

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 06. 017

基于 CA-Markov 模型的贵阳市花溪区 景观格局预测及优化^{*}

贾语非, 王秀荣

(贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为优化贵阳市花溪区的景观格局, 以 2008—2018 年的花溪区景观为研究对象, 采用 CA-Markov 模型对花溪区未来景观格局进行预测, 并使用最小累积阻力模型及热点分析, 对区域景观格局进行优化。结果表明: (1) 花溪区景观类型主要由乔灌地及耕地构成, 2008—2018 年间, 区域建设用地扩张迅速, 景观斑块数量及破碎化程度不断上升, 其它景观基数较少。其中草地占比稳步升高, 裸地占比总体下降, 水体景观的变化则相对平稳。(2) 预测模型显示, 2018—2028 年花溪区建设用地面积仍呈快速扩张趋势, 新增建设用地主要集中在高程较低, 坡度较缓, 并已具备一定建设强度的区域, 耕地及乔灌地面积呈下降趋势, 草地及裸地面积呈上升趋势, 水体面积相对稳定; (3) 花溪区景观生态廊道主要分布在山脚山谷线、河流河岸带、大面积林带以及农林交错带等区域。而景观生态廊道主要分布在林带与水系两类景观自身或相互之间的交汇处及林带或水域与建设用地的交汇处。最终以景观生态核心区、景观生态维持区、景观生态恢复区以及景观生态提升区定义并划分出花溪区景观生态优化分区。

关键词: 花溪区; 城市景观格局; CA-Markov 模型; 最小累积阻力模型; 热点分析

中图分类号: Q 149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 06-0118-10

Prediction and Optimization of Landscape Pattern in Huaxi District of Guiyang City based on CA-Markov Model

JIA Yu-fei, WANG Xiu-rong

(College of Forestry in Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China)

Abstract: By taking Huaxi District in 2008—2018 as the research object, the future landscape pattern of Huaxi District was predicted based on CA-Markov model, and the regional landscape pattern was optimized using the minimum cumulative resistance model and the Getis-Ord Gi Analysis. The results showed that: (1) The landscape type of Huaxi District is mainly composed of arbor irrigation land and cultivated land. During 2008—2018, the construction land expanded rapidly, the number of landscape patches and the degree of fragmentation increased continuously, and other landscape bases were less, among which the proportion of grassland increased steadily, the proportion of bare land decreased generally, and the change of water landscape was relatively stable; (2) The prediction results showed that the construction land area of Huaxi District will expand rapidly from 2018 to 2028, and the newly increased construction land will be mainly concentrated in the area with low elevation and gentle slope, and has a certain construction intensity. The cultivated land and shrub land area will decline, the grassland and bare land area will rise, and the water area will be relatively stable; (3) According to the surface of consumption distance, the landscape eco-

^{*} 收稿日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760228) 资助。

第一作者简介: 贾语非 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事地景规划与生态修复研究。E-mail: jyf881986@163.com

通信作者简介: 王秀荣 (1972—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事景观规划与生态修复研究。E-mail: wxr7211@126.com

logical corridor in Huaxi District is mainly distributed in the valley line at the foot of the mountain, river bank zone, large-area forest belt and agricultural and forestry ecotone, while the landscape ecological corridor is mainly distributed in the intersection of forest belt and water system, and the intersection of forest belt or water area and construction land. The landscape ecological core area and landscape ecological maintenance area, landscape ecological restoration area and landscape ecological promotion area are defined and divided into Huaxi District landscape ecological optimization zone.

Key words: urban landscape pattern; CA-Markov model; minimum cumulative resistance model; Getis-Ord Gi Analysis; Huaxi District

在全球城镇化进程不断加快的大背景下，人类活动对各类生态系统影响愈发强烈，城市生态系统退化等问题不断凸显^[1]，而传统的土地资源优化常以经济效益的最大化为主要目标，忽略了城市发展对景观格局—过程产生的影响^[2]，由此引起的区域生态系统及其响应机制的变化，已成为生态学科关注的重要课题^[3-5]。本研究以国家级生态示范区及首批国家全域旅游示范区花溪区为对象，研究其城市景观格局变化。2008—2018年间，花溪城镇化进程迅速，景观格局演变剧烈，城市景观格局的预测模拟及合理优化势在必行。

