

长沙市生态本底质量空间异质性演化及模拟

喻冰洁 唐由海 魏哲 毕凌岚

(西南交通大学建筑与设计学院, 中国四川成都 611756)

【摘要】借助 GIS、ENVI 对 2005、2010、2015 年的长沙市中心五区(岳麓区、芙蓉区、雨花区、天心区、开福区) TM/ETM 遥感影像进行解译, 并使用 IDRISI 中的 CA—Markov 模块模拟出 2020 年生态本底要素分布图。利用主成分分析法构建了城市生态本底质量评价模型, 通过圈层分析法, GS+半方差函数分析, 热点区分析, 灰色关联分析法, 对研究区的生态本底质量空间异质性演化进行综合分析评价, 结果表明: ①总体上长沙市已形成了山水洲城的景观生态格局, 但生态本底在建设用地扩张下, 开始呈现高异质性、破碎化的演化趋势, 城市生态本底质量从 0.3006 下降到 0.2571(2005-2020); ②长沙市生态本底质量具有典型的圈层、轴向梯度结构, 且“城市生态交错带”是演化最为剧烈的区域; ③生态本底质量的空间结构具有区域、时间与方向分异性, 且以区域空间异质性最重要; ④生态本底质量演化热点区分布呈现由边缘区集聚向外围区扩散、“蛙跃”趋势; ⑤生态本底质量驱动因子中工业化率具有最高的灰色关联度(0.8421), 且岳麓区生态本底质量与工业化率灰色绝对关联度最高(0.6031)

【关键词】生态本底质量; 空间异质性; 模拟预测; 灰色关联; 长沙市

【中图分类号】F290 **【文献标识码】**A

【文章编号】1000—8462(2016)09—0173—09

【DOI】10.15957/j.cnki.jjdl.2016.09.023

系统往往在空间上具有复杂性或变异性, 即空间异质性; 同时还是由多个层次组成的有序等级整体系统。对此进行的研究与分析是进一步理解生态过程的基础, 也是正确认识生态过程及其驱动机制的前提。在我国城市化进程中, 快速扩张的经济增长模式引领包括长沙在内的众多中国城市实现城镇化和工业化, 但是, 另一方面, 在进入工业化中期阶段的同时, 也使城市的资源、环境问题日益凸显, 极大地改变了城市生态本底的格局, 城市建设用地不断深入到城市绿地与水域中生态本底是城市发展与存在的基础、基质, 主要反映的是城市山、水、城、田景观的基本格局, 生态本底质量体现了区域本底各类型要素的生态价值, 是对区域内所有本底基质类型的环境质量、土地利用价值、生物丰富度的综合定量评估。本底生态格局的空间异质性表现为本底景观要素在外力作用下, 原来连续景观逐步变为许多彼此隔离的不连续的斑块镶嵌体的过程。具有空间分异特性的城市生态系统及其空间地域范围内的人类、经济等活动一起决定城市生态本底质量的时空分布。

1990 年代以来随着地理信息和空间分析技术的日益成熟和广泛应用, 相关研究日益丰富。目前国内外对于经济活动对城市及其周边地区生态系统影响的研究内容主要集中于: 生态质量、生态安全; 生态服务价值; 等方面的时空异质性; 研究方法主要利用遥感影像, 通过 GIS 空间分析法、地统计学方法、关联分析法对其时空分布特征进行研究, 或利用 CA 元胞自动机, 或者 CLUE—S 模型对土地变化进行模拟; 研究尺度包括: 全球或区域、城市以及城市周边地区-9

等；研究类型包括：森林、湿地、农田以及河流等不同本底要素。而关于城市生态本底的空间格局及其质量分布的研究较为缺乏。本文在参考前人研究成果的基础上，以快速城市化的长沙市中心五区为研究区域，运用遥感、GIS 技术以及空间统计学方法，开展生态本底质量空间异质性分析与模拟，可为长沙市及周边地区土地资源的合理利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

以湖南省长沙市中心城区的岳麓区、芙蓉区、天心区、开福区、雨花区作为研究区域，地域范围为 $111^{\circ} 53' E - 114^{\circ} 15' E, 27^{\circ} 51' N - 28^{\circ} 41' N$ ，总面积 $1206.33 km^2$ 。长沙市位于湖南省东部偏北，湘江下游和长浏盆地西缘西侧低山区，长沙城处于从丘陵向平原的过渡地带。碧虚岭海拔 $300.8 m$ ，为岳麓山最高峰。山前有天马山、凤凰山大小岗丘罗列；山后有桃花岭、金牛岭等。该地区属亚热带季风气候，气候温和，降水充沛，雨热同期，四季分明。市区年平均气温 $17.2^{\circ} C$ ，年均降水量 $1361.6 mm$ 。

1.2 数据来源

遥感数据选取 2005、2010、2015 年的 TM/ETM 遥感影像，数据来源于国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn>) 网站。主要采用 Arc-GIS10.3、IDRISI15.0、ENVI4.7 等 GIS 软件和遥感图像处理软件对长沙市中心城区的遥感影像进行处理。根据解译标志，最终得到研究区的 2005、2010、2015 年生态本底要素分布图（图 1）。为了保证解译的精度及研究的需要，将研究区生态本底类型分为 5 个一级类（农田、绿地、水域、建设用地和未利用地）。

