

景观演化特征指数及其应用

张安琪^{1,2}, 夏 畅³, 林 坚^{1*}, 楚建群¹

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055;

3. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘 要:随着中国城市化建设的快速推进,城市蔓延式增长和生态空间持续性萎缩成为普遍的现象,以地表硬化为主要特征的城市景观格局变化得到广泛关注,而景观扩张指数(Landscape Expansion Index, LEI)是测度这一现象的重要工具。但在新型城镇化背景下,由于大城市空间结构调整优化以及城市绿化率的提高,硬化地景观的收缩与消亡已成为城市景观演变的另一重要形式,因此亟需新的有效手段来刻画城市发展的新特征。在此背景下,本文在LEI指数的基础上,提出景观演化特征指数(Landscape Evolution Characteristic Index, LECI),尝试综合描述城镇化过程中硬化地景观斑块扩张与收缩的动态特征;并基于邻域特征计算的景观演化特征指数,包括景观演化模式识别指数(Landscape Evolution Pattern Index, LEPI)和景观演化规模指数(Landscape Evolution Area Index, LEAI),协同分析两个或多个时相景观格局演变过程中的斑块新生与消亡。本文将LECI指数应用于武汉都市发展区1990-2010年期间的城市硬化地景观演变过程中,与基于最小包围盒的景观扩张指数(LEI)对比分析,结果表明:①LEPI能准确识别不同规模和形状斑块的空間扩张模式,LEAI能够较好反映斑块扩张强度并表征景观扩张方向;②LEPI能有效识别城市景观演变中消亡斑块的湮灭模式,研究区内硬化地景观消亡现象明显加剧,可能与政府加强城市内部改造及绿化建设有关;③LECI指数变化分析发现,武汉都市发展区研究期内的城市景观扩张强度有所放缓,飞地式和边缘式空间增长构成斑块演变的主体,城市硬化地景观扩张模式在空间上呈现明显的梯度分异规律,随距主城区的远近呈现填充式/包围式、边缘式/邻接式到飞地式/孤立式的演替。

关 键 词:景观演化特征指数;硬化地景观演变;邻域特征;消亡斑块;武汉市都市发展区

1 引言

随着中国城市化建设的快速推进,城市景观格局发生巨大变化,城市蔓延式增长和生态空间持续性萎缩成为较为普遍的现象(李素英等, 2010; 姚士谋等, 2014; He et al, 2017)。学者们利用RS、GIS等技术获取并分析城市土地利用数据,综合测度和量化描述城市空间扩展形态与规模(林坚, 2009; 车前进等, 2011; 关兴良等, 2012; 李昕等, 2012; Jaeger et al, 2014; 王海军等, 2016),其中,景观扩张指数(Landscape Expansion Index, LEI)在研究城市景

观格局动态演变、扩展模式与特征中得到很好的应用(Shi et al, 2012; Liu et al, 2014; Tian et al, 2014)。由刘小平等(2009)提出的LEI指数可描述城市景观格局演变过程中斑块类型的动态变化与发展形态,并将城市景观扩张空间模式识别为填充式、边缘式和飞地式(Wilson et al, 2003)。此后,学者们对LEI指数提出改进,通过缓冲区或先验判断等解决该指数对特殊形状斑块扩张模式识别错误的问题(Liu et al, 2010; 钱敏等, 2015),同时实现对斑块空间扩张规模的定量表达(武鹏飞等, 2012),以及基于多时间节点数据的多时相景观扩张指数(Jiao et al,

收稿日期: 2017-03-13; 修订日期: 2017-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371534) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41371534]。

作者简介: 张安琪(1992-),女,硕士研究生,主要从事土地利用与评价、地理模拟等研究,E-mail: 630331509@qq.com。

通讯作者: 林坚(1969-),男,教授,博士生导师,主要从事土地利用、评价与规划等研究,E-mail: jlin@urban.pku.edu.cn。

引用格式: 张安琪, 夏畅, 林坚, 等. 2018. 景观演化特征指数及其应用[J]. 地理科学进展, 37(6): 811-822. [Zhang A Q, Xia C, Lin J, et al. 2018. Landscape evolution characteristic index and application[J]. Progress in Geography, 37(6): 811- 822.]. DOI: 10.18306/dlxxjz.2018.06.008

2015),这些研究有效地扩展了城市景观格局演变分析的研究方法和手段。

城镇化过程的主要特征是地表硬化(李伟峰等, 2008),它是影响城市生态环境质量的重要因素。城市用地既包括硬化不透水的建设用地,也包括可透水的水体和绿化用地等。以往,以地表硬化为代表的其他用地向建设用地的单向转变,得到普遍的关注(蒋芳等, 2007; 岳德鹏等, 2007; Fan et al, 2014; Jiao, 2015; 陈凯等, 2015; 詹云军等, 2017),而景观扩张指数LEI则是刻画该现象的主要方法。近年来,伴随着城镇化的快速推进,全球化、去工业化、郊区化等导致中国部分城市与地区出现城市收缩现象。与城市增长一样,城市收缩是城市发展过程中具有规律性的正常现象(Haase et al, 2012; Lauf et al, 2014; 高舒琦, 2015; 杨振山等, 2015)。合理精简城市规模,通过绿色基础设施规划和改造闲置建筑与土地等,成为应对城市收缩的重要手段(龙瀛等, 2015; 周恺等, 2015)。城市内部绿化率的提高与空间结构调整优化,使得城市硬化地景观的收缩和消亡现象越来越普遍,硬质化地向其他用地类型转移应得到更为广泛的关注。因此,亟需开展城市发展过程中硬化地景观的双向转变研究,在研究城市空间外延的同时,分析城市内部结构的调整变化,有利于全面认知城市景观格局的演变过程。同时,识别城市硬化地斑块的湮灭模式及其消亡特征意义重大,可体现城市景观收缩变化在空间上的分布,从侧面揭示城市生态修复的空间布局特征,具有“预警性”和“启发性”。但现有的研究中有关城市硬化地景观缩减和消亡的研究成果仍较少,也缺乏有效的量化指数用于判断和分析相应现象,而景观扩张指数虽能识别城市空间扩张模式,并反映城市演变的客观规律,但它仅考虑景观类型转移的单向变化,难以描述现今城市发展出现的新特征。

为此,本文试图对已有的景观扩张指数作出改进,提出一种新的指数——景观演化特征指数(Landscape Evolution Characteristic Index, LECI),在计算和识别城市景观斑块增长规模与空间扩展模式的过程中,协同分析斑块的增长与消亡现象,获取景观变化的过程信息,并通过与基于最小包围盒的景观扩张指数(LEI)(刘小平等, 2009; 周翔等, 2014)的对比分析,验证其有效性与合理性。

