DOI: 10.5846/stxb201903260579

史芳宁,刘世梁,安毅,孙永秀,董世魁,武雪.城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究——以昆明市为例.生态学报,2020,40(10): 3303-3314.

Shi F N, Liu S L, An Y, Sun Y X, Dong S K, Wu X.Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: a case study of Kunming City.Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3303-3314.

城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究 ——以昆明市为例

史芳宁,刘世梁*,安 毅,孙永秀,董世魁,武 雪

北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875

摘要:城市化不仅改变景观类型和组成,也导致空间形态变化与自然生境连接度的降低,刻画不同城市化过程中人工表面、耕地 与自然生境的空间关系对于研究其景观生态效应,尤其是对不同景观之间的相互作用以及结构和功能的变化具有重要意义。 以云南省昆明市为研究区,分析了 1990—2015 年城市扩张导致的破碎化与形态变化对景观连接度的影响。利用城市破碎指数 (UFI)刻画景观破碎水平,进一步基于形态学空间格局分析(MSPA)得到耕地和自然生境的七类景观形态要素(核心、岛状斑 块、桥接、环岛、孔隙、边缘和支线),选取了 3 种边缘宽度比较边缘宽度对景观形态的影响差异,然后通过概率连接度指数(PC) 和斑块重要值(dPC)评估景观连接度的变化。在 4 km×4 km 的网格基础上计算平均 UFI 和 dPC,利用三维曲面分析不同变量 之间的相关性。结果表明:过去 25 年间,昆明市人工表面不断扩大,占用大量耕地并导致景观破碎度的增加,速率呈逐年增加 的趋势;MSPA 结果显示,耕地表现出持续稳定的消减,自然生境景观形态类型前期变化不大,2010 年后有较大幅度改变,表现 出从稳定、波动到破碎的过程,不同边缘宽度下存在显著差别,边缘宽度越大则连接度变化越为明显,表明城市化对小型绿色斑 块影响较大;斑块重要值与 UFI 的变化表现出一致性,变化集中于东部地区,随着 UFI 的增加景观连接度逐年降低;相关性分析 显示,随着破碎度的增加,景观连接度经历了从波动到稳定下降的过程。总体上,昆明市城市化造成耕地的持续减少,虽未造成 大面积自然生境丧失,但在一定程度上降低了连接度,需要从空间格局上加以管控,避免对整体景观连接度产生负面影响。 关键词;城市化;城市破碎指数;景观连接度;MSPA;昆明

Changes of landscape fragmentation and connectivity with urbanization: a case study of Kunming City

SHI Fangning, LIU Shiliang^{*}, AN Yi, SUN Yongxiu, DONG Shikui, WU Xue State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Urbanization can not only change the landscape types and composition, but also change the spatial morphology and decrease the natural habitat connectivity. Depicting the spatial relationship between artificial surface, arable land and natural habitat is of great significance to examine the landscape ecological effects, especially for the interaction between different landscapes and changes of structure and function. The effects of fragmentation and morphological changes on landscape connectivity with urban expansion of Kunming City, Yunnan Province in 1990—2015 were analyzed in this study by using the urban fragmentation index (UFI) to depict the level of landscape fragmentation. Based on morphological spatial pattern analysis (MSPA), seven landscape morphological elements (core, islet, bridge, loop, perforation, edge, and branch) of arable land and natural habitat were obtained. Three edge widths were selected to compare the influence of edge

基金项目:国家自然科学基金项目(41571173);国家重点研发计划项目(2016YFC0502103)