随着相关研究方法的不断发展，CA-Markov 模型开始应用于土地变化的预测工作中，相比传统基于 GIS 及 Excel 等工具进行的预测，其能够支持多因素多目标、结果能够直观成图，便于有针对性的分析。而首先应用于物种保护等领域^[6-7]，能够反映生态流连通度变化、识别生态节点、揭示景观格局与生态过程间相互作用的最小累积阻力模型 (minimum cumulative resistance) 也被提出^[8-9]，并逐步应用于土地利用规划、景观格局优化、生态区划等领域当中^[10]。因此，使用上述方法对花溪区景观格局进行科学预测及合理优化，对提升花溪区生态环境质量、维持区域生态功能、保证土地可持续利用的意义重大。

1 研究区概况

1.1 地理区位及自然条件

花溪区 (106°27'~106°52'E, 26°11'~26°34'N, 海拔 1 014~1 762 m) 地处黔中腹地，位于贵阳主城区南部，下辖 2 镇 7 乡，共 18 个社区，东邻黔南龙里县，西接贵安新区，南连黔南惠水、长顺县，北接南明区、观山湖区，国土面积 964.14 km²；花溪区整体地貌以山地及丘陵为主，森林覆盖率 41.53%，区内有 2 座大型水库以及大小河流 51 条，

具有高原型季风湿润气候特征，冬无严寒，夏无酷暑，湿度较大，雨量充沛，年平均气温 14.9℃，年平均降水量 1 178.3 mm，空气质量优良天数达 341 d。

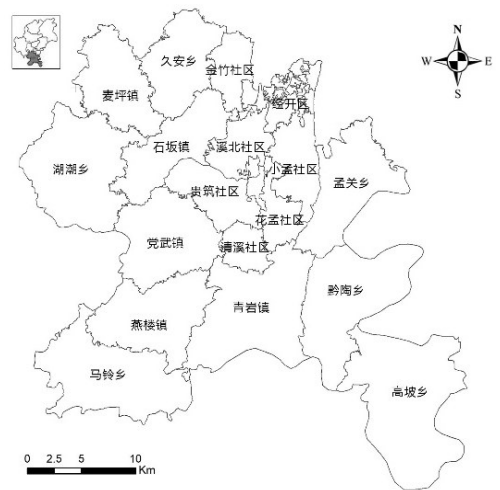


图 1 花溪区行政区划图

Fig. 1 Administrative map of Huaxi

1.2 人口及社会发展概况

根据 2018 年人口抽样调查数据，花溪区常住人口数约 67.74×10⁴ 人，包括汉、苗、布依等 38 个民族，其中少数民族人口比例约为 33%；近年来，花溪区经济总体增长率保持在 12% 左右，其中第一产业增长率维持在 6% 左右，农业经济占比不断降低，2018 全年生产总值达 640.5×10⁸ 元；截至 2014 年，全区城市建设用地扩张至 126.58 km²，占区域面积的 13.13%，高速城镇化进程导致花溪土地利用类型快速演变，景观格局也随之快速变化。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究的数据来源包括贵阳市花溪区 2008 年、2013 年、2018 年 3 个时间梯度，精度为 0.5 m 的 Landsat TM 高精度遥感影像，以及花溪区 2018 年

DEM 高程影像及道路矢量数据, 在 ArcMap 10.2 中, 依据中国科学院地理资源科学研究所(中国科学院资源环境科学中心)提出的中国陆地生态系统类型划分标准^[11], 结合区域实际情况及研究需要, 通过目视解译将花溪区景观类型划分为乔灌地、耕地、草地、水体、裸地、在建用地及已建成用地等 7 类, 并进一步搜集了《贵阳市城市总体规划(2011—2020)》(2017 年修订)以及《花溪区土地利用总体规划(2006—2020)调整方案》等与研究区相关的社会经济及政策资料。

2.2 研究方法

2.2.1 景观格局的预测

基于花溪区 2018 年 DEM 高程影像, 通过 ArcMap 10.2 生成高程栅格影像图, 并以此为基础生

成坡度分布图, 将上述图像及 2008、2013、2018 年 3 期划分完成后的景观类型图统一投影转化成为 30 m×30 m 的栅格数据, 并最终输出为 ASC II 文件并导入 Idrisi, 再通过其中的 RasterVector 工具将道路矢量数据转化为栅格数据, 使用 2008 年及 2013 年景观类型图构建花溪区景观转移概率矩阵, 并使用高程、坡度及道路数据构建景观类型变化的适宜性图集。完成以上步骤后, 使用 CA-Markov 模型对 2018 年花溪区景观格局动态变化趋势进行预测, 生成 2018 年的花溪区景观空间分布预测图, 并将所得的 2018 年花溪区景观空间分布预测图与 2018 年实际景观空间分布图在 Idrisi 中的 CrossTab 模块中进行相似度 Kappa 检验, 若所得 kappa 系数大于 0.75, 则认为该模拟的准确度较好^[12]。