2 基于邻域的景观演化特征指数

景观格局是在自然和人文双重因素的作用下,为适应特定景观功能要求、景观斑块在空间上动态分布与组合所构成的景观整体结构(Gustafson, 1998)。景观斑块演变的主要类型包括:新生、消亡、生长、收缩、融合、分裂和混合等(O'Neill et al, 1988; Crist et al, 2000; Luck et al, 2002; 陈虹等, 2008; 张阳阳等, 2010)。景观指数能描述特定时相下景观的静态特征(Manicacci et al, 1992; Doak et al, 1994; 陈文波等, 2002; 何鹏等, 2009; Teng et al, 2016),应用广泛(Skinner, 1995; Ricotta et al, 1999; Smits et al, 1999; 何原荣等, 2008; 林孟龙等, 2008; 游丽平等, 2008; 高艳等, 2010),但难以有效表达景观格局演变的动态信息。学者们在景观指数的基础上提出的景观扩张指数,以斑块的最小包围盒(刘小平等, 2009)或缓冲区(Liu et al, 2010)为统计单元计算,对景观指数进行重要的补充和发展。本文结合新时期城市发展中生态空间增多、建设空间腾退“还绿”等新情况,重点针对硬化地演变,进一步提出景观演化特征指数,既识别传统的硬化地景观增长模式,又观察硬化地景观的湮灭模式,并能定量描述不同情形下的转化规模。

景观演化特征指数(LECI)是基于斑块的邻域特征而定义的,可利用遥感影像数据计算得到,包括景观演化模式识别指数(Landscape Evolution Pattern Index, LEPI)和景观演化规模指数(Landscape Evolution Area Index, LEAI)。斑块邻域是指构成该斑块的所有像元八邻域的集合,每个斑块都有自己的邻域(图1)。LECI最小统计单元为遥感影像的像元,它保持了景观斑块与遥感影像像元分布特征的一致性,与采用最小包围盒(刘小平等, 2009)和缓冲区(Liu et al, 2010)计算的LEI指数相比,采用领域计

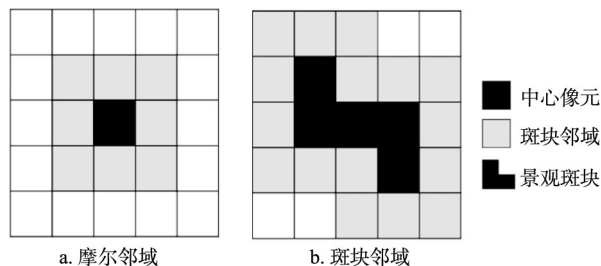


图1 斑块邻域的定义

Fig.1 Neighborhood definition of patches

算的LECI充分利用了遥感影像的数据精度,最大程度上保证了对数据的正确解读。利用最小包围盒计算的LEI指数,斑块形状会对识别结果产生影响,可能出现对斑块扩张模式的错误识别(武鹏飞等, 2012);利用缓冲区计算的LEI指数,其敏感度受到遥感影像分辨率(例如30 m)的影响,当缓冲距离设置过小或为0时,会导致对飞地式斑块的过高估计;若缓冲区增加至30 m以上时,LEI会发生显著改变,因此确定合理的缓冲区半径是有意义的,但同时也是困难且极具争议的(Jiao et al, 2015)。

本文将景观扩张模式划分为新增斑块的增长模式和消亡斑块的湮灭模式两大类,其中增长模式包括飞地式、边缘式和填充式(图2a-2c),湮灭模式包括孤立式、邻接式和包围式(图2d-2f)。

2.1 景观演化模式识别指数

图2a-2c和图2d-2f分别对应景观扩张过程中斑块增长模式和湮灭模式。填充式增长斑块(图2a)和包围式消亡斑块(图2d)邻域中原有景观占主导;边缘式增长斑块(图2b)和邻接式消亡斑块(图2e)邻域内原有景观与其他景观并存;飞地式新增斑块(图2c)和孤立式消亡斑块(图2f)邻域内主要为其他景观。基于邻域特征定义景观演化模式识别指数(LEPI):

$$LEPI = (-1)^{\lambda} \times \frac{N_0 + N^*}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: λ 为二值变量,通过预先判断研究时段(t_0, t)内斑块的变化情况(新增或消亡)进行赋值,若该斑块为 t 时刻的新增斑块,则取值为0,若研究起始时刻(t_0 时刻)的斑块在 t 时刻消亡,则取值为1; N 为 t 时刻新增(消亡)斑块的邻域面积, N_0 为 t 时刻邻域内原有景观面积, N^* 为(t_0, t)时段中邻域内原有斑块的新增或消亡面积(消亡面积为负)。当新增或消亡斑块的邻域内原有景观面积越大,即新增或消亡斑块与原有景观连接越紧密时,该指数趋近于1或-1,多识别为填充式增长或包围式消亡,反之则趋近于0,呈现明显的飞地式增长或孤立式消亡特征。

2.2 景观演化规模指数

景观演化规模指数(LEAI)可分为斑块级别(Patch)和景观级别(Landscape)。斑块级别的斑块演化规模指数(Patch Evolution Area Index, PEAI),将其定义为景观演化过程中每一新增(消亡)斑块面积与新增(消亡)斑块总数的乘积同新增(消亡)斑块总面积的比值。

$$PEAI_i = (-1)^{\lambda} \frac{S_i \times k}{S} \quad (2)$$

式中: λ 为二值变量,取值为0或1(同上); $PEAI_i$ 为第 i 斑块的斑块演化规模指数; k 为新增(消亡)斑块数; S_i 为第 i 个新增(消亡)斑块面积; S 为新增(消亡)斑块总面积。当 $|PEAI|=1$ 时,说明斑块增长或消亡水平与整体平均水平保持一致;当 $|PEAI|<1$ 时,

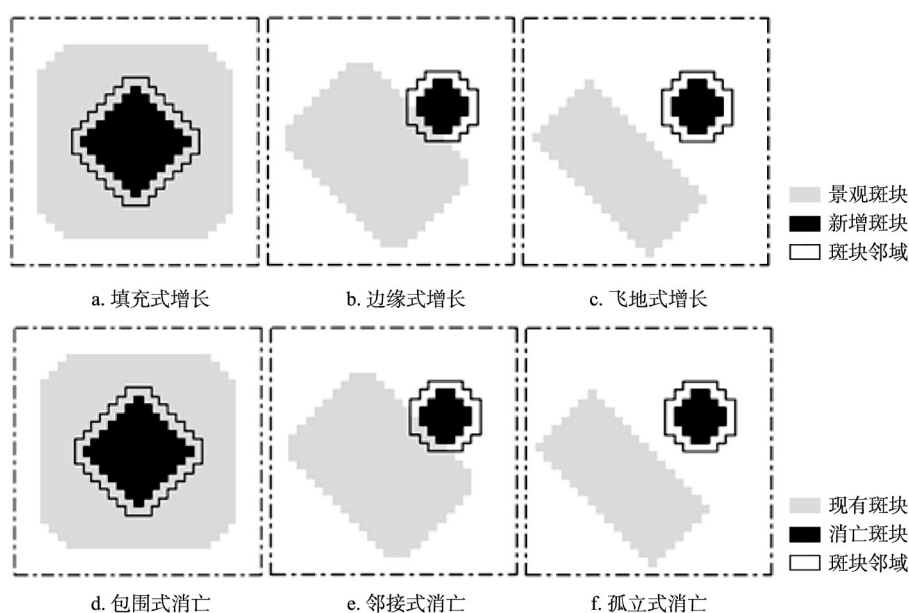


图2 景观演化的空间模式(a-c为斑块增长模式,d-f为斑块湮灭模式)