收稿日期:2019-03-26; 网络出版日期:2020-04-02

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shiliangliu@bnu.edu.cn

widths on the landscape morphology. The landscape connectivity changes were evaluated by probability of connectivity (PC) and importance value of patches (dPC). The average UFI and dPC were calculated on the grid of 4 km×4 km, and the correlation among different variables were analyzed by the three-dimensional curved surface graph. The results showed that the artificial surface in Kunming has been expanding, occupying a large amount of arable land. The annual increase rate of landscape fragmentation has been increasing in the past 25 years. The results of MSPA indicated that the arable land showed a continuous and stable declining trend, and the landscape morphology of natural habitat showed little change from 1990 to 2010. After 2010, there has been a dynamic process from stability to fluctuation and then to fragmentation. There were significant differences between different edge widths. The wider the edge width was, the more obvious the change of connectivity was. This fact indicated that urbanization had a more serious impact on small green patches. The change of dPC was consistent with that of the UFI, and the change was concentrated in the eastern region of Kunming. With the increase of the UFI, the landscape connectivity decreased year by year. The correlation analysis showed that the landscape connectivity experienced a process from fluctuation to steady decline with the increase of fragmentation. In general, the urbanization of Kunming has caused continuous reduction of arable land. Although the loss of large-scale natural habitat has not been caused by the urbanization, the connectivity has been reduced to a certain extent. It is necessary to control the spatial pattern to avoid the negative impact of the urbanization on the overall landscape connectivity.

Key Words: urbanization; urban fragmentation index; landscape connectivity; MSPA; Kunming

随着经济和社会的快速发展,城市化进程不断推进,致使景观空间形态发生变化,破碎化日益严重,进而 改变景观连接度^[1]。因此,高度破碎化不仅影响整体的景观格局,还可能对城市功能产生影响。自然生境的 连接度对生态过程起着至关重要的作用,它能够维持生物多样性和生态系统的健康完整,而耕地的连片度对 耕地质量和粮食产量都密切相关^[2],我国作为人口大国更应加以重视。因此,以景观破碎化和景观连接度为 指标,研究人工表面与耕地、自然生境的空间格局变化及耦合关系为合理规划土地利用、科学管理城市建设提 供了依据,并对促进城市的可持续发展具有重要意义。

过去对于城市化的一些研究都局限于城市本身的格局变化,忽略了周围受影响区域,及城市与周边生态 系统的空间交互关系的分析^[34],实际上,城市化对生态网络产生影响并导致破碎过程和土地占用^[5],从而对 栖息地和动植物群落产生直接或间接的影响^[6]。城市化造成的景观破碎程度可以通过城市破碎指数(UFI) 进行评估^[6-7],能够在景观单元尺度上反映人类活动对景观格局的影响程度。

景观连接度的概念由 Merriam^[8]于 1984 年首次引入景观生态学领域,被认为是描述景观单元之间相互联系和作用的一种测定指标。目前对连通性的认识已经达到较高水平,并提出了许多研究方法,例如电流理论^[9-10]、最小耗费距离法^[11-13]以及基于图论的景观指数法^[10,14-16]等,其中,基于图论理论的研究方法在近年来被广泛应用,通过更直观的方式反映景观破碎化程度、识别重要斑块^[17]。2011 年,Baranyi 等^[18]发现,在 13 个基于图论的常用景观连接度指数中,适用性最佳的是 IIC(整体连接度指数,integral index of connectivity)、PC(概率连接度指数,probability of connectivity)、BC(中介度,betweenness centrality)。这些指数在之后被广泛应用,但在取得一定成果的同时,也存在一些问题:如数据冗余,所得结果精确度不够,缺少空间分布信息^[19]等。

为更准确地从空间形态上描述斑块连通性功能,引入基于形态学空间格局分析方法^[20](morphological spatial pattern analysis, MSPA),不同于传统的景观连接度分析方法, MSPA 基于数学形态学的概念^[21],将二进制像素图像划分为表示特定几何特征的类别,例如大小、形状、连接性^[20,22],从像元层面上识别出具有重要连通性意义的区域,例如作为主要用地的核心区和维持景观连接度的桥接区^[23-24]。近年来, MSPA 被应用到绿色基础设施及生态网络的构建^[25-27],以及林地和湿地等自然生境连通性的研究中^[28-30],但是在耕地的研究中应用较少,而耕地的连片性和连通性对于区域生态环境也具有重要影响^[31-32],因此同时考虑自然生境和耕地