社会经济数据主要来源于长沙市天心区、岳麓区、芙蓉区、雨花区和开福区的 2005-2014 年国民经济与社会发展公报，湖南省 2014 年统计年鉴，长沙市 2005、2014 年统计年鉴等。

2 研究方法

2.1 ICA - Markov 模型

细胞自动机 (CellularAutomata) 是一种“自下而上”的动态模拟建模框架，具有模拟复杂系统时空演化过程的能力。在土地利用栅格图中，每个像元可以看做一个元胞，每个元胞的土地利用类型为元胞的状态，CA - Markov 模型在 GIS、IDRISI 软件的支持下，利用面积转移矩阵和条件概率图像进行运算，从而确定元胞状态的转移，因此可以模拟生态本底格局的变化。

2.2 生态本底质量综合评价体系

为了测度长沙市中心城区的生态本底质量，本文参考已有的城市环境质量评价与自然生态环境质量评价方法，并在此基础上进行了类型以及权重的调整（表 1），构建了生态本底质量评定模型。采用主成分分析法提取反映生态本底要素质量的各个组分特征，利用 SPSS 软件进行因子主成分分析，最终选取植被覆盖度、水网密度、环境质量指数、土地退化指数”-23’四个指标，经过研究尺度筛选后，采用 $300m \times 300m$ 单元格作为生态质量评定像元。基本公式如下：

$$X = 0.45X_1 + 0.20X_2 + 0.15X_3 + 0.20X_4$$

式中： X 代表生态本底质量； X_1 是植被覆盖度； X_2 是水网密度指数； X_3 是环境质量指数； X_4 是土地退化指数。

2.3 半方差函数

地统计学是以区域化变化理论为基础，借助半变异函数，揭示变量的空间异质性，其基本原理和方法在诸多文献中有比较详细的描述，在此不再赘述。半变异函数定义为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中： h 为两样本点的空间分隔距离； $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的观测值($i=1, 2, \dots, N(h)$)， $N(h)$ 是分隔距离为 h 时的样本对总数。半变异函数是地理现象分布中的空间依赖性^[30]与空间异质性的一个综合性衡量指标，主要参数包括：块金值 C_0 、基台值 $C_0 + C$ 及变程(*range*) A_0 。本文主要使用GS+的半方差模型对生态本底质量的方向分异性进行研究。

2.4 热点区分析

Getis — OrdG 用于识别不同的空间位置上的高值簇与低值簇，即热点区(hotspots)与冷点区(coldspots)的空间分布。

$$G_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \times X_j / \sum_{j=1}^n X_j$$

式中： X_i 和 X_j 分别为属性特征 X 在空间单元 i 和 j 上的观测值，为了便于比较和研究，对 G_i 进行标准化处理，其中 $E(G_i)$ 和 $\text{Var}(G_i)$ 为 G_i 的数学期望和方差：

$$Z(G_i) = \frac{G_i - E(G_i)}{\sqrt{\text{Var}(G_i)}}$$

若 $Z(G_i)$ 为正且显著， G_i 表明位置 i 单元周围的价值相对较高，属高值空间集聚，即热点区，反之，如果属低值空间集聚，即冷点区。

2.5 灰色关联模型

灰色关联分析是灰色系统理论的基础，是对系统变化发展态势的定量描述和比较的方法，它的实质是关联系数的分析。本文利用灰色关联模型对影响生态本质量演化的驱动因子进行分析。

关联分析首先要制定参考的母因素时间数列，参考数据列常记为 X_0 ，一般表示为：

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$$

关联分析中的被比较数列又称子因素时间数列，常记为 X_i ，一般表示为：

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), (i = 1, 2, \dots, m)$$

对于一个参考数据列 X_0 ，比较数据列 X_i ，比较

曲线与参考曲线在各点的差为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

式中: $\xi_i(k)$ 是第 k 个时刻比较数据列 X_i 对应的曲线与参考数据列 X_0 对应曲线的相对差值,又称为 X_i 对 X_0 在 k 时刻的关联系数; ζ 为分辨系数,用于减少极值对计算的影响,其取值为 $\zeta \in (0, 1)$,在实际应用中一般取 $\zeta \leq 0.5$ ^[34-36]。

系统特征序列 X_0 与关联序列 X_i 之间的关联度为:

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{0i}(k)$$

在上述关联系数的基础上引入灰色绝对关联度,灰色绝对关联模型计算过程具体如下:

设 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为系统的特征序列; $X_i^0 = (x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n))$

($i = 1, 2, \dots, m$),为系统的行为系列,两者长度相同,即:

$$X_0^0 = (x_0^0(1), x_0^0(2), \dots, x_0^0(n))$$

$$X_i^0 = (x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n))$$

分别为 X_0 与 X_i 的始点零化像则

$$|s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_0^0(k) + \frac{1}{2} x_0^0(n) \right| \quad (1)$$

$$|s_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2} x_i^0(n) \right| \quad (2)$$

$$|s_i - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2} (x_i^0(n) - x_0^0(n)) \right| \quad (3)$$

$$\varepsilon_{0i} = \frac{1 + |s_0| + |s_i|}{1 + |s_0| + |s_i| + |s_i - s_0|} \quad (4)$$

表1 生态本底质量综合评价指标体系及权重
Tab.1 Comprehensive evaluation index system on ecological background quality