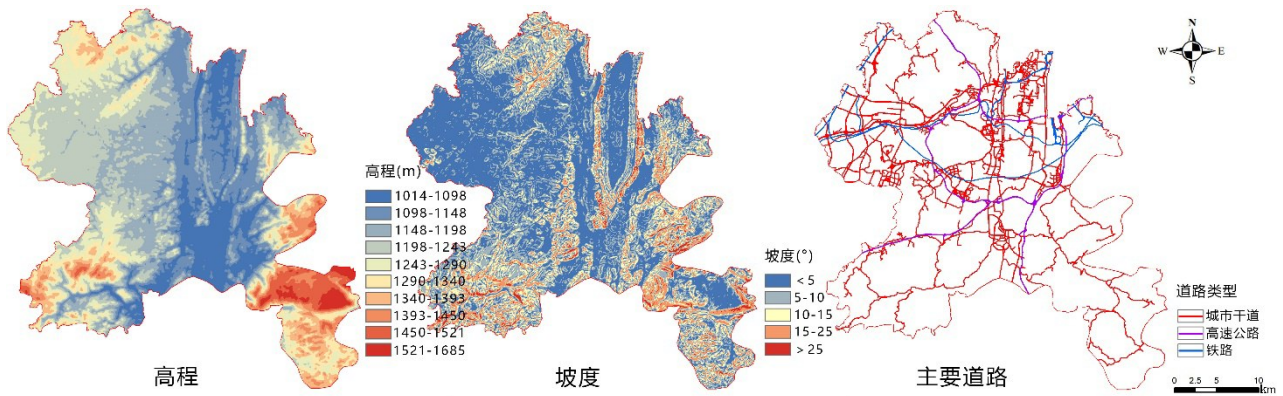


图 2 花溪区高程、坡度及道路分布图

Fig. 2 Altitude, slope and road spatial distribution map in Huaxi

2.2.2 景观生态服务价值的确定

生态系统服务功能是衡量区域生态功能的重要指标, 而生态系统服务功能的价值能够将其量化, 本研究基于前人研究成果^[13-14], 确定研究区生态系统中各景观的各类生态服务价值(表 1)。并基

于 2018 年景观类型空间分布情况, 使用网格分析法, 使用 1 km×1 km 的空间网格将研究区域划分为 1 138 个景观生态服务价值小区, 并计算每个小区内的单位生态服务价值, 经 Kriging 插值分析后得到生态服务价值空间分布图。

表 1 花溪区单位面积生态系统服务价值

Tab. 1 Ecosystem service value unit area in Huaxi

生态功能	乔灌地	草地	耕地	建设用地	水体	裸地
气体调节	3 097.0	707.9	442.4	0.0	0.0	0.0
气候调节	2 389.1	796.4	787.5	0.0	407.0	0.0
水源涵养	2 831.5	707.9	530.9	26.5	18 033.2	26.5
土壤形成与保护	3 450.9	1 725.5	1 291.9	17.7	8.8	17.7
废物处理	1 159.2	1 159.2	1 451.2	8.8	16 086.6	8.8
生物多样性保护	2 884.6	964.5	628.2	300.8	2 203.3	300.8
食物生产	88.5	265.5	884.9	8.8	88.5	8.8
原材料	2 300.6	44.2	88.5	0.0	8.8	0.0
娱乐文化	1 132.6	35.4	8.8	8.8	3 840.2	8.8
总计	19 334.0	6 406.5	6 114.0	371.4	40 676.4	371.4