能够更好地反映景观的整体变化。

过去对于景观空间变化关系的研究,往往局限于两两变量之间,很难反映整体的空间变换关系,本次研究 以快速城市化的云南省昆明市为研究区,采用三维曲面图进行分析,不仅考虑景观破碎对耕地连片度和自然 生境连接度造成的直接影响,同时考虑3个变量之间由于各自变化而导致的间接影响。研究结果可对城市化 地区城市用地规划和生境保护提供依据和参考。本文旨在探讨以下问题:(1)分析城市化对昆明市景观破碎 度和景观连通性的影响;(2)景观连接度的变化如何响应景观破碎化;(3)在城市化进程下,人工表面、耕地与 自然生境的变化之间是否具有空间规律性。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

昆明市地处云贵高原中部,位于东经102°10′—103°40′,北纬24°23′—26°33′(图1),城市总面积2.10万km²,其中耕地面积44.9万hm²,林地面积102.6万hm²,南濒滇池,三面环山,中心海拔约1891m。昆明市以湖盆岩溶高原地貌形态为主,总体地势由北向南呈阶梯状逐渐降低,属北纬低纬度亚热带—高原山地季风气候,具有典型的温带气候特点,年平均气温15℃,年均降雨量1450 mm,因其气候宜人,生物种类繁多,被誉为"动植物王国"。作为云南省省会,昆明是云南省唯一的特大城市和西南地区(仅次于成都、重庆)第三大城市,昆明市是云南省政治、经济、文化、科技、交通中心,西部地区重要的中心城市和旅游、商贸城市。

近几十年来,昆明市城镇化水平显著提高,城市人口快速增多,城市综合实力持续增强,城市建设取得了 举世瞩目的成就。但空间布局混乱和无序发展现象依然存在,为了满足发展要求,大面积耕地被占用;随着城 市规模的不断扩大,城市化所带来的负面生态效应逐渐显露,景观格局以前所未有的速度发生着剧烈变化,城 市化发展进程面临巨大挑战。本研究针对城市化中心区作为研究区,主要包括五华区、盘龙区、官渡区、西山 区和呈贡区。



图 1 研究区位置与土地利用现状图 Fig.1 Location of the study area and land use

1.2 数据来源

本研究主要采用昆明市 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年 4 期的 TM 遥感影像数据及 1:25 万土地利用 图。基于 ENVI 软件,对影像进行包括辐射校正、几何校正等预处理,获得分辨率为 30 m 的土地利用数据。最后,利用 ArcGIS 软件,按研究区边界对影像进行裁剪。根据研究目的并参照土地利用分类方法,将土地利 用类型划分为人工表面、湿地、耕地、草地、林地和裸地 6 种景观组分类型。结合实地调研数据及 Google Earth

进行解译精度检验,解译精度达到90%,满足研究区景观分析精度要求。

2 研究方法

2.1 城市破碎指数(UFI)

城市化的速度和形态都会造成景观破碎化,综合考虑两个因素的变化能更准确的评价景观格局的改变, 根据 Romano 和 Zullo, UFI 遵循以下等式:

UFI =
$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}{A} \times \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i}{2\sqrt{\pi \sum_{i=1}^{i=n} S_i}}$$

式中,*S_i*为第*i*个城市区域的面积(m²);*p_i*为第*i*个城市区域的周长(m);*A*为领土面积(m²)。公式的第一项 量化了城市的土地利用率;第二项表示城市地区边界与等效圆的周长之比。将此公式用于定量评价人工表面 所造成的景观破碎程度,值越大表明破碎程度越高。

为更直观地体现景观的动态变化,计算第 n 年到第 m 年 UFI 的变化率,根据以下公式:

$$\Delta \mathrm{UFI}_{m-n}(\%) = \frac{\mathrm{UFI}_m - \mathrm{UFI}_n}{\mathrm{UFI}_n} \times 100$$

本次研究利用 ArcGIS 软件中的"Create Fishnet"工具建立 4 km×4 km 的渔网网格,计算包括景观整体及 每个网格中的 UFI 值,评价景观破碎的空间和时间上的差异和变化规律。

2.2 基于 MSPA 的景观分类

为了更清晰地呈现景观变化,从土地利用类型中提 取出受城市化影响较大的耕地和自然生境,自然生境包 括自然和半自然林地与草地。利用重分类的土地利用 图,将自然生境和耕地作为前景,其他用地类型作为背 景,后采用8邻域算法进行分析,将前景像素分为七类 互不重叠的要素,如图2所示。在 MSPA 分析中,不同 边缘宽度的设置会对整个斑块的面积和形态产生较大 影响,斑块边缘区域由于受到相邻斑块和周围环境的影 响,通常具有较高的物种丰富度,尤其对一些生境敏感 物种而言,边缘区域的变化与其生存繁衍密切相关。边 缘宽度的增加能够在不改变景观格局的情况下观察到