目标层	指标层	权重	因子层	权重
生态本底质量	植被覆盖指数	0.45	绿地(含林地、草地)(km ²)	0.56
			水域湿地(km ²)	0.28
			耕地(km ²)	0.11
			建筑用地(km ²)	0.04
			未利用地(km ²)	0.01
	水网密度指数	0.20	河流总长度(km)	0.35
			水域面积(km ²)	0.29
			水资源占被区域面积的比重(%)	0.36
			二氧化硫浓度(SO ₂)(mg/m ³)	0.40
	环境质量指数	0.15	二氧化碳浓度(CO ₂)(mg/m ³)	0.30
			固体废物(t/km ²)	0.20
			PM2.5(μg/m ³)	0.20
	土地退化指数	0.20	轻度侵蚀(t/km ²)	0.05
			中度侵蚀(t/km ²)	0.25
			重度侵蚀(t/km ²)	0.70

3 结果与分析

3.1 长沙市中心城区生态本底格局演化及模拟分析

图1是2005、2010、2015年的城市生态本底要素分布图,城市建成区的扩张是改变原有生态格局的主要因素,2005-2013年长沙市建成区面积从167.70km²,增长到325.51km²,城市中心区域逐渐形成了大面积,蔓延度大的单一景观体系。由于长株潭城市群一体化、湘江新区设立等城市发展战略,以及城市北部的森林保护区的生态屏障作用,2000-2015年长沙城市整体向西、南拓展。建设用地的高速增长导致生态本底要素中的农田、绿地面积大量减少,各个城市组团之间的生态廊道也遭到了不同程度的破坏。城市景观破碎化速度加快,绿地面积、水网密度以及生态本底质量持续下降。

基于2005、2010、2015年卫星图遥感影像解译得到3个年份的生态本底要素分布图,利用IDRS-SI, GIS,以Logistic模型得到的2015年的各生态本底要素类型概率图作为CA—Markov模型中的适宜性图集,模拟2020年各生态本底要素类型的ROC值(Logistic回归检验值)均达到0.70以上,满足本次研究需要。由图2(2020年生态本底要素分布模拟图)可知,未来长沙城市建成区面积将继续扩张,沿交通线、交通枢纽与湘江两岸将成为城市蔓延热点,建设用地扩张仍是生态本底格局变化的最主要原因,城市景观呈现破碎化,高异质性趋势。

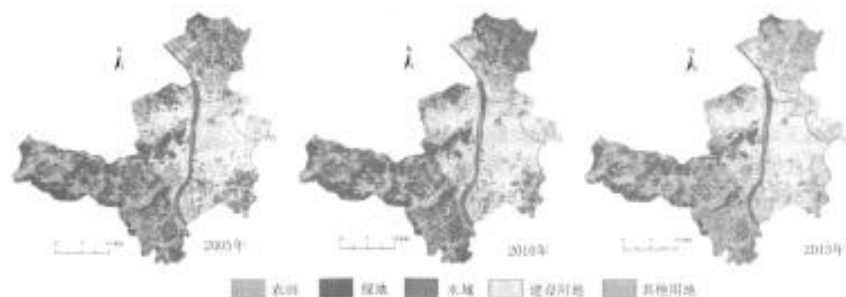


图1 2005、2010、2015年生态本底要素分布演变
Fig.1 Evolution of ecological background elements distribution in 2005, 2010 and 2015

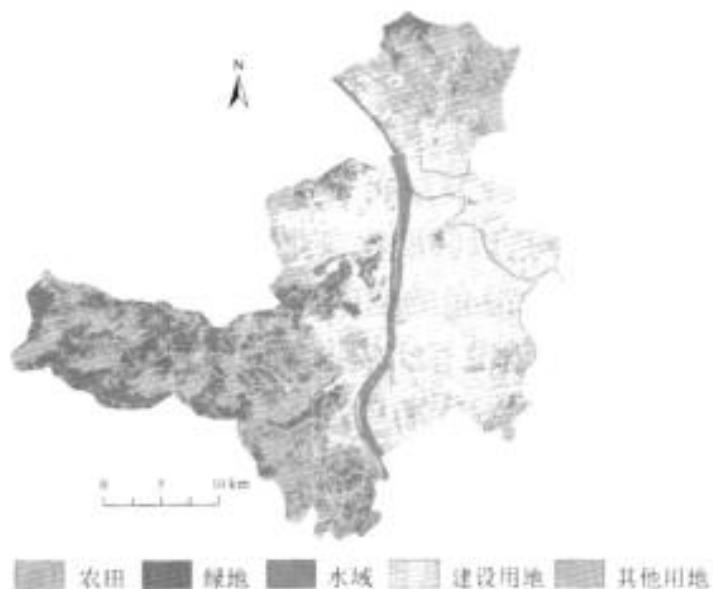


图2 2020年生态本底要素分布模拟
Fig.2 Simulation of ecological background elements distribution in 2020

3.2 生态本底质量空间分异与演化模式

3.2.1 总体格局

基于生态本底质量综合评价体系(表1),通过GIS与相关数据生成2005、2015、2020年的生态本底质量格局图(图3),能认知与模拟生态本底质量的演化及发展趋势。2005-2015年,长沙市中心区生态本底质量空间分布格局发生了明显的变化,有13.5%的区域生态本底质量下降,仅有2.3%的区域升高。而通过图3模拟的2020年结果来看,生态本底质量低值区仍在不断增加,集中在城市的西、西北以及东南区域,且这种变化在减缓。这说明随着经济增速的放缓,城市建设活动减少,长沙市的生态本底质量将会趋于稳定。