Fig.2 Landscape evolution types (a-c: patch expansion modes, d-f: patch shrinkage modes)

说明斑块增长(消亡)水平低于整体水平,反之则反。该指数可以反映每一斑块的转换规模同整体转化规模均值间的相对大小。

景观级别的LEAI指数,包括景观演化规模增长指数(Landscape Evolution Area Increase Index, LEAII)和景观演化规模衰减指数(Landscape Evolution Area Reduce Index, LEARI),定义如下:

$$LEAI = LEAII - LEARI = \frac{S_{\text{increase}}}{S_0} - \frac{S_{\text{reduce}}}{S_0} = \frac{S_t - S_0}{S_0} \quad (3)$$

式中: S_0 和 S_t 分别代表所研究景观起始时刻(t_0)的斑块总面积和 t 时刻的斑块总面积; S_{increase} 、 S_{reduce} 分别为(t_0 , t)时间段内所有增长斑块和消亡斑块总面积。 $LEAI$ 指数可反映研究时段内景观总规模的变动情况:当 $LEAI$ 指数 <0 时,景观在研究时段内收缩;当 $LEAI$ 指数 >0 时,景观在研究时段内扩张;当 $LEAI$ 指数 $=0$ 时,景观在研究时段内总面积保持不变。

现有景观扩张指数,虽弥补了景观指数在分析景观动态格局演变中的不足,但在反映斑块扩张规模及对特殊形状的斑块识别(图3)等方面仍存在缺陷,主要是指指数过于简单、功能较为单一、对特定形状斑块可能存在错分、漏分等问题;同时侧重于对景观扩张过程中斑块的增长规模及其空间扩展模式的分析,忽略了景观演变过程中普遍存在的斑块消亡与湮灭现象。

而景观演化特征指数(LECI)具有以下特征:一是能判定景观消亡模式。景观演化既应包括景观斑块的新生与增长,同时也应包括斑块的收缩与消亡。而随着景观格局趋于稳定,景观由空间扩展逐渐转为小尺度上的格局优化,景观斑块消亡现象的研究将具有更为重要的意义。二是能实现对特殊形状斑块空间演化模式的识别,同时描述斑块演化规模。三是基于邻域定义的景观演化特征指数最

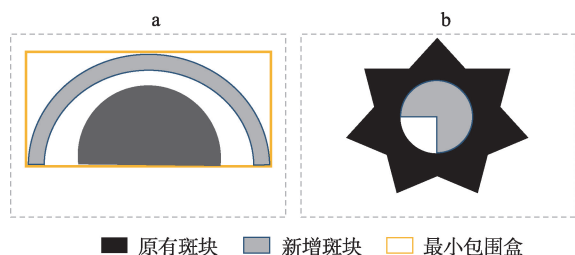


图3 特殊扩张斑块

Fig.3 Special patches of landscape expansion

小统计单元为遥感影像数据的像元。

3 研究区概况及数据处理

研究区为武汉都市发展区^①,以研究区内硬化地景观演变为例,分别采用基于邻域的景观演化特征指数(LECI)与基于最小包围盒的景观扩张指数(LEI)(刘小平等, 2009)分析研究区内硬化地扩张过程中斑块演化状况,并进行对比验证。武汉市地处中国的地理中心,转南接北,承东启西,是中国重要交通枢纽,又因湖泊众多,江河纵横被称为“江城”。长江及其最大支流汉水将武汉城区划分为汉口、汉阳和武昌。

本文基于1990、2000和2010年武汉市TM遥感影像数据(30 m×30 m),采用ENVI5.0进行遥感影像的预处理与监督分类,分类精度达到90%以上,获取研究区内各个时期的城市硬化地景观的空间分布数据。利用ArcGIS软件的叠置分析工具提取武汉市1990-2000年、2000-2010年两个时期的城市硬化地景观演变信息(新增斑块图层与消亡斑块图层),基于演化斑块的邻域特征求取景观演化特征指数LECI,并构建扩张斑块的最小包围盒(图4)求取景观扩张指数LEI。其中,基于最小包围盒的

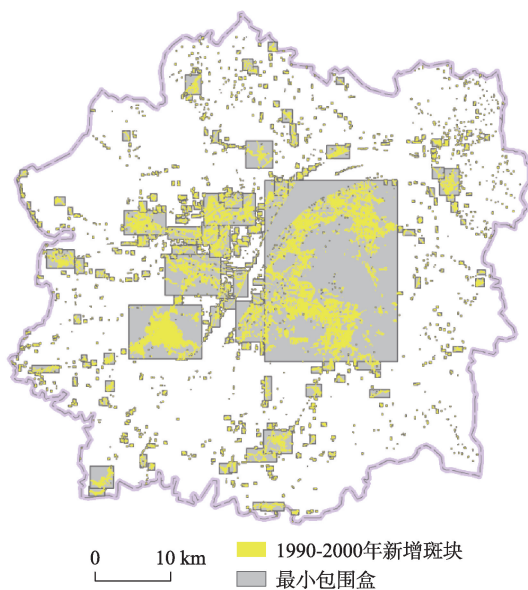


图4 1990-2000年新增斑块的最小包围盒

Fig.4 Envelopes for capturing urban expansion types between 1990 and 2000

① 武汉市都市发展区是在《武汉市城市总体规划(2010-2020年)》中划定的城市功能主要集聚区和城市空间重点拓展区。

LEI 指数计算主要参考刘小平等(2009)的方法,文中不再过多描述。本案例主要研究城市景观演替过程中硬化地景观斑块向其他景观(如绿地景观等)转化的过程,但该方法同样适用于其他景观类型演变过程的研究。为简化表达,后文中的“景观斑块”、“现有斑块”、“新增斑块”、“消亡斑块”等均指代城市硬化地斑块。

4 结果分析

4.1 硬化地景观斑块扩张模式分析

观察不同时段武汉市都市发展区内的城市硬化地景观演化模式识别指数分布直方图(图5)可以发现,描述斑块增长的LEI和LEPI指数分布具有明显的峰值,而描述斑块消亡的LEPI指数取值则较