Fig.2 MSPA structural categories^[20]

缘宽度的增加能够在不改变景观格局的情况下观察到 MSPA:形态学空间格局分析 Morphological spatial pattern analysis 更明显的变化^[26],为比较不同边缘宽度对斑块内部及

斑块间连接度的影响,筛选出适宜的边缘宽度进行景观连接度的分析,同时考虑到不同前景的面积差异,选取 1、5、10 三种边缘宽度对自然生境进行分析,分别对应 30、150、300 m 的实际距离,耕地选取 1、5 两种边缘宽 度。最后根据景观类型的特征及其含义,识别出对研究区自然生境和耕地具有重要连通意义的核心区和桥接 区两类景观要素,进一步研究其在景观连接度中的作用。

2.3 景观连接度

2.3.1 概率连接度指数(PC)

测量连通性的方法采用概率连接度指数(PC),计算公式如下:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} p_{ij} \times a_i \times a_j}{A_L^2}$$

式中,n 为景观中斑块数量, a_i 和 a_i 分别表示斑块i和j的面积, A_i 为景观总面积, p_i 表示斑块i和j之间所有路

3307

径中的最大连接概率。

利用 Conefor 2.6 软件,将距离阈值设置为 1500 m,连通概率设置为 0.5。PC 的值介于 0 到 1 之间,值越 大表明斑块之间连通的可能性越大。在 MSPA 分析所得的 7 个景观类型中,只有核心和桥接与图论理论相 关,其中核心对应于节点,桥接对应于节点之间的链接^[33],因此,采用核心区和桥接区的 PC 值可以评估每个 单独的景观元素在潜在合适生境中保持连通的重要性。

2.3.2 斑块重要值(dPC)

每个斑块维持景观整体连接度的能力不同,为评价不同斑块的重要程度,选用斑块重要值(dPC),在整体概率连接度的基础上分析每个斑块的贡献,算式如下:

$$dPC_k = \frac{PC - PC_{\text{remove},k}}{PC} \times 100\%$$

式中,PC_{remove,k}指除去第 k 个斑块后,景观概率连接度的值。本文将斑块重要值按照自然断点法进行分级,自 然生境核心区分为 5 级:极高(*dPC*>20),高(10<*dPC*<20),中等(5<*dPC*<10),低(1<*dPC*<5,),极低(*dPC*< 1);耕地核心区同样分为 5 级:极高(*dPC*>10),高(5<*dPC*<10),中等(1.5<*dPC*<5),低(0.5<*dPC*<1.5),极低 (*dPC*<0.5);桥接区分为 3 级:高、中等、低,不同边缘宽度桥接区的 dPC 值有所不同。依据核心区和桥接区斑 块重要值的比值赋权重,同样计算每个渔网网格的平均斑块重要性来表征连接度。

依据网格数据,构建景观破碎度与耕地、自然生境连接度之间的三维曲面图,该步骤由 SigmaPlot 软件实现,描述 3 个变量之间随时间的空间变化及交互关系。

3 结果分析

3.1 城市化对景观破碎度的影响分析

图 3 是研究区 1990、2000、2010、2015 年 4 期的土地利用变化。1990 年和 2015 年相比,昆明市人工表面 的面积迅速增加,占用大量耕地,人工表面与耕地过渡地区景观变化剧烈,自然生境面积变化不明显。因此, 快速城市化会导致原有的景观格局发生变化,从而对自然生境和生态过程产生直接或间接的影响。



进行转移矩阵分析并利用网络图表达(图4),数据表明,在1990—2000年,耕地变化最为剧烈,有12.63% 流入人工表面,5.67%流入自然生境,同时有7.38%的人工表面转化为耕地;2000—2010年,四种土地利用类型均或多或少地流入自然生境和人工表面,另外有2.5%的自然生境和1.82%的人工表面转化为耕地;2010—2015年,转化强度有所减缓,但仍有2.2%的自然生境和8.01%的耕地流入人工表面。可以看出在人工表面大范围扩张的情况下,土地利用受到较大的影响,尤其在2010年前后干扰和破坏最为剧烈,这与昆明市近几十年的城市化发展密切相关。