元/hm²

2.2.3 最小累积阻力模型

景观生态学科认为，各类景观均具有一定的生态阻力。理论上说，某景观的生态服务价值越高，表明该景观的整体生态功能越完善，生态流在其中的运行就越顺畅，生态阻力值越低。参考相关研究^[15-18]及区域景观分布现状，得到花溪区各类景观生态阻力值（表2）。基于此，依据源、距离和阻力值三方面的因素^[19-20]，通过构建累积阻力模型得到花溪区耗费距离表面图，以此反映生态源在空间上的运动趋势，其基本公式为：

$$MCR = f \min_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中： MCR 表示最小累积阻力； f 是空间中任一点与景观基面的正相关函数； D_{ij} 表示从生态源地 j 到景观单元 i 的空间距离； R_i 表示景观单元 i 的生态阻力值。

表2 花溪区各类景观的生态阻力值

Tab.2 Ecological resistance value of each landscapes in Huaxi

景观类型	单位面积生态服务价值/元·hm ⁻²	生态阻力值
乔灌地	19 334.0	20
在建用地	371.4	100
已建成用地	371.4	100
水体	40 676.4	1
草地	6 406.5	70
耕地	6 114.0	55
裸地	371.4	80

2.2.4 生态源地的选取及耗费距离表面的构建

根据我国生态学家陈立顶、傅伯杰等引述的“源—汇”理论模型，其中的“源”景观具有维持生态系统功能，促进生态过程的作用，并且具有一定的空间连续性及扩展性，是区域生态流的主要来源^[21]。依据上述理论及各类景观的生态服务价值，以花溪区2018年景观空间分布情况为现状基础，选取其中核心斑块面积大于100 hm²的乔灌地景观以及核心面积大于5 hm²的自然水体景观作为花溪区的生态源地；并基于上文所得区域景观分布现状，生态源及各景观阻力值，使用 ArcMap 10.2 构建花溪区景观耗费距离表面。

2.2.5 景观生态廊道及节点的确定

在 ArcMap 10.2 中，通过花溪区耗费距离表面图层，提取其中最小耗费及最大耗费路径所在区域，通过对最小耗费路径区域的筛选，确定花溪区

生态廊道的空间位置，而各条生态廊道间的交点以及生态廊道与最大耗费路径的交点则是生态节点的空间位置，并将生态廊道间的交点即区域生态流的交点定义为Ⅰ类生态节点，生态廊道与最大耗费路径的交点即区域生态流与高生态阻力区域的交汇处定义为Ⅱ类生态节点。

2.2.6 热点分析

热点 (Getis-Ord G_i^*) 统计分析是一种局部空间自相关分析方法，其识别出的热点及冷点区域具有统计显著性高分或低得分的空间聚集区域^[22]，本研究采用此方法探究花溪区单位生态服务价值高值及低值聚集区域，其相关计算公式如下：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{[n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2] / (n-1)}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{X}^2} \quad (4)$$

式中： G_i^* 为聚集指数，其值越高表明生态服务价值高值及低值聚集越明显； \bar{X} 表示单位生态服务价值的平均值； W_{ij} 是空间网格 i 与 j 之间的空间权重值； n 为空格网格数。

本研究基于花溪区单位生态服务价值小区的空间分布情况，使用 ArcMap 10.2 中的 Getis-Ord G_i^* 统计分析识别花溪区高单位生态服务价值显著性空间聚集区域（生态价值提升冷点）以及低生态服务价值显著性空间聚集区域（生态价值提升热点），最终将显著性 $P > 90\%$ 的低得分区域作为生态价值提升的热点区域，为后续花溪区景观格局优化分区提供依据。

3 结果与分析

3.1 花溪区景观类型空间分布

花溪区2008、2013及2018年各类景观空间分布状况如图3和表3所示。花溪区景观类型的基底主要由乔灌地及耕地构成，各时期耕地乔灌地面积之和均占整体土地面积的80%以上。2008—2018年间，花溪区景观斑块的总体数量由2008年的42 766个最终增加至2018年的51 469个。各时段内，乔灌地斑块数量均最多，且面积占比最大，裸

地斑块数量均最少,且面积占比最小。研究时段内景观斑块数量不断上升,表明区域景观破碎化程度不断提升,各景观类型中,耕地面积占比由38.24%减为23.14%,减幅达39.50%,减势明显;而乔灌地占比则由50.29%增长至58.29%;同时,在建用地面积占比由2.39%增长至4.59%,

已建成用地面积占比由6.97%增长至11.58%,两者综合增幅达72.80%,建设用地扩张迅速,反映了区域高速的城镇化建设进程;其它景观类型基数较少,其中草地占比稳步升高,裸地占比总体下降,水体景观的变化则相对平稳。