将城市生态本底质量按照数值的高低,按照长沙市的行政边界划分得到所辖乡镇的区域生态本底质量分布图(图4)。生态本底质量降低的主要区域是岳麓片区、坪浦组团和暮云组团。

由于受到城市向西、南拓展以及沿湘江附近城市开发强度提高的影响，岳麓区、天心区、雨花区的建成区面积、人口密度迅速增加，2005-2020 年这三个区域的生态本底低值区明显增加。由于临近主城区，开福区北部的新港镇、青竹湖镇生态本底质量也有所降低。

生态本底质量有所提高的地方主要是人工水域和绿地建设的地方，变化比较明显的区域是岳麓区的梅溪湖等湿地公园、大学城以及中心城区存量土地开发的部分新建小区。

生态本底质量基本稳定的区域占大部分，主要包括岳麓区的雨敞坪镇、莲花镇、含浦镇，开福区的捞刀河镇，以及城市的主体部分。这些区域的城市化接近饱和或者速率较缓慢，城市增量土地没有无序扩张，生态本底质量保持得较为稳定。城市中重要的生态节点、生态屏障区域（岳麓山、桃花岭等森林保护区）由于严格的生态管控，生态本底质量也一直保持在高值（0.40-0.50）。

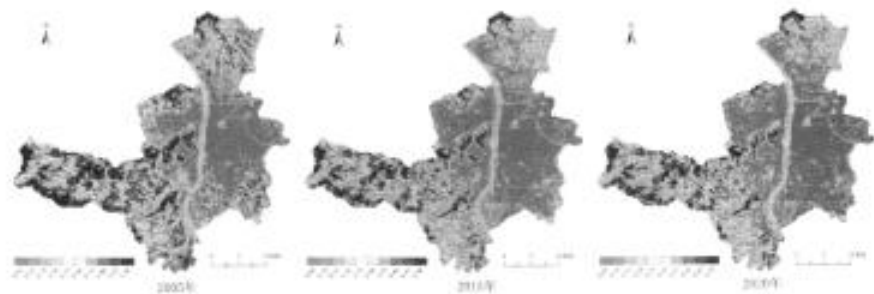


图3 生态本底质量格局演化
Fig.3 Evolution of ecological background quality pattern

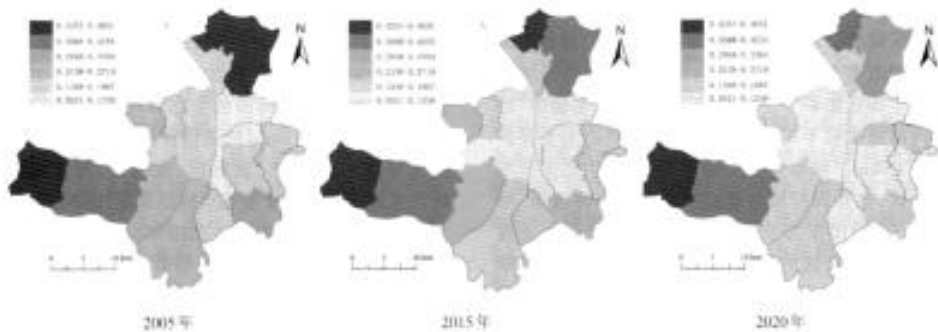


图4 生态本底质量区域分布图
Fig.4 Regional distribution of ecological background quality

3.2.2 空间结构特征

生态本底质量与生态本底的空间异质性呈现圈层式分布，且结构随着时间推移变异。以 5km 为半径向外缓冲四个圈层，选取了城市的核心区、近郊区、边缘区、外围区作为观测对象，基本涵盖整个研究区域。利用圈层分析法、梯度分析法、变异系数法：371 综合分析长沙市的生态本底质量空间结构演化模式。

由表 2 可知，2005-2020 年长沙市的近郊圈层、边缘圈层、外围圈层的生态本底质量都表现为持续下降，2005 年生态本底质量最大值外围圈层(0.4732)是中心圈层（0.1258）的 3.73 倍

，2020 年下降到 3.02 倍。总变化量最大的是边缘圈层为一 0.0924。中心圈层 2005-2010 年生态本底质量下降后，2010-2020 年间微弱上升，总变化量为+0.0089，生态本底空间格局表现为典型圈层分异效应。城市整体生态本底质量均值从 0.30 ‘下降至 0.2571，整体下降 14.50%，且中心圈层与近郊圈层均低于整体均值。从反映数据离散程度的变异系数来看，最大值为 0.5492(2005 年)，表明在这 4 个年份中，2005 年具有最典型的圈层结构，此后变异系数呈逐年下降趋势，说明长沙市的生态本底质量的圈层结构正在弱化，随着时间推移，城市整体生态本底质量演化速率将趋于平缓。