城市化对研究区景观格局产生了显著影响,通过计算 UFI 指数可知(表1),研究区整体 UFI 值逐年增加,



景观趋于破碎。在 2010—2015 五年的时间内变化速率加快, UFI 指数比 2000 年增加了近一倍。

图 4 1990-2015 年昆明市 4 种土地利用动态转化

Fig.4 The dynamic transformation of 4 categories of land uses in Kunming City from 1990 to 2015

表1 1990—2015 昆明市整体 UFI 指数

Table 1	Overall UFI	of Kunming	City from	1990 to 2	2015
I able I	overan err	or ixummig	city nom	1//0 10 1	-010

年份 Year	城市破碎指数 Urban fragmentation index, UFI	平均城市破碎指数 ΔUFI	年份 Year	城市破碎指数 Urban fragmentation index, UFI	平均城市破碎指数 ΔUFI
1990	3.33	—	2010	5.89	34.93%
2000	4.37	31.08%	2015	8.20	39.20%

进一步网格分析表明(图 5),景观破碎化较为严重的是城市中心部分,人工表面附近的 UFI 值较高,说明 城市化确实对于景观破碎程度产生明显影响,随着人工表面的蔓延,景观破碎度也在逐年增加。总体来看,破 碎度呈现出逐年向东北方向蔓延的趋势,这主要是受机场等交通枢纽建设的影响,该地区成为人流、物流、资 金流的重要集散地,无论是经济还是人文自然方面都有很大的发展空间。

3.2 基于 MSPA 的自然生境和耕地景观格局分析

单从土地利用情况来看,自然和半自然的林草地面积几乎没有受到影响。但景观格局的改变必然会影响 自然生境的整体情况,利用 MSPA 得到自然生境和耕地景观类型的变化(图 6 和图 7)及相关数据统计图

3309



图 5 1990—2015 年昆明市 UFI 空间分布 Fig.5 Spatial distribution of UFI in Kunming City from 1990 to 2015

UFI:城市破碎指数 Urban fragmentation index



图 6 1990—2015 年昆明市自然生境 MSPA 类型分布图 Fig.6 MSPA classes distribution maps of natural habitat in Kunming City from 1990 to 2015 MSPA: 形态学空间格局分析方法 Morphological spatial pattern analysis

(图 8和图 9)。

自然生境核心区主要分布在研究区周边,西部空间连通性较好,东部核心区较西部分散,数量少且面积 小,随时间变化不大;桥接区多分布在东部,与人工表面的扩张呈现出一致性,表明其对维持景观连通性起到 了重要作用;耕地大面积斑块主要分布在研究区中部和东南部,随着近几十年的城市化发展,核心区面积大幅 度缩小且趋于破碎化。



图 7 1990—2015 年昆明市耕地 MSPA 类型分布图

Fig.7 MSPA classes distribution maps of arable land of Kunming City from 1990 to 2015



图 8 1990—2015 年昆明市耕地 MSPA 数据统计图 Fig.8 MSPA Statistical charts of arable land in Kunming City from 1990 to 2015

不同边缘宽度对斑块的形态有很大影响。随着边缘宽度的增加,核心区面积迅速减小,更多的非核心区 域被识别,尤其是面积较小的斑块,几乎甚至全部被非核心区占据。从图 6 中可以看出,自然生境中桥接和环 岛的面积明显增加,其在景观中都起到连接的作用,表明边缘区域的变化无论是在斑块周边还是斑块内部,都 会对景观连通性造成较大影响;耕地景观类型变化幅度更为明显(图 7),由于其分布在人工表面周围,受城市 化影响更大,其核心区的减少速率明显快于非核心区的增加速率,斑块面积和连通性都出现较大变化。