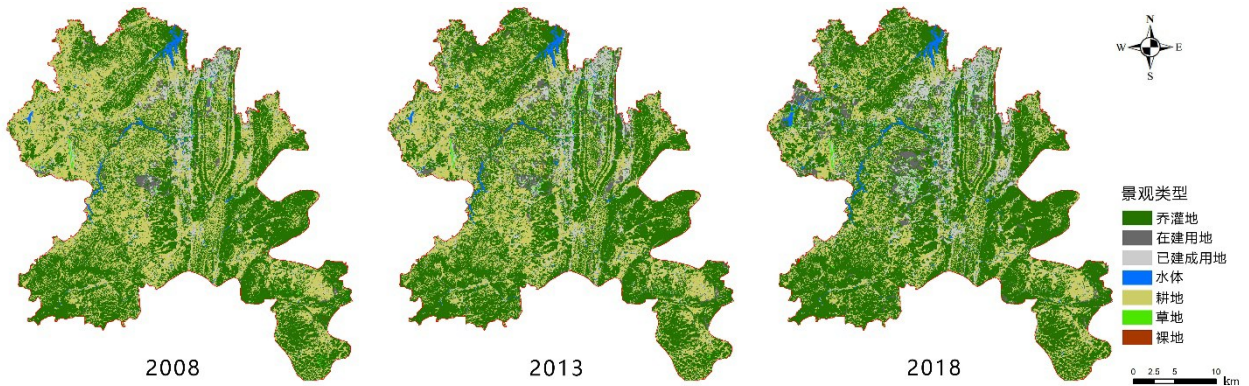


图3 花溪区各时段的景观斑块分布

Fig. 3 Landscape patches Distribution map in each period of Huaxi

表3 花溪区各时段景观类型

Tab. 3 Landscape types in each periods of Huaxi

景观类型	2008			2013			2018		
	斑块数量 /个	斑块面积 /hm ²	面积占比 /%	斑块数量 /个	斑块面积 /hm ²	面积占比 /%	斑块数量 /个	斑块面积 /hm ²	面积占比 /%
乔灌地	18 141	48 487.68	50.29	18 184	51 567.25	53.48	19 595	56 207.23	58.29
在建用地	1 724	2 304.46	2.39	3 235	3 646.01	3.78	3 705	4 427.22	4.59
已建成用地	4 524	6 718.06	6.97	7 892	8 438.31	8.75	10 415	11 163.45	11.58
水体	1 305	1 395.09	1.45	1 324	1 336.06	1.39	1 656	1 535.84	1.59
耕地	15 557	36 870.78	38.24	14 094	30 712.06	31.85	12 531	22 307.88	23.14
草地	1 197	498.92	0.52	2 007	558.64	0.58	3 065	696.80	0.72
裸地	313	144.88	0.15	471	161.55	0.17	502	81.45	0.08
总计	42 766	96 419.87	100	47 207	96 419.87	100	51 469	96 419.87	100

3.2 花溪区未来10年景观格局的预测

经 Kappa 检验,所得 Kappa 系数为 0.787 9,大于 0.75,表明上文所建立的预测模型的准确度较高,结果可靠,适用于研究区域 2023 年及 2028 年景观格局的预测模拟工作。

基于 CA-Markov 模型对 2018—2028 年花溪区景观格局变化的预测结果如图 4 所示,乔灌地及耕地仍然是花溪区最主要的景观类型。而在建用地及已建成用地则进一步扩张,区域西北侧即党武镇、

石板镇、麦坪镇及湖潮乡的建设用地扩张趋势最为明显,与道路分布的高密度区域高度吻合(图 2),至 2028 年时,以上区域的建设用地基本已经连成整片。同时,经开区、小孟社区、溪北社区、贵筑社区、清溪社区及青岩镇等城镇区域的建设仍在持续进行,建设用地稳步扩张,相比 2008—2018 年,预测时段内的城镇建设更为集中连片,新增的在建及已建成用地主要集中在高程较低,坡度较缓的区域,且依附于原有建设用地进行扩张。