为分散。采用自然断点法将硬化地景观演化模式识别指数的取值分为三类,以确定不同景观演化模式的划定标准(表1)。

根据设定的景观演化模式分割阈值,可识别研究区硬化地景观的演化模式。总体来看,武汉城市化进程伴随着硬化地景观斑块的快速增长和局部斑块的收缩与消亡。1990-2010年间,研究区内城市硬化地景观依托主城区、交通干线向外扩张明显,斑块增长模式沿主城区向外围规律变换(图6),同时也存在局部的硬化景观斑块向其他景观类型转变(图6a,图6c)。在武汉市硬化地景观演变过程中,填充式增长和包围式消亡的斑块零散地分布于主城区内部和城市边缘区;边缘式增长和邻接式消亡斑块多成片集中分布在城市边缘区;飞地式增长与孤立式消亡斑块数量多面积小,远离主城市规划区

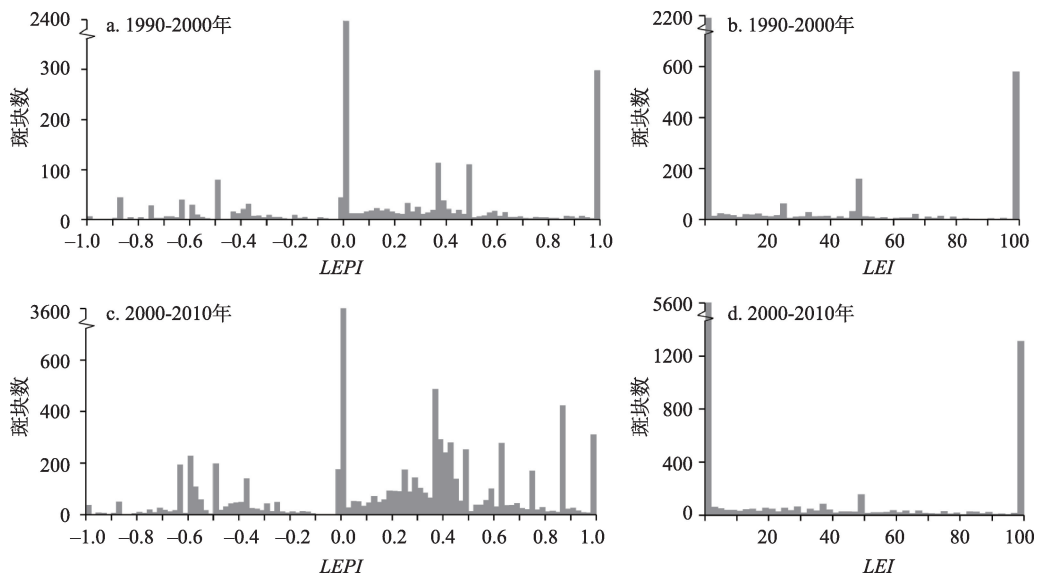


图5 1990-2000年和2000-2010年城市硬化地景观演化模式识别指数分布频数直方图
Fig.5 Robustness of landscape evolution pattern index (LEPI) and landscape expansion index (LEI)
based on histograms for 1990-2000 and 2000-2010

表1 用自然断点法划定的不同硬化地景观扩张模式下模式识别指数的取值区间

城市扩张/消亡模式	1990-2000年		2000-2010年		取值区间	
	LEI	LEPI	LEI	LEPI	LEI	LEPI
消亡模式	包围式	—	[-1.00, -0.60)	—	[-1.00, -0.53)	—
	邻接式	—	[-0.60, -0.25)	—	[-0.53, -0.22)	—
	孤立式	—	[-0.25, -0.00]	—	[-0.22, -0.00]	—
扩展模式	飞地式	[0.00, 22.22]	[0.00, 0.22]	[0.00, 22.22]	[0.00, 0.20]	[0.00, 22.22]
	边缘式	(22.22, 68.09]	(0.22, 0.69]	(22.22, 70.27]	(0.20, 0.59]	(22.22, 69.18]
	填充式	(68.09, 100.00]	(0.69, 1.00]	(70.27, 100.00]	(0.59, 1.00]	(69.18, 100.00]

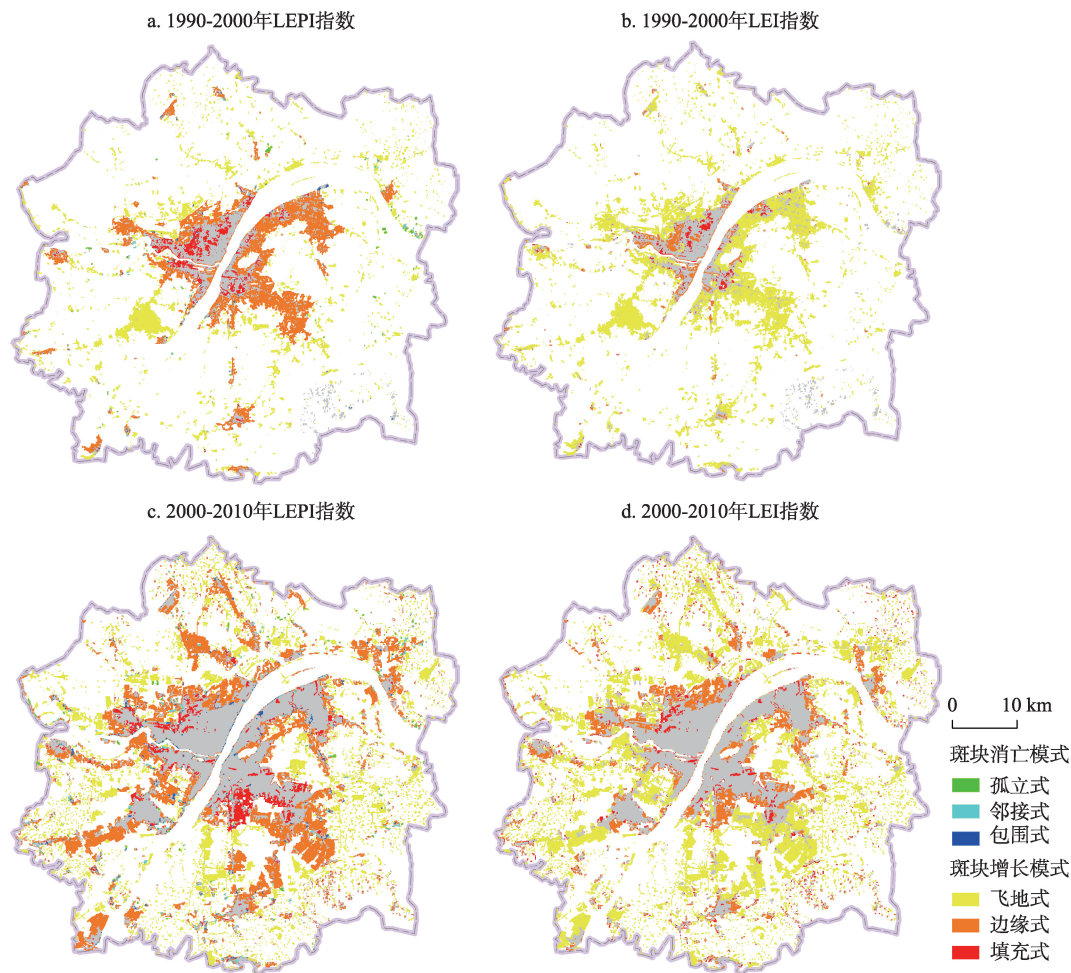


图6 1990-2000年和2000-2010年硬化地斑块演化模式识别

Fig.6 Spatial distribution of six patch evolution types in 1990-2000 and 2000-2010

