu J H, Tan W Q, et al. 2005. Spatial scale analysis of the diversities of urban landscape: A case study within the external circle highway of Shanghai City[J]. Acta Ecologica Sinica, 25(1): 122-128.]
- 张童, 陈爽, 李广宇, 等. 2016. 基于GWR的城市扩张下生物量损失与城市形态格局的关系研究[J]. 生态环境学报, 25(12): 1891-1898. [Zhang T, Chen S, Li G Y, et al. 2016. Quantifying the relationship between urban form and the lost vegetation biomass under urban expansion based on GWR model[J]. Ecology and Environment Sciences, 25(12): 1891-1898.]
- 张新时, 高琼, 杨奠安, 等. 1997. 中国东北样带的梯度分析及其预测[J]. 植物学报, 39(9): 785-799. [Zhang X S, Gao Q, Yang D A, et al. 1997. A gradient analysis and prediction on the northeast China transect (NECT) for global change study[J]. Acta Botanica Sinica, 39(9): 785-799.]
- 赵艳霞, 武爱彬, 刘欣, 等. 2014. 浅山丘陵区土地利用地形梯度特征与生态服务价值响应[J]. 水土保持研究, 21(3): 141-145. [Zhao Y X, Wu A B, Liu X, et al. 2014. Terrain gradient features and response of ecological services value

- in shallow hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(3): 141-145.]
- 甄江红, 王永秀, 成舜, 等. 2008. 濒危植物四合木生境景观动态及其驱动因子分析[J]. *地理科学进展*, 27(6): 41-48.
- [Zhen J H, Wang Y X, Cheng S, et al. 2008. Landscape dynamics and driving factors of endangered plant *Tetraene mongolica's* Habitats[J]. *Progress in Geography*, 27(6): 41-48.]
- 中华人民共和国国家统计局. 2017. 2016年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 中华人民共和国国家统计局网站, 2017- 02- 28 [2017- 11- 17]. <http://www.stats.gov.cn>.
- [Statistics Bureau of the People's Republic of China. 2017. Statistics bulletin of national economic and social development in 2016[EB/OL]. NBSPRC Website, 2017- 02- 28 [2017-11-17]. <http://www.stats.gov.cn>.]
- 钟莉娜, 王军. 2017. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. *农业工程学报*, 33(1): 250-255. [Zhong L N, Wang J. 2017. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(1): 250-255.]
- 祝萍, 黄麟, 肖桐, 等. 2018. 中国典型自然保护区生境状况时空变化特征[J]. *地理学报*, 73(1): 92-103. [Zhu P, Huang L, Xiao T, et al. 2018. Dynamic changes of habitats in China's typical nature reserves on spatial and temporal scales[J]. *Acta Geographica Sinica*, 73(1): 92-103.]
- Angel S, Parent J, Daniel I, et al. 2010. The persistent decline of urban densities global and historical evidence of sprawl [R]. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Anselin L, Syabri I, Kho Y. 2010. GeoDa: An introduction to spatial data analysis[M]//Fischer M, Getis A. *Handbook of applied spatial analysis*. Berlin, Germany: Springer.
- Bolca M, Turkyilmaz B, Kurucu Y, et al. 2007. Determination of impact of urbanization on agricultural land and wetland land use in Balçova Delta by remote sensing and GIS technique[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 131: 409-419.
- Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(19): 7565-7570.
- Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. 1997. The habitat concept and a plea for standard terminology[J]. *Wildlife Society Bulletin*, 25(1): 173-182.
- Hargis C D, Bissonette J A, Turner D L. 1999. The influence of forest fragmentation and landscape pattern on American Martens[J]. *Journal of Applied Ecology*, 36(1): 157-172.
- Herold M, Couclelis H, Clarke K. 2005. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29: 369-399.
- Himlal B, Rodney J K, Sunil K S. 2014. Spatial assessment and mapping of biodiversity and conservation priorities in a heavily modified and fragmented production landscape in north-central Victoria, Australia[J]. *Ecological Indicators*, 36(1): 552-562.
- Hu S, Tong L, Frazier A E, et al. 2015. Urban boundary extraction and sprawl analysis using Landsat images: A case study in Wuhan, China[J]. *Habitat International*, 47: 183-195.
- Irwin E G, Bockstael N E. 2007. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(52): 20672-20677.
- Jiang W, Chen Z, Lei X, et al. 2016. Simulation of urban agglomeration ecosystem spatial distributions under different scenarios: A case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Ecological Engineering*, 88: 112-121.
- Kane K, Tuccillo J, York A M, et al. 2014. A spatio-temporal view of historical growth in Phoenix, Arizona, USA[J]. *Landscape & Urban Planning*, 121(1): 70-80.
- Leh M D, Matlock M D, Cummings E C, et al. 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165: 6-18.
- Liang J, Zhong M, Zeng G, et al. 2017. Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: A case study in Changsha, Middle China[J]. *Science of the Total Environment*, 579: 1675-1682.
- Limin J. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion[J]. *Landscape and Urban Planning*, 139: 26-39.
- Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1): 4-11.
- Ord J K, Getis A. 1995. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and application[J]. *Geographical Analysis*, 27(4): 286-306.
- O'Neill R V, Riitters K H, Wickham J D, et al. 2010. Land-

- scape pattern metrics and regional assessment[J]. *Ecosystem Health*, 5(4): 225-233.
- Rob K. 1979. *Urban Space*[M]. London, UK: Academy Editions.
- Saura S, Torné J. 2009. Conefor sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity[J]. *Environmental Modelling & Software*, 24(1): 135-139.
- Schneider A, Woodcock E. 2008. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-live global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information[J]. *Urban Studies*, 45: 659-692.
- Zhang S, York A M, Boone C G, et al. 2013. Methodological advances in the spatial analysis of land fragmentation[J]. *Professional Geographer*, 65(3): 512-526.

Spatiotemporal responses of habitat quality to urban sprawl in the Changsha metropolitan area

DAI Yunzhe^{1,2}, LI Jiangfeng^{1,2*}, YANG Jianxin¹

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. The Key Laboratory of the Ministry of Land and Resources for Legal Evaluation Engineering, Wuhan 430074, China)

Abstract: Observing the spatiotemporal responses of habitat quality—an important indicator for ecological environment assessment—to urban sprawl will help improve the quality of urban planning and ecological control. This study respectively analyzed habitat quality of the Changsha metropolitan area from 1995 to 2015 using the InVEST Habitat Quality Model, and revealed the characteristics of the spatiotemporal evolution based on the buffers created by the third ring road. The results show that: (1) The area of construction land in the Changsha metropolitan area increased from 170.26 km² to 487.19 km², which expanded rapidly within the third ring road and gradually slowed outside. (2) Areal proportion of average or above habitat quality levels decreased from 43.49% in 1995 to 27.22% in 2015, and the average level of habitat quality accordingly dropped from 0.46 to 0.31. The most seriously degraded area has shifted from the outer core area (buffer No.5 to No.10) to areas near the third ring road (buffer No.10 to No.15). (3) There is a significant negative spatial correlationship between urban sprawl intensity and habitat quality change across all buffers. The strongest response to urban sprawl in habitat quality change remains in the outer core area. (4) The degradation of habitat quality was exacerbated by the increasing degree of scattered layout pattern and irregular geometrical morphology of construction land and the areas near the third ring road (buffer No.10 to No.15) showed the most significant change. These areas should become the focus area of urban planning and ecological control in the future.

Key words: habitat quality; InVEST model; urban sprawl; Changsha metropolitan area