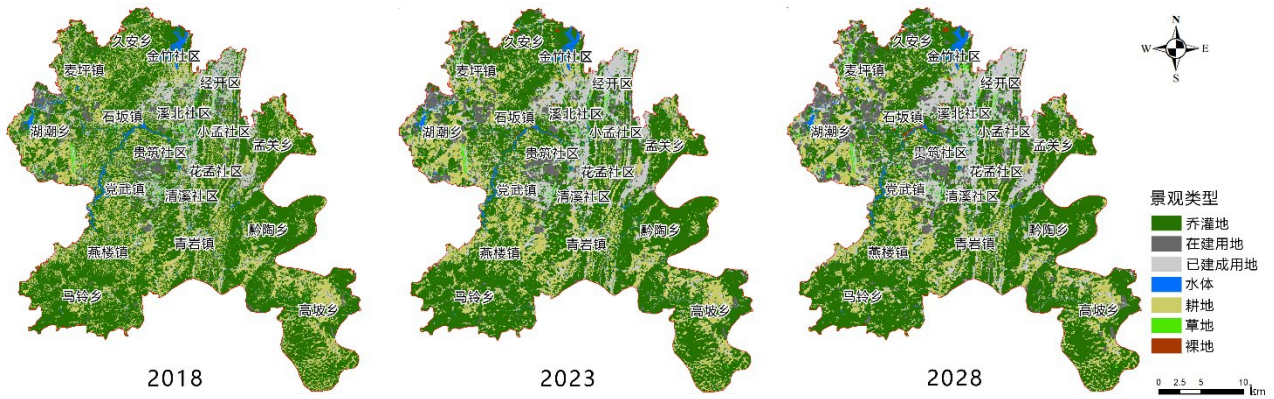


图 4 各预测时段的花溪区景观类型分布

Fig. 4 Landscape type distribution of Huaxi in each prediction period

预测各时段各景观类型的变化情况如表 4 所示，依据 CA-Markov 模型预测结果，2018—2028 年间，乔灌地面积仍旧最大，裸地面积仍旧最小，乔灌地及耕地仍是花溪区最主要的景观组分。相较 2008—2018 年，预测时段内在建用地面积占比由 4.57% 增至 8.57%，已建成用地面积占比由 11.59% 增至 16.35%，两者综合涨幅达 54.11%。耕地仍呈减少趋势，其面积占比由 23.13% 降至 17.92%，但其减少面积及比例相较于前 10 a 均有

一定放缓趋势。而乔灌地面积则出现回落现象，由 58.31% 减少至 54.24%，表明越来越多的乔灌地呈现出向建设用地转变的趋势。预测时段内水体、草地及裸地面积基数仍较低，其中草地及裸地面积呈持续上升趋势，水体面积比例变化依然平缓，表明期间水文过程依旧较为稳定。预测结果表明，未来 10 a 内，花溪区建设用地仍呈快速增长趋势，区域城镇化进行仍在快速推进，区域景观格局变化剧烈。

表 4 各预测时段花溪区的景观类型

Tab. 4 Landscape types in each prediction periods

景观类型	2018		2023		2028	
	斑块面积/hm ²	面积占比/%	斑块面积/hm ²	面积占比/%	斑块面积/hm ²	面积占比/%
乔灌地	56 224.75	58.31	54 269.05	56.27	52 304.02	54.24
在建用地	4 411.32	4.57	6 337.12	6.57	8 262.84	8.57
已建成用地	11 179.33	11.59	13 471.83	13.97	15 764.17	16.35
水体	1 536.42	1.59	1 463.43	1.52	1 390.43	1.44
耕地	22 300.45	23.13	19 792.60	20.53	17 283.60	17.92
草地	693.20	0.72	908.72	0.94	1 124.08	1.17
裸地	79.85	0.08	187.58	0.19	295.72	0.31
总计	96 425.07	100	96 425.07	100	96 425.07	100

3.3 花溪区景观格局的优化

3.3.1 花溪区生态服务功能价值分析

花溪区生态服务价值空间分布情况如图 5 所示，花溪区单位生态服务价值空间分布存在一定差异 (0.591 ~ 2.459)，高生态服务价值区域主要分布在久安乡、燕楼镇、马铃乡、黔陶乡等具有大面积乔灌地的区域，以及金竹社区、花溪水水库上游等具有大面积水体的区域，经开区、溪北社区、清溪社区、湖潮乡、麦坪镇、石板镇、党武镇及青岩镇等具有大量建设用地的区域生态服务价值则较低。