散落分布。景观扩张模式随距主城区距离的远近,出现从填充式/包围式、边缘式/邻接式到飞地式/孤立式的演替,在空间上呈现明显的梯度分异规律。

分析2000-2010年硬化地景观扩张过程中的两个斑块消亡案例(表2),验证LEPI指数的合理性。案例1所示斑块位于武汉市园博园区内。1998年为解决汉口地区的垃圾污染问题兴建金口垃圾场,此地后经整治成为世界上最大的填埋场生态修复成功案例(曹丽等, 2016),并作为2015年园博会主会场。该斑块在2000-2010年间由硬化地转变为可透水用地,被LEPI指数识别为邻接式消亡。案例2所示斑块位于现武汉市环金银湖绿地景观内。武汉市在快速城镇化过程中,填湖造地等行为使得湖泊的生态环境遭到严重破坏,2000年前该斑块被开发为硬化地。2001年金银湖公园开始建设,并被列

表2 硬化地消亡斑块案例		
Tab.2 Examples of urban patch shrinkage		
案例	2000年遥感影像	2010年遥感影像
案例1		

入首批国家城市湿地公园名单,促使该区域生态环境得到良好的改善和保护。2000-2010年间案例2中的硬化地斑块发生孤立式消亡。

将基于邻域的LEPI指数与基于最小包围盒计算的LEI指数进行对比分析,可以得到:

(1) LEPI指数识别新增斑块扩张模式的准确度更高。LEI指数分布更为聚集,组间差异明显,但不能反映新增斑块与原有斑块间的邻接性;LEPI指数相对于LEI指数信息更为丰富,能体现新增斑块(消亡斑块)与原有斑块的相邻程度,LEPI指数值越大说明新增斑块(消亡斑块)邻域内原有斑块面积越大,两者邻接更为紧密,反之则更为松散(图5)。同时,两个研究时间段内,紧邻实验区东部和东北部的区域,存在大规模紧邻原有硬化地景观向外延伸出的新增斑块,LEPI指数中其被准确识别为邻接式增长;而由于斑块面积较大,形状复杂,所得最小包围盒覆盖范围大(图4),这些斑块在LEI指数中被识别为飞地式(图6)。

(2) LEPI指数能准确地识别消亡斑块的湮灭模式。根据景观扩张模式识别指数,研究区消亡斑块的湮灭被准确识别为三种模式(图6)。由于城市内部改造,公园绿地等的建设,在主城区内部以包围式和邻接式为主的斑块消亡是规划引导下的“被动消亡”;而在城市远郊,以孤立式为主的零散小斑块消亡大多为顺应区域发展的“主动消亡”。主城区边缘及远离主城区散落分布的斑块是容易发生自然消亡的斑块,而“被动消亡”斑块的分布受到规划制约,它的消亡并不具有普遍性。但规划政策指引下的武汉市消亡斑块多分布于湖泊沿岸、道路两

侧,一定程度上能从侧面揭示出规划中城市生态修复的空间布局特征,可为城市内部绿色基础设施建设、居民用地整治等提供参考依据。

4.2 景观斑块演化规模分析

斑块演化规模指数适用于同一时段下研究区内斑块间的比较,研究时段内硬化地景观的PEAI指数空间分布如图7所示。1990-2000年间,研究区硬化地景观沿河流和主干道向南和向东扩张明显;而2000-2010年,研究区在沿主干道向南进一步扩张的同时,向西扩张趋势也明显增强,此外在主城区东部还表现出明显的沿湖扩张趋势。景观级别的演化规模指数LEAI可以反映不同时段内景观演化规模的差异。研究的两个时段相比,LEAI指数显著下降(表3),但新增斑块总面积由289 km²增至545 km²,说明整体扩张强度虽有所放缓,但仍表现出高速扩张的特征。而在总面积增加的情况下,LEARI指数仍有明显上升,且主城区内消亡斑块面积明显增加(表4),说明收缩和消亡斑块的负贡献率有所上升且有加速趋势。依据武汉市发展规划与实际建设状况,2000年后全市有更多的硬化地景观地发生转移,城市发展逐渐向内部空间改造转型,城市绿化状况明显提升,居民点改造稳步推进,这与景观指数识别结果相一致。

在两个研究时段内,飞地式扩张在研究区的新增斑块中均占据绝对数量优势,但斑块规模普遍较小;边缘式增长斑块数量少,但其面积增长贡献率

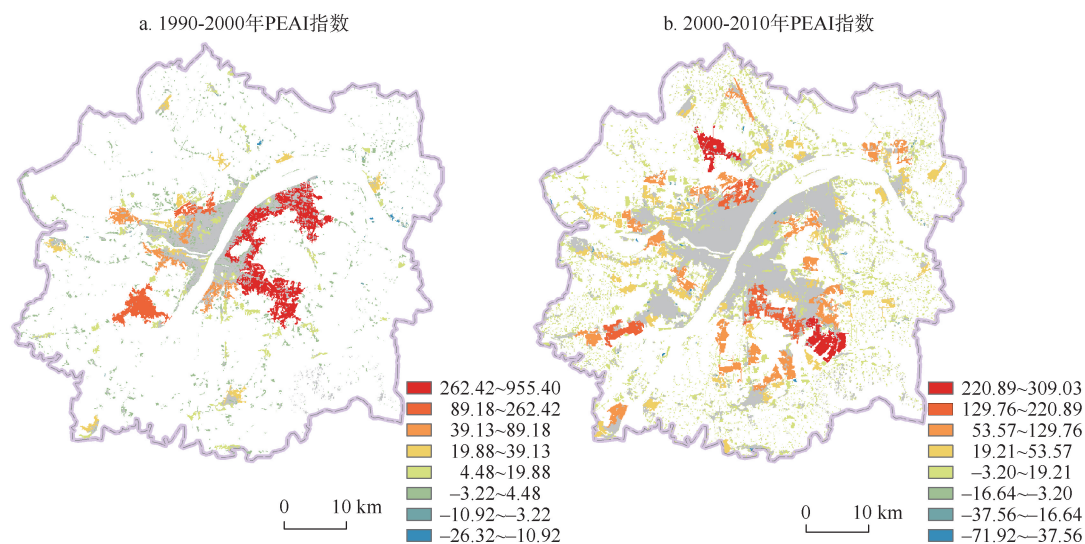


图7 1990-2000年和2000-2010年硬化地斑块演化规模

Fig.7 Spatial distribution of landscape evolution area indices in 1990-2000 and 2000-2010