长沙市生态本底质量由城市质心向城市外围的轴向特征表现由“低一中一高一高”演化为“低一低一中一高”的梯度曲线结构。主要原因是城市无序蔓延，建成区的不断扩大造成的城市边缘区景观异化以及整体生态格局的深度变化。城市边缘区为典型的城市“生态交错带”(ecotone/landscapeboundary)，是城市景观梯度化的标志性区域，城市化深刻改变着城乡交错带的自然景观，景观空间格局的改变无疑会对区域自然、生态、社会经济过程产生深远影响‘39。长沙市“城市生态交错带”15 年内向外推移了 4.5km，区域范围以质心为半径扩张了 1.9km。“城市生态交错带”是城市生态安全的缓冲区，也是调控城市建成区蔓延的弹性区域，所以对于“城市生态交错带”的保护与定位至关重要。城市核心区的生态本底质量先下降后又小幅上升(+0.0089)，起伏波动较小。主要原因是长沙核心区经过城市更新，各类型人工绿地、水域的修建以及较为严格的生态管控，使得本底格局保持基本稳定。

表 2 长沙市生态本底质量各圈层比重及数据分析
Tab.2 Proportion and data analysis of each sector of Changsha ecological background quality

代码	生态本底质量				总变化量
	2005	2010	2015	2020	
中心圈层	0.1258	0.1194	0.1236	0.1347	+0.0089
近郊圈层	0.1981	0.1942	0.1884	0.1734	-0.0247
边缘圈层	0.4053	0.3825	0.3445	0.3129	-0.0924
外围圈层	0.4732	0.4427	0.4159	0.4074	-0.0658
均值	0.3006	0.2847	0.2679	0.2571	-0.0435
标准差	0.1651	0.1527	0.1355	0.1263	—
变异系数	0.5492	0.5363	0.5057	0.4921	—

3.3 方向分异的半方差分析

生态本底质虽作为研究区域内的生态变量，其半变异函数在空间与方向有明显相关性，并且在研究方位内和各方向上差异明显，存在空间变异的各向异性 8.30。对照生态本底质量格局的各向异性来看，图 5 以生态本底质量格局变化最为激烈的 2010 年各向异性特征为例，从 N—S、NE—SW、S—N、NW--SE 四个方向进行观测。各方向上变异特征明显，并且在不同距离上影响本底生态质量异质性的作用强度不一样。N—S；S—N 方向的曲线在达到某一个距离值后开始

下降，不再表现出空间自相关 NW-SE 方向一直表现为线性增加，NE — SW 方向在达到 13km 距离后曲线值增幅显著提升，说明 13km 范围内的作用强度不一样。

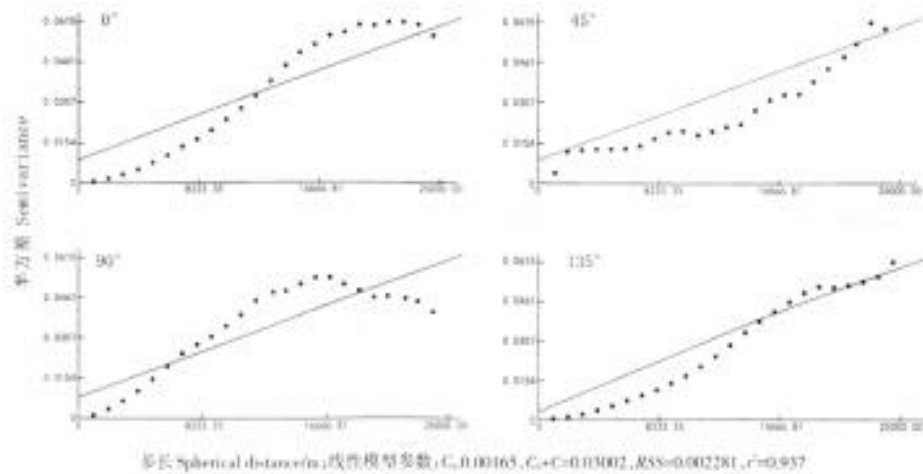


图 5 The direction model of the ecological background quality spatial heterogeneity in 2010

3.4 热点区演变

生态本底质量演化热点的空间分布差异通过计算 Getis — OrdG 来进行比较，以本地质量分布图作为评价对象，分别计算 2005-2010、2010-2015、2015-2020 年三个时段的生态本底质量变化热度 C 统计量，并采用 jenks 的最佳自然断裂法从高到低分成 5 类（热区、次热区、次冷区、冷区、稳定区），生成生态本底质量热点区演化图（图 6）。

根据图 6 显示，2005-2010 年城市的生态本底质量演化热点分布基本呈环形带状分布，城市的主体部分基本以冷点区为主，演化最为剧烈的高热值区出现在岳麓片区、天心区大托镇和雨花区洞井镇，且主要分布在城市的西、南区域；稳定区出现在芙蓉区以及雨敞坪镇。2010-2015 年城市热点区向城市外围蔓延、增生，热点区与冷点区开始频繁切换，区域内产生了高值连片区、集聚区，并以集聚区向外辐射。2015-2020 年城市核心区、近郊区冷点明显增多，城乡交错带由高热区转化为次热区，城市部分外围区域出现高热点区，表明热点区出现“蛙跃”现象，总体分布呈破碎化、均衡化。