总体来看,人工表面的扩张对面积较小的自然生境斑块有影响,大面积集中连片地区仍可以保持一定的 面积,但边缘宽度分析表明,外界作用即使不会造成斑块面积的变化,但在一定程度上影响生境边缘地区,从 而改变景观的内部结构,降低其连接度和稳定性;耕地的分布特点使其对周围环境的变化更为敏感,受到城市 化较为强烈且持续的破坏,几乎失去大面积的连片性斑块。

图 8 是耕地七种景观类型占前景比例以及核心和边缘频率统计数据,结果显示,核心面积占比在 25 年间减少了 12.44%,但其频率在逐年增加,表明较大面积的耕地破碎为小面积的斑块;边缘和孔隙在耕地中可以





看作与其他景观类型的过渡,在1990—2015年间,边缘占前景比例增加了11.05%,同时频率也呈增长趋势, 核心区大部分转化为边缘区,孔隙作为内部过渡区随着核心面积的减少而减少,且2015年其数量比1990年 减少了一半还要多;支线和桥接在耕地中不同于自然景观的连通作用,在本研究区内更多的是类似于岛状斑 块,这类景观类型的持续增加表明,耕地连片度减小,耕地大面积丧失,耕地质量受到影响。

分析图 9 可以看出,自然生境面积占比最大的是核心区,其次是边缘区和桥接区,在 4 个时期内七种景观 类型整体上没有大幅度变化。核心区面积在 2000 年达到最低后反呈上升趋势,其频率变化呈现出相反的下 降趋势,说明核心区分布在后期更加集中;1990—2015 年间,自然生境边缘区面积呈波动变化,整体呈上升趋 势,频率逐年降低且速率逐渐加快,表明自然生境与周围环境交互作用加强,且在 2010—2015 年间最为频繁; 桥接和环岛在维持自然生境连接度方面起到重要作用,图中可以看出这 2 种景观类型面积整体呈下降趋势, 桥接区频率前期减小,但在 2010 年出现转折,环岛频率也在 2010 年后出现较大幅度的下降,说明在 2010 年 后景观连接度发生较大改变。

3.3 景观连接度分析

林地边缘宽度较大会将部分核心区识别为桥接区,造成桥接区冗余,而耕地边缘宽度过小导致核心区较为琐碎,无法识别面积较大的斑块,因此采用边缘宽度为5进行景观连接度的评价最为合适。图 10、图 11 为核心区和桥接区的斑块重要值分级,可以看出自然生境较重要的核心区集中分布在研究区的北部,东部和西南地区的核心区较为分散且重要值相对较低,桥接区集中分布在核心区周围,并且在东部和西南地区的重要





http://www.ecologica.cn

性相对较高,表明其在景观连接度较差的地区起到重要作用,2015年与1990年相比,自然生境东部核心区斑块重要值持续下降,西部核心区虽保持较好的重要值,但出现了重要性极低的小型斑块,桥接区也在逐年减少。

耕地核心区大多分布在东南地区,周围密集分布着大量桥接,整体斑块数量多且面积小,近25年间,无论 是核心区还是桥接区面积都呈现出明显的减少趋势,到2015年重要核心区斑块几乎消失,桥接等小型斑块重 要值下降明显,景观高度破碎化,耕地连片度急剧下降,耕地质量严重恶化。



Fig.11 Important patches distribution of arable land in Kunming City from 1990 to 2015

3.4 相关性分析

分析城市破碎指数、耕地和自然生境的平均概率连接度指数之间的变化关系(图12)可知,1990年图像 大部分分布在同一水平面上,表明随着 UFI 的增加,整体景观连接度没有大幅度变化,自然生境几乎不受城市 化影响,但耕地斑块重要值变化出现较小幅度的波动;2000年与1990年类似,三者之间没有表现出明显的相 关性,但自然生境连接度开始出现波动,耕地斑块重要值变化更加显著,连接度随破碎度的增加表现出降低的 趋势,表明随着城市化的进一步发展,人工表面扩张造成的破碎化不仅加剧了对耕地的破坏,也已经开始对自 然生境连接度产生影响;2010年三者关系发生显著变化,主要是由于耕地和自然生境之间的相互作用增强, 表明在此阶段,耕地面积的丧失不仅受到人工表明的影响,也与自然生境的变化有关,同时 UFI 增加导致耕地 和自然生境连接度出现规律性的增加和减少,连接度趋于集中;到 2015年,景观连接度与景观破碎度呈明显 的负相关性。整体来看,耕地和自然生境的平均概率连接度指数数值范围逐年缩小,说明其受影响的程度不 断加强。