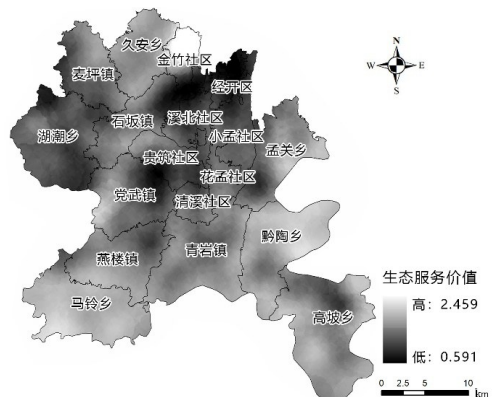


图 5 花溪区生态服务价值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological service value

花溪区2018年及2023年、2028年2个预测时段各类景观产生的生态服务价值如表5所示，其中乔灌地是花溪区生态服务价值的最主要构成部分，其产生的生态服务价值始终占到总量的80%以上。经过前文CA-Markov模型预测，2018—2028年间，花溪区建设用地仍呈持续扩张趋势，乔灌地、水体

及耕地面积呈持续减少趋势，区域生态服务价值总量也随之由 $129\,585.81 \times 10^4$ 元降至 $118\,971.03 \times 10^4$ 元，下降趋势明显。因此，对其景观格局进行合理优化意义重大，而花溪区作为国家级生态示范区以及贵阳市乃至贵州省的重要生态名片，对于其生态价值下降趋势的合理控制更显重要。

表5 花溪区2018年及预测时段各类景观生态系统服务价值

Tab. 5 Ecosystem service value of each landscape ecosystems in 2018 and forecast period in Huaxi

景观类型	2018		2023		2028	
	斑块面积 /hm ²	生态服务价值 / $\times 10^4$ 元	斑块面积 /hm ²	生态服务价值 / $\times 10^4$ 元	斑块面积 /hm ²	生态服务价值 / $\times 10^4$ 元
乔灌地	56 207.23	108 671.06	54 269.05	104 923.78	52 304.02	101 124.59
在建用地	4 427.22	164.43	6 337.12	235.36	8 262.84	306.88
已建成用地	11 163.45	414.61	13 471.83	500.34	15 764.17	585.48
水体	1 535.84	6 247.24	1 463.43	5 952.71	1 390.43	5 655.77
耕地	22 307.88	13 639.04	19 792.60	12 101.20	17 283.60	10 567.19
草地	696.80	446.40	908.72	582.17	1 124.08	720.14
裸地	81.45	3.03	187.58	6.97	295.72	10.98
总计	96 419.87	129 585.81	96 425.07	124 302.53	96 425.07	118 971.03

3.3.2 花溪区生态源地及耗费距离表面

花溪区生态源地空间分布情况如图6所示，其主要分布在金竹社区、花溪水库、久安乡、燕楼镇、马铃乡、黔陶乡等区域，与高生态服务价值区域高度吻合。以上生态源地是花溪区生态系统功能的重要载体，应作为城镇发展的生态底线而被严格保护，且应注重生态源地之间的联系，保证区域生态流正常循环。

值所构建的花溪区景观耗费距离表面如图7所示，其能够体现源景观中生态流的空间运动趋势。累计耗费距离越低，表明源景观中生态流向其自然流动的趋势越明显，并可基于此进一步探讨调控区域生态过程的合理空间途径及方法。

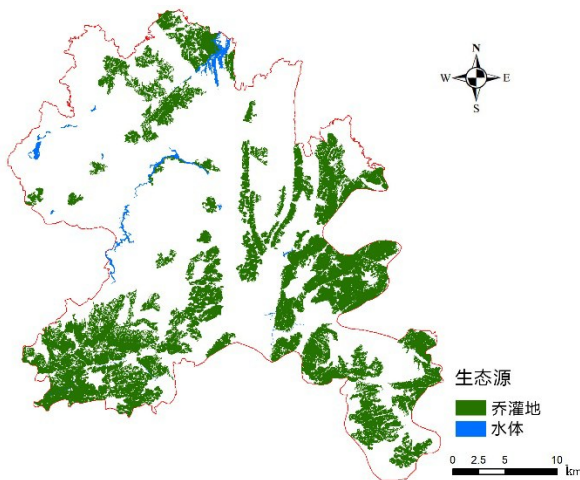


图6 花溪区生态源地

Fig. 6 Ecological land source in Huaxi