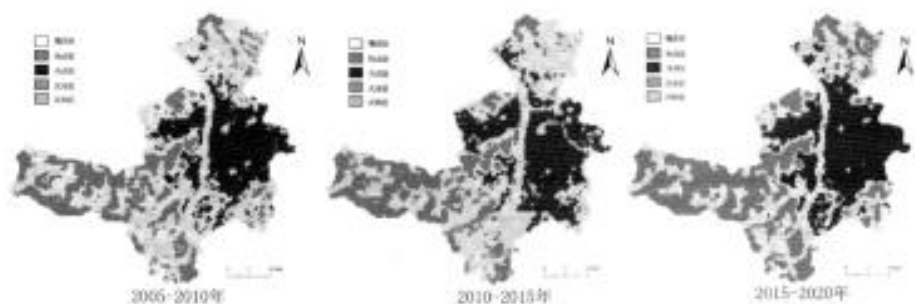


图 6 Evolution of cold-hot pot areas on ecological background quality

3.5 驱动因子的灰色关联分析

3.5.1 生态本底质量各驱动因子灰色关联度分析

短期内的自然原因不是导致研究区城市土地利用变化的主要因素，自然因素变化相对较为稳定，发挥了累计效应，而短期内人文因素则相对较活跃，对城市生态本底质量变化产生较大影响，因此本文研究的驱动因子主要集中在人类驱动力的探讨。为测度不同驱动因子对生态本底质量的影响，本文从产业、人口、经济三个驱动力中分别选取城镇化率、工业化率、人口密度、人均 GDP、暂住人口比值、三大产业比重 8 个驱动因子，以长沙市 2010 年数据为例进行生态本底质量灰色关联度分析表 3 为各驱动因子灰色关联系数。

表 3 生态本底质量各驱动因子的灰色关联系数
Tab.3 Grey relational coefficients of Changsha ecological background quality's driving factors

驱动因子	代号	岳麓区	芙蓉区	天心区	雨花区	开福区
城镇化率	GX ₁	0.333	0.733	0.438	0.752	0.723
工业化率	GX ₂	0.954	0.864	0.796	0.993	0.435
人口密度	GX ₃	0.333	0.333	0.682	0.902	0.475
人均 GDP	GX ₄	0.333	0.333	0.621	0.904	0.551
暂住人口比值	GX ₅	0.550	0.444	0.414	0.500	0.419
第一产业比重	GX ₆	0.468	0.449	0.456	0.570	0.534
第二产业比重	GX ₇	0.843	0.832	0.541	0.742	0.524
第三产业比重	GX ₈	0.333	0.333	0.749	0.602	0.480

表 4 为各驱动因子的灰色关联度,结果表明: $\gamma_{02} > \gamma_{01} > \gamma_{07} > \gamma_{04} > \gamma_{03} > \gamma_{05} > \gamma_{08} > \gamma_{06}$, 工业化率与生态

本底质量的灰色关联度最高(0.8421),其次是城镇化率(0.7164)。近年来,长沙工业化率快速增长,工业用地在城市用地中布局量越来越大,而工业用地绿地率、环境质量相对其他用地较差,使得工业集中区生态本底质量较低。城镇化率也是影响生态本底质量的重要驱动因子,快速的城镇化导致建设用地、城市人口大量增加,加快了生态景观格局的变化,增加了建设空间与其他景观的接触概率。

3.5.2 工业化率与各区域生态本底质量绝对关联度分析

选取长沙市圈层结构的三个典型区：芙蓉区（核心区）、岳麓区（边缘区）、雨花区（近郊区），统计三个区的生态本底质量与工业化率变化情况（表 5），对三个区域的工业化率与生态本底质量进行灰色绝对关联分析。

表 4 生态本底质量各驱动因子的灰色关联度								
Tab.4 Grey relational coefficients of Changsha ecological background quality's driving factors								
因子	城镇化率	工业化率	人口密度	人均GDP	常住人口比值	第一产业比重	第二产业比重	第三产业比重
代号	γ_{1i}	γ_{2i}	γ_{3i}	γ_{4i}	γ_{5i}	γ_{6i}	γ_{7i}	γ_{8i}
关联度	0.7164	0.6421	0.5431	0.5469	0.4663	0.3713	0.6608	0.4199

由表 6 可知，各区域的绝对灰色关联度为： $\gamma_{2i} > \gamma_{1i} > \gamma_{3i} > \gamma_{4i}$ 。岳麓区生态本底质量与工业化率的灰色绝对关联度最高（0.5813），拟合曲线表现为负相关；其次是芙蓉区（0.5081），拟合曲线表现为正相关；最后是雨花区（0.4991），拟合曲线表现为正相关。关联度结果说明岳麓区生态本底质量受工业化率影响最大，2005-2014 年岳麓区的工业化率从 21.83% 增长到 45.94%。近年来岳麓区城市化速度较快，城镇用地面积 20 年来增加了一倍，工业增加值增长了 26.7 倍，工业用地快速增长，导致城市生态本底质量下降了 0.045，降幅达到 10.0%。芙蓉区的工业化率与生态本底质量一直保持较为稳定的水平。雨花区则表现为先平稳后下降，生态本底质量下降 0.033，工业化率下降 12.62%，雨花区的生态本底质量变化的驱动力主要来自城镇化。

表5 2005—2014长沙部分区工业化率
与生态本底质量变动情况

Tab.5 The changes of industrialization rate and
ecological background quality in 2005–2014