大,在研究区硬化地景观扩张中占据绝对主导;而填充式增长斑块数量少且总面积最小,两个时期各增长模式面积占比变化不大(表4)。分析研究区城市硬化地景观的局部收缩与消亡现象发现,研究区前一时段以孤立式消亡和邻接式消亡为主,而后一时期邻接式消亡和包围式消亡所占比重明显提升,且相对于1990-2000年,2000-2010年消亡斑块的数量(图5)和面积显著增加。

城市硬化地景观斑块的收缩实质是城市建设用地和居民用地复垦与整治的过程,景观水平上则表现为相对零散的小斑块向较大斑块“漂移”,或直接消亡,在城区多转化为绿化用地,一定程度上源于城市化进程中人们对生态系统服务功能需求的提升。城市绿色空间建设是改进城市景观生态合理性的有效途径,因此,城市收缩为城市景观规划的改进提供契机。通过对城市景观扩张过程中消亡斑块的识别,有利于全面认识城镇化过程中城市景观的演变模式和趋势,为制定更为科学理性的城市规划方案提供依据。

5 结论

在以往快速城市化的背景下,城市空间外延扩张是主要方式。景观扩张指数突破了景观指数只能描述特定时相下景观静态特征的局限,侧重识别景观扩张过程中新增斑块的空间扩展模式和规模,实现了对景观扩张过程的描述。但是,随着建设可持续发展的花园城市、绿色生态宜居城市,城市发展面临由空间扩张向内部改造的转型(仇保兴,2009),城市收缩以及硬化地斑块的消亡越发普遍。针对现有指数在表达城市硬化地景观演变过程中消亡斑块或湮灭斑块的不足,本文设计了基于邻域的景观演化特征指数(LECI),重点用于刻画城市硬化地斑块新生与消亡的双重过程。以1990-2000年和2000-2010年的武汉都市发展区为对象进行研究,发现同景观扩张指数(LEI)相比较,可得出如下结论:

(1) 基于邻域计算的景观演化特征指数LECI,其最小统计单元为遥感影像的像元,它保持了景观斑块与遥感影像像元分布特征的一致性,能准确地判别不同形状、规模斑块的空间演化模式。景观演化模式指数LEPI相对于LEI指数的取值分布更为

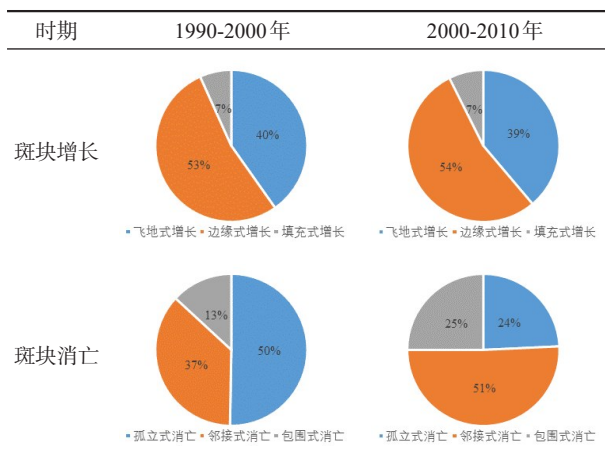
表3 硬化地景观斑块扩张规模指数

Tab.3 Landscape expansion area indices

	1990-2000年	2000-2010年
LEAI	2.153	1.298
LEARI	0.031	0.036
LEAI	2.121	1.262

表4 不同硬化地斑块扩张模式面积占比

Tab.4 Area proportion of different evolution types



离散,能反映新增斑块(消亡斑块)与原有斑块的关联关系,LEPI指数值越大说明新增斑块(消亡斑块)与原有斑块邻接更为紧密,反之则更为松散。LEAI指数可识别不同规模斑块的空间分布并表征景观扩张方向,能准确地描述城市扩展特征。

(2) 景观演化模式指数LEPI能实现对硬化地消亡斑块湮灭模式的准确识别,是对传统景观格局演变分析方法的有效补充与完善。通过LEPI指数对斑块湮灭模式的识别,能得到容易向其他景观转移的硬化地分布特征,一定程度上能从侧面揭示规划中城市生态修复的空间布局特征,可为城市内部公园绿地建设、制定农村居民点整理方案等提供参考依据。

(3) 在研究时段内,研究区城市硬化地景观扩张强度虽有所放缓,但仍表现出高速扩张的特征,城市硬化地景观依托主城区、交通干线向外扩张明显,飞地式和边缘式两类空间扩展模式构成斑块演变的主体,同时研究区城市化过程中尽管以斑块增长为主,但也存在少量的硬化地景观向其他景观转变的局部收缩与消亡,且有加速趋势。在硬化地总面积增加的情况下,LEAI指数显著下降,LEARI指数仍有明显上升趋势,而主城区内部规划引导下的“被动消亡”斑块面积不断增大,这与武汉市城市规

划逐渐加强城市绿化建设并稳步推进居民用地改造等密切相关。研究时段内城市硬化地景观扩张模式随距主城区距离的远近, 出现从填充式/包围式、边缘式/邻接式到飞地式/孤立式的演替, 在空间上呈现明显的梯度分异规律。

参考文献(References)