4 结论与讨论

4.1 结论

形态学空间格局分析方法和连接度方法结合,有针对性地对重要的景观类型进行连接度分析,很大程度 上使数据精简化,并且能得到空间分布信息,更直观地反映景观格局的变化。研究结果表明:

(1)近 25 年昆明市城市化发展迅速,表现为人工表面大范围扩张,侵占大面积耕地。UFI 指数表明,城市 化对景观破碎影响显著,城市整体有向东部蔓延的趋势。

(2)基于 MSPA 方法,通过分析面积比例较大的核心、桥接、边缘和环岛,自然生境整体格局经历了稳定、 波动到破碎的过程,以 2010 年为转折点,自然生境与周围环境的相互作用更为密切;耕地在 1990—2015 年间 持续消退,耕地连片度下降,耕地质量遭到破坏。

(3) 斑块重要值变化结合 UFI 可以看出,景观格局的变化主要集中于东部的官渡区、盘龙区和呈贡区,景观连接度与城市造成的景观破碎变化表现出一定程度的响应。



图 12 1990—2015 年昆明市 UFI 与耕地、自然生境连接度关系变化

Fig.12 Trends of the relationships between UFI, connectivity of arable land and connectivity of natural habitat in Kunming City from 1990 to 2015

(4)借助三维曲面图表明 3 种变量之间的相互关系,结果显示随着城市化发展,1990—2000 年间耕地受到主要影响,自然生境处于相对稳定的阶段;以 2010 年为节点,人工表面向外扩张的影响增大,同时耕地和自然生境连接度处于此消彼长的波动阶段,到 2015 年,景观整体连接度随着景观破碎度的增加而下降。

4.2 讨论

随着城市化的发展,必然会对整体的景观格局和生态环境产生直接或间接的影响,城市与周边环境无论 在物质交换还是空间的关系都较为复杂。对于不同土地空间利用类型,城市化所造成的景观破碎的影响强度 有明显差别,通常与城市活动交互密切的区域更易受到破坏。通过刻画人工表面、耕地与自然生境的空间关 系,发现城市破碎度与整体景观连接度之间确实存在着一定的负相关关系,并且这种负相关随着城市化的进 程不断增强:在发展初期景观格局由于整体结构性能够维持其稳定的状态,随着城市的进一步发展,景观破碎 化已经不仅仅局限于改变不同景观的形态,而是进一步影响景观内部环境,最终导致景观结构和功能的变化。 这就表明景观格局以及内部相互关系的变化是一个动态过程,不能单纯地分析景观破碎度和连接度,更重要 的是要结合具体的时间和空间变化。因此,在昆明市城市空间管理和规划中,要根据城市化的不同发展阶段 采取相应的措施,不仅要协调土地利用矛盾,更要优化内部结构,特别是对耕地质量的改善;对于较为发达的 官渡区、盘龙区和呈贡区,可以重点发展社会经济,同时对于自然生境集中的地区,尤其是生境边缘地区和廊 道要加强保护,从而达到自然、社会和经济的平衡,有利于城市的优化和可持续发展。

参考文献(References):

[1] 吴昌广,周志翔,王鹏程,肖文发,滕明君.景观连接度的概念、度量及其应用.生态学报,2010,30(7):1903-1910.

[2] 陈显光,张强胜, 缑武龙. 基于耕地质量的基本农田空间连片性评价. 广东农业科学, 2015, 42(23): 159-163.