年份	工业化率(%)				生态本底平均质量			
	长沙	岳麓区	芙蓉区	雨花区	长沙	岳麓区	芙蓉区	雨花区
2005	30.82	21.83	8.47	42.18	0.331	0.446	0.162	0.235
2006	32.62	34.89	10.47	42.27	0.328	0.438	0.161	0.233
2007	35.20	28.23	10.49	42.53	0.324	0.434	0.161	0.229
2008	43.70	39.58	11.34	42.53	0.318	0.429	0.160	0.221
2009	41.50	43.37	12.01	31.53	0.315	0.418	0.159	0.215
2010	44.42	50.19	12.27	31.10	0.311	0.412	0.159	0.210
2011	47.37	50.03	12.78	29.78	0.309	0.411	0.160	0.208
2012	47.67	51.03	13.28	28.97	0.309	0.408	0.162	0.207
2013	46.86	48.58	12.75	30.32	0.307	0.404	0.163	0.204
2014	45.67	45.94	11.10	29.56	0.304	0.401	0.163	0.202

表6 长沙部分区工业化率与生态本底质量绝对关联度

Tab.6 Absolute Correlation Degree between the
industrialization rate and the ecological background
quality

地区	长沙	岳麓区	芙蓉区	雨花区
代号	SX ₁	SX ₂	SX ₃	SX ₄
灰色绝对关联度	0.5023	0.6013	0.5081	0.4991

岳麓区是生态本底质量下降最严重的区域，是湘江新区的核心部分。由于长沙市湘江两岸发展的不均衡，客观上已形成了“东大西小”的空间形态和“东强西弱”的城市空间格局。长沙规划通过城市跨河西进，来扩展空间，疏解城市功能，最终实现一江两城的空间格局，河东河西协调发展。随着长沙市城市扩展重心逐渐西移，工业用地在河西地区的大量布局，湘江新区的城市化过程在较长的一段时间里将处于加速推进的阶段，未来岳麓区的整体生态格局将继续受到较大影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

第一，利用 CA—Markov 土地预测模型得出了 2020 年长沙城市生态本底要素分布图，虽然总体上中心城区形成了山水洲城的本底景观基质，但城中的绿地用地分布零散，缺乏系统联系，且分布不均。由于长株潭一体化、湘江新区等规划战略的影响，未来城市拓展方向以西、南

为主。第二，长沙市生态本底质量空间格局具有典型的圈层结构特征，且这种结构特征将经历“强一弱”的变化，轴向空间表现由“低一中一高一高”演化为“低一低一中一高”的梯度曲线结构。第三，热点区分布表现为聚集到分散，从边缘向外围的空间变异演化趋势，总体格局将从高值区连片、聚集，分异为破碎、均衡化，整体将更趋于稳定。第四，各向异性分析表明，不同方向上看，长沙市中心城区生态本底质量的斑块边界明显，过渡、变化与距离呈现出一定规律，这也是高强度的经济活动在城市生态系统空间分异上的综合反映。第五，通过关联度分析与绝对关联度分析，工业化率与生态本底质量变化的关联度最高（0.8412），且岳麓区生态本底质量与工业化率的绝对关联度最高（0.5813），说明随着岳麓区工业化率的快速提高，工业用地的增长已经对区域的生态本底质量产生很大的影响。

4.2 建议

基于本文对长沙市生态本底质量空间异质性演化及模拟研究，对未来长沙市城市建设与规划、生态空间保护提出以下建议：①控制城市过度蔓延，以减小对城市生态本底、生态系统造成的影响；严格控制城镇建设用地总规模，提高建设用地集中度；充分盘活中心城区存量建设用地的利用潜力，优先盘活闲置土地，激活低效土地，充分利用地下空间。②强化城市核心区绿地的建设，保护现有生态屏障、生态节点；严格保护组团之间的生态廊道，避免造成城市组团之间建成区粘连，可借鉴已有长株潭绿心规划，实现区域生态保护的“联防联控”：引J。对“城市生态交错带”实行弹性管控，保存其内部异质性、孔隙度，提升生态恢复力、生态安全以及生态价值。③湘江新区是全国第12个、中部第1个国家级新区，未来河西地区将成为城市建设的热点区。在工业用地大量向城市边缘区、外围区转移的同时，应该注意产业结构调整，工业用地布局优化，以及与城市绿地系统、产业体系的契合，防止生态本底质量的大幅下降。

4.3 讨论

本文中的生态本底质量评价体系构建虽然参考了大量的案例，但是因为资料和数据的不完善，对于生态本底质量的影响因子数量选取还有所缺乏。本文生态本底质量基本评价单元是300mX300m，对于空间变异的尺度依赖性特征研究还有待加深，应对不同栅格单元的影响结果，筛选最优研究尺度。在进行生态本底质量驱动因子关联度分析时，主要考虑的是经济因子对生态本底质量的影响，但是实际上驱动因子是复杂多样的。由于能力的有限，研究区域选择以长沙中心城区为主，对城市周边的外围区域包含较少，使得研究具有一定的局限。

参考文献:

- [1] Li H, Reynolds J F. On Definition and Quantification of Hetero-geneity [J]. Oikos, 1995, 73: 280 - 284.
- [2] Wu J G. Landscape Ecology-Pattern, Process, Scale And Hierar- chy[J]. Beijing : Higher Education Press, 2000, 13 : 121 - 123.
- [3] Forman R T T, Land Mosaics. The Ecology of Landscape and Regions[j]. Cambridge

University Press, 1995.

4 Richard T T Forman. Some General Principles of Landscape and Regional Ecology[j]. Landscape Ecology, 1995,10: 133 - 142.