- 曹丽, 陈娜, 胡朝辉, 等. 2016. 垃圾填埋场: 世界最大的生态修复案例: 以武汉市金口垃圾填埋场为例[J]. 城市管理与科技, 18(3): 24-27. [Cao L, Chen N, Hu Z H, et al. 2016. Laji tianmaichang: Shijie zuida de shengtai xiufu anli: Yi Wuhanshi Jinkou laji tianmaichang weili[J]. Urban Management Science & Technology, 18(3): 24-27.]
- 车前进, 段学军, 郭垚, 等. 2011. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制[J]. 地理学报, 66(4): 446-456. [Che Q J, Duan X J, Guo Y, et al. 2011. Urban spatial expansion process, pattern and mechanism in Yangtze River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 66(4): 446-456.]
- 陈虹, 刘茂松, 许梅, 等. 2008. 南京城市扩展过程中聚落斑块的行为特征[J]. 生态学杂志, 27(1): 56-62. [Chen H, Liu M S, Xu M, et al. 2008. Behavioral characteristics of settlement patches in urbanization of Nanjing[J]. Chinese Journal of Ecology, 27(1): 56-62.]
- 陈凯, 刘凯, 柳林, 等. 2015. 基于随机森林的元胞自动机城市扩展模拟: 以佛山市为例[J]. 地理科学进展, 34(8): 937-946. [Chen K, Liu K, Liu L, et al. 2015. Urban expansion simulation by random-forest-based cellular automata: A case study of Foshan city[J]. Progress in Geography, 34(8): 937-946.]
- 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 2002. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. 应用生态学报, 13(1): 121-125. [Chen W B, Xiao D N, Li X Z. 2002. Classification, application, and creation of landscape indices[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 13(1): 121-125.]
- 高舒琦. 2015. 收缩城市研究综述[J]. 城市规划学刊, (3): 44-49. [Gao S Q. 2015. A review of researches on shrinking cities[J]. Urban Planning Forum, (3): 44-49.]
- 高艳, 毕如田, 曹毅. 2010. 空间粒度变化及土地利用分类对景观指数的影响: 以山西省闻喜县为例[J]. 中国生态农业学报, 18(5): 1076-1080. [Gao Y, Bi R T, Cao Y. 2010. Effect of changing spatial grain size and land-use classification on landscape index: A case study of Wenxi County, Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 18(5): 1076-1080.]
- 关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 2012. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析[J]. 自然资源学报, 27(9): 1447-1459. [Guan X L, Fang C L, Zhou M, et al. 2012. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 27(9): 1447-1459.]
- 何鹏, 张会儒. 2009. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. 林业科学研究, 22(4): 470-474. [He P, Zhang H R. 2009. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics[J]. Forest Research, 22(4): 470-474.]
- 何原荣, 周青山. 2008. 基于SPOT影像与Fragstats软件的区域景观指数提取与分析[J]. 海洋测绘, 28(1): 18-21. [He Y R, Zhou Q S. 2008. Extraction and analysis of regional landscape indexes based on SPOT-5 images and Fragstats software[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 28(1): 18-21.]
- 蒋芳, 刘盛和, 袁弘. 2007. 北京城市蔓延的测度与分析[J]. 地理学报, 62(6): 649-658. [Jiang F, Liu S H, Yuan H. 2007. Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices[J]. Acta Geographica Sinica, 62(6): 649-658.]
- 李素英, 王计平, 任慧君. 2010. 城市绿地系统结构与功能研究综述[J]. 地理科学进展, 29(3): 377-384. [Li S Y, Wang J P, Ren H J. 2010. The structure and function of urban green space system: A review[J]. Progress in Geography, 29(3): 377-384.]
- 李伟峰, 欧阳志云, 陈求稳, 等. 2008. 基于遥感信息的北京硬化地表格局特征研究[J]. 遥感学报, 12(4): 603-612. [Li W F, Ouyang Z Y, Chen Q W, et al. 2008. Study on the spatial pattern of impervious surface using remote sensing data within the urban area of Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 12(4): 603-612.]
- 李昕, 文婧, 林坚. 2012. 土地城镇化及相关问题研究综述[J]. 地理科学进展, 31(8): 1042-1049. [Li X, Wen J, Lin J. 2012. Review of research on land urbanization and related studies[J]. Progress in Geography, 31(8): 1042-1049.]
- 林坚. 2009. 中国城乡建设用地增长研究[M]. 北京: 商务印书馆. [Lin J. 2009. Urban-rural construction land growth in China[M]. Beijing, China: The Commercial Press.]
- 林孟龙, 曹宇, 王鑫. 2008. 基于景观指数的景观格局分析方法的局限性: 以台湾宜兰利泽简湿地为例[J]. 应用生态学报, 19(1): 139-143. [Lin M L, Cao Y, Wang X. 2008. Limitations of landscape pattern analysis based on land-

- scape indices: A case study of Lizejian wetland in Yilan of Taiwan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(1): 139-143.]
- 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 2009. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用[J]. *地理学报*, 64(12): 1430-1438. [Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. 2009. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(12): 1430-1438.]
- 龙瀛, 吴康, 王江浩. 2015. 中国收缩城市及其研究框架[J]. *现代城市研究*, (9): 14-19. [Long Y, Wu K, Wang J H. 2015. Shrinking Cities in China[J]. *Modern Urban Research*, (9): 14-19.]
- 钱敏, 濮勋杰, 张晶. 2015. 基于改进景观扩张指数苏锡常地区城镇扩展空间形态变化[J]. *地理科学*, 35(3): 314-321. [Qian M, Pu L J, Zhang J. 2015. Urban spatial morphology evolution in Suzhou-Wuxi-Changzhou Region based on improved landscape expansion index[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(3): 314-321.]
- 仇保兴. 2009. 我国城市发展模式转型趋势: 低碳生态城市[J]. *城市发展研究*, 16(8): 1-6. [Qiu B X. 2009. The transformation trends of urban development model in China: Low carbon eco-city[J]. *Urban Studies*, 16(8): 1-6.]
- 王海军, 夏畅, 张安琪, 等. 2016. 基于空间句法的扩张强度指数及其在城镇扩展分析中的应用[J]. *地理学报*, 71(8): 1302-1314. [Wang H J, Xia C, Zhang A Q, et al. 2016. Space syntax expand intensity index and its applications to quantitative analysis of urban expansion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 71(8): 1302-1314.]
- 武鹏飞, 周德民, 宫辉力. 2012. 一种新的景观扩张指数的定义与实现[J]. *生态学报*, 32(13): 4270-4277. [Wu P F, Zhou D M, Gong H L. 2012. A new landscape expansion index: Definition and quantification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(13): 4270-4277.]
- 杨振山, 孙艺芸. 2015. 城市收缩现象、过程与问题[J]. *人文地理*, 30(4): 6-10. [Yang Z S, Sun Y Y. 2015. City shrinking: Phenomenon, progress and problems[J]. *Human Geography*, 30(4): 6-10.]
- 姚士谋, 张平宇, 余成, 等. 2014. 中国新型城镇化理论与实践问题[J]. *地理科学*, 34(6): 641-647. [Yao S M, Zhang P Y, Yu C, et al. 2014. The theory and practice of new urbanization in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 34(6): 641-647.]
- 游丽平, 林广发, 杨陈照, 等. 2008. 景观指数的空间尺度效应分析: 以厦门岛土地利用格局为例[J]. *地球信息科学*, 10(1): 74-79. [You L P, Lin G F, Yang C Z, et al. 2008. The effects of spatial scales on landscape indices: A case study of the landuse pattern of Xiamen Island[J]. *Geo-Information Science*, 10(1): 74-79.]
- 岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 等. 2007. GIS与RS技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J]. *地理学报*, 62(11): 1223-1231. [Yue D P, Wang J P, Liu Y B, et al. 2007. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in northwest of Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 62(11): 1223-1231.]
- 詹云军, 朱捷缘, 严岩. 2017. 基于元胞自动机的城市空间动态模拟[J]. *生态学报*, 37(14): 4864-4872. [Zhan Y J, Zhu J Y, Yan Y. 2017. Dynamic simulation of urban space based on the cellular automata model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(14): 4864-4872.]
- 张阳阳, 李阳兵. 2010. 重庆市主城区森林景观斑块时空动态特征[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 27(3): 36-40. [Zhang Y Y, Li Y B. 2010. Temporal and spatial features of forest landscape patch in main districts of Chongqing city[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 27(3): 36-40.]
- 周恺, 钱芳芳. 2015. 收缩城市: 逆增长情景下的城市发展路径研究进展[J]. *现代城市研究*, (9): 1-13. [Zhou K, Qian F F. 2015. Shrinking city: On searching for urban development in non-growing scenarios[J]. *Modern Urban Research*, (9): 1-13.]
- 周翔, 陈亮, 象伟宁. 2014. 苏锡常地区建设用地扩张过程的定量分析[J]. *应用生态学报*, 25(5): 1422-1430. [Zhou X, Chen L, Xiang W N. 2014. Quantitative analysis of the built-up area expansion in Su-Xi-Chang region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(5): 1422-1430.]
- Crist P J, Kohley T W, Oakleaf J. 2000. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool[J]. *Landscape Ecology*, 15(1): 47-62.
- Doak D F, Mills L S. 1994. A useful role for theory in conservation[J]. *Ecology*, 75(3): 615-626.
- Fan F L, Fan W. 2014. Understanding spatial-temporal urban expansion pattern (1990-2009) using impervious surface data and landscape indexes: A case study in Guangzhou (China) [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083609.
- Gustafson E J. 1998. Quantifying landscape spatial pattern:

- What is the state of the art[J]. *Ecosystems*, 1(2): 143-156.
- Haase D, Haase A, Kabisch N, et al. 2012. Actors and factors in land-use simulation: The challenge of urban shrinkage [J]. *Environmental Modelling & Software*, 35: 92-103.
- He C Y, Liu Z F, Xu M, et al. 2017. Urban expansion brought stress to food security in China: Evidence from decreased cropland net primary productivity[J]. *Science of the Total Environment*, 576: 660-670.
- Jaeger J A G, Schwick C. 2014. Improving the measurement of urban sprawl: Weighted urban proliferation (WUP) and its application to Switzerland[J]. *Ecological Indicators*, 38: 294-308.
- Jiao L M. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion[J]. *Landscape and Urban Planning*, 139: 26-39.
- Jiao L M, Mao L F, Liu Y L. 2015. Multi-order landscape expansion index: Characterizing urban expansion dynamics [J]. *Landscape and Urban Planning*, 137: 30-39.
- Lauf S, Haase D, Kleinschmit B. 2014. Linkages between ecosystem services provisioning, urban growth and shrinkage: A modeling approach assessing ecosystem service trade-offs[J]. *Ecological Indicators*, 42: 73-94.
- Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. 2010. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data[J]. *Landscape Ecology*, 25(5): 671-682.
- Liu X P, Ma L, Li X, et al. 2014. Simulating urban growth by integrating landscape expansion index (LEI) and cellular automata[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(1): 148-163.
- Luck M, Wu J G. 2002. A gradient analysis of urban landscape pattern: A case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA[J]. *Landscape Ecology*, 17(4): 327-339.
- Manicacci D, Olivieri I, Perrot V, et al. 1992. Landscape ecology: Population genetics at the metapopulation level[J]. *Landscape Ecology*, 6(3): 147-159.
- O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, et al. 1988. Indices of landscape pattern[J]. *Landscape Ecology*, 1(3): 153-162.
- Ricotta C, Avena G. 1999. Monitoring water stress induced variation in the remotely sensed biomass pattern of Sardinia (Italy) with variograms[J]. *Ecosystem Health*, 5(4): 259-264.
- Shi Y Q, Sun X, Zhu X D, et al. 2012. Characterizing growth types and analyzing growth density distribution in response to urban growth patterns in peri-urban areas of Lianyungang City[J]. *Landscape and Urban Planning*, 105 (4): 425-433.
- Skinner C N. 1995. Change in spatial characteristics of forest openings in the Klamath Mountains of northwestern California, USA[J]. *Landscape Ecology*, 10(4): 219-228.
- Smits P C, Annoni A. 1999. Spatial analysis of land-use changes as knowledge tools in support of European spatial policies and ecosystem health[J]. *Ecosystem Health*, 5 (4): 275-284.
- Teng M J, Zeng L X, Zhou Z X, et al. 2016. Responses of landscape metrics to altering grain size in the Three Gorges Reservoir landscape in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1055.
- Tian L, Chen J Q, Yu S X. 2014. Coupled dynamics of urban landscape pattern and socioeconomic drivers in Shenzhen, China[J]. *Landscape Ecology*, 29(4): 715-727.
- Wilson E H, Hurd J D, Civco D L, et al. 2003. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth[J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 275-285.

Landscape evolution characteristic index and application

ZHANG Anqi^{1,2}, XIA Chang³, LIN Jian^{1*}, CHU Jianqun¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: With the rapid urbanization, urban sprawl growth and the contraction of ecological space have become a common phenomenon in China. Ground surface hardening is the main characteristic in urban landscape expansion, which has become widely concerned. Landscape expansion index (LEI) has been an important tool to describe and quantify this process. However, in the period of new urbanization, with the adjustment and optimization of urban internal structure and the improvement of urban greening rate, the shrinkage and extinction of hardened ground landscape have been another important form of urban landscape evolution. It is urgent to find a new and effective method to describe the emerging features of urban development. Therefore, a new landscape index based on the neighborhood characteristics of patches—landscape evolution characteristic index (LECI), including landscape evolution pattern index (LEPI) and landscape evolution area index (LEAI)—is proposed to comprehensively analyze the dynamic features of the landscape pattern. Collaborative analysis can be implemented by this index to recognize the expansion and shrinkage of the hardened landscape patches during the landscape pattern evolution in two or more periods. This index also can overcome the difficulty of LEI in identifying the pattern of special shaped patches. The LECI was applied to study the urban landscape expansion of metropolitan development area in Wuhan City during 1990-2010, and compared with LEI based on minimum bounding box. The results indicate that (1) LEPI can accurately identify the three modes of urban expansion—the infilling type, the edge-expansion type, and the outlying type, as well as for the isolated type, the adjacent type, and the surrounded type of urban shrinkage, and LEAI can perfectly reflect patch expansion/shrinkage intensity and landscape expansion/shrinkage direction; (2) Patch shrinkage of the hardened ground landscapes in the study area is clearly intensified. The recognition of shrinkage modes of these patches through LEPI can reveal the spatial distribution of urban ecological restoration and contribute to the construction of urban green infrastructure and residential land remediation; (3) Based on the analysis of LECI in the study area during 1990-2010, it was found that the speed of urban landscape expansion has been slowed but still rapid, and the outlying type and edge-expansion type are the dominant modes of patch change. As the distance from the central city increases, the spatial distribution pattern of different evolution modes is clearly distinctive, which are infilling/surrounded type, edge-expansion/adjacent type, and outlying/isolated type.

Key words: landscape evolution characteristic index; hardened landscape evolution; neighborhood characteristic; dissolved patch of hardened ground; Wuhan metropolitan development area