- [3] 刘小平,黎夏,陈逸敏,秦雁,李少英,陈明辉.景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. 地理学报, 2009, 64(12): 1430-1438.
- [4] 潘竟虎, 戴维丽. 1990-2010年中国主要城市空间形态变化特征. 经济地理, 2015, 35(1): 44-52.
- [5] De Montis A. Measuring the performance of planning: the conformance of Italian landscape planning practices with the European Landscape Convention. European Planning Studies, 2016, 24(9): 1727-1745.
- [6] Garcia D A, Bruschi D, Cinquepalmi F, Cumo F. An estimation of urban fragmentation of natural habitats: case studies of the 24 italian national parks. Chemical Engineering Transactions, 2013, 32: 49-54.
- [7] De Montis A, Martín B, Ortega E, Ledda A, Serra V. Landscape fragmentation in Mediterranean Europe: a comparative approach. Land Use Policy, 2017, 64: 83-94.
- [8] Merriam G. Connectivity: a Fundamental ecological characteristic of landscape pattern//Brandt J, Agger P, eds. Methodology in Landscape Ecological Research and Planning. Denmark: Roskilde University Center, Denmark, 1984: 5-15.
- [9] Koen E L, Bowman J, Sadowski C, Walpole A A. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 626-633.
- [10] 安毅, 刘世梁, 侯笑云, 成方妍, 赵爽, 武雪. 人类活动的景观生态响应——以个旧市为例. 生态学报, 2018, 38(24): 8861-8872.
- [11] Watts K, Handley P. Developing a functional connectivity indicator to detect change in fragmented landscapes. Ecological Indicators, 2010, 10 (2): 552-557.
- [12] 吴昌广,周志翔,王鹏程,肖文发,滕明君,彭丽.基于最小费用模型的景观连接度评价.应用生态学报,2009,20(8):2042-2048.
- [13] 张宇,李丽,吴巩胜,周跃,覃顺萍,王小明.基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析.生态学报,2016,36(1):51-58.
- [14] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2/3): 91-103.
- [15] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(1): 135-139.
- [16] 熊春妮,魏虹,兰明娟.重庆市都市区绿地景观的连通性.生态学报,2008,28(5):2237-2244.
- [17] 富伟,刘世梁,崔保山,张兆苓.景观生态学中生态连接度研究进展.生态学报, 2009, 29(11): 6174-6182.
- [18] Baranyi G, Saura S, Podani J, Jordán F. Contribution of habitat patches to network connectivity: redundancy and uniqueness of topological indices. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1301-1310.
- [19] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 高云, 姚思瑶. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究. 生态学报, 2015, 35(2): 526-536.
- [20] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(4): 456-459.
- [21] Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd ed. Berlin: Springer-Verilog, 2003.
- [22] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, Estreguil C, Kozak J, Soille P. Mapping landscape corridors. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 481-488.
- [23] Ostapowicz K, Vogt P, Riitters K H, Kozak J, Estreguil C. Impact of scale on morphological spatial pattern of forest. Landscape Ecology, 2008, 23 (9): 1107-1117.
- [24] Vogt P, Ferrari J R, Lookingbill T R, Gardner R H, Riitters K H, Ostapowicz K. Mapping functional connectivity. Ecological Indicators, 2009, 9 (1): 64-71.
- [25] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [26] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 王晶晶, 徐文彬. 南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2119-2127.
- [27] Kang S J, Kim J O. Morphological analysis of green infrastructure in the Seoul metropolitan area, South Korea. Landscape and Ecological Engineering, 2015, 11(2): 259-268.
- [28] Velázquez J, Gutiérrez J, Hernando A, García-Abril A. Evaluating landscape connectivity in fragmented habitats: cantabrian capercaillie (*Tetrao urogallus cantabricus*) in northern Spain. Forest Ecology and Management, 2017, 389; 59-67.
- [29] Hernando A, Velúzquez J, Valbuena R, Legrand M, García-Abril A. Influence of the resolution of forest cover maps in evaluating fragmentation and connectivity to assess habitat conservation status. Ecological Indicators, 2017, 79: 295-302.
- [30] 张梦嫚, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, 38(12): 4205-4213.
- [31] 赵其国,周生路,吴绍华,任奎.中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策.土壤学报,2006,43(4):662-672.
- [32] 曹丽萍, 罗志军, 冉凤维, 骈奇星, 蔡正妹, 赵越, 赵杰. 基于耕地质量和空间集聚格局的县域基本农田划定. 水土保持研究, 2018, 25 (4): 349-355, 364-364.
- [33] Saura S, Vogt P, Velázquez J, Hernando A, Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2): 150-160.