[5]毕凌岚,黄光宇.对现行城市土地利用规划的生态反思[J].城市规划汇刊,2003,52(7): 52 - 58.

[6]毕凌岚.生态城市物质空间系统结构模式研究[D].重庆:重庆大学,2004.

[7]毕凌岚.城市生态系统空间规划[M].北京:建筑工业出版社, 2007.

[8]龚连周,夏北成,刘彦随.基于空-地统计学方法的广州市生态安全空间异质性研究[J].生态学报,2010,30(20):5626-5634.

[9]杜设,张刚,沈莉芳.成都市生态空间管控研究[J].城市规划, 2013,37(8):84 - 88.

[10] Wang Y C. The Models of Traditional Culture Landscape Conservation Based on Landscape Fragmentation Analysis: A Case Study of Zhibzhen in Zhejiang Province [j]. Geographical Research,2011,30(1): 10-22.

[11] Qiu J X, Wang X K, Lu F, Ouyang Z Y, Zheng H. The Spatial Pattern of Landscape Fragmentation and Its Relation with Urbanization and Socioeconomic Developments: A Case Study of Beijing [j]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2659-2669.

[12] Matthew L, Wu J G. A Gradient Analysis of Urban Landscape Pattern: A Case Study from the Phoenix Metropolitan Region, Arizona, USA[J]. Landscape Ecology ,2002,17:327 - 339.

[13]Philippe C, Jukka J, Robbert S. Using Hierarchical Levels for Urban Ecology [J]. Trends in Ecology and Evolution,2006,21 (12): 660-661.

[14] Wang G, Wu W. Assessment on Ecological Security Spatial Differences of West Areas of Liaohe River based on GIS [J]. Environmental Science,2005,26(5): 28 - 33.

[15] Wu J G, Jelinski D E,Luck M,et al. Multi Scale Analysis of Landscape Heterogeneity: Scale Variance and Pattern Metrics [J]. Geographic Information Science , 2000(61):6 - 19.

[16]Zhang L Q, Wu J P, Zhen Y, et al. A GIS-based Gradient Analysis of Urban Landscape Pattern of Shanghai Metropolitan Area, China [J]. Landscape And Urban Planning,2004,69(1): 1 - 16.

[17]Christopher H Y, Peter J J. Measuring Urban Habitat Fragmentation: An Example from the Black Country, UK[j]. Landscape Ecology, 2001, 16: 643 - 658.

[18]黄宝荣, 欧阳志云, 张慧智. 199~2005年北京城市生态质量动态[J]. 应川生态学报, 2008, 19(4): 545 - 552.

[19]王平, 马立平, 李开. 南京市城市生态环境质量评价体系[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 60 - 63.

[20]胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋. 城市化对流域生态系统服务价值空间异质性的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1715 - 1725.

[21]炳方, 孙卫东, 黄签. 中国西部典型区生态环境本底遥感调查 [J] •水土保持学报, 2004, 18(5): 46 - 51 •

[22]张显峰. 基于 CA 的城市扩展动态模拟与预测[J]. 中国科学院研究生院学报, 2000, 17(1): 70 - 79.

[23]杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32(5): 414-418.

[24]吴章, 吴楚材, 谭益民. 生态旅游区生态环境本底条件研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(5): 14 - 19.

[25]江振蓝, 沙晋明. 植被生态环境遥感本底值研究——以福州市为例[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(4): 80 - 85

[26]周兆叶, 王志伟, 九次力, 等. GIS 技术在生态环境状况评价 方面的应用[J]. 草业科学, 2009, 26(10): 52 - 58.

[27]Li H B, Wang Z, Wang O C. Theory and Methodology of Spatial Heterogeneity Quantification [j]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651 - 657.

[28]Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L D. Spatiotemporal variability of Soil Moisture in Small Catchment on Loess Plateau—semi- variograms [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 428 - 438.

[29]Wu J G. Landscape Ecology Pattern, Process, Scale and Hierarchical[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 11 - 13.

[30]李灿, 张凤荣, 朱泰峰. 大城市边缘区景观破碎化空间异质性以北京市顺义区为例[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 363 - 374.

[31]王到, 杨山. 多中心城区域城市蔓延冷热点格局及演化——以苏锡常地区 K 为例[J]. 经济地理, 2015, 35(7): 59 - 65.

[32]杨璐璐. 中部六省城镇化质量空间格局演变及驱动因素——基于地级及以上城市的分析[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 68- 75.

[33]王学萌, 聂宏声. 灰色系统模型在农村经济中的应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.

[34]王学萌. 灰色系统方法简明教程[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.

[35]刘思峰, 郭人榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[36]郝永红, 周海潮, 刘洁. 山西省宏观经济的灰色关联分析[J]. 经济地理, 2002, 22(3): 297 - 305.

[37]德力格尔, 袁家冬, 李媛媛. 长春市工业空间格局时空演变特征[J]. 经济地理, 2014, 34(11): 81-86.

[38]肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性生态学[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 453-461.

[39] Wang Yu Jie, Li Jun Xiang, Wu Jian Ping. Landscape Pattern Changes in Urbanization of Pudong New District, Shanghai [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 36 - 40.

[40]陈勇. K 域土地利用变化机制与调控研究——以湖北省大冶市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003

[41]蔡基. 基于景观生态学的城市空间格局演变规律分析与生态安全格局构建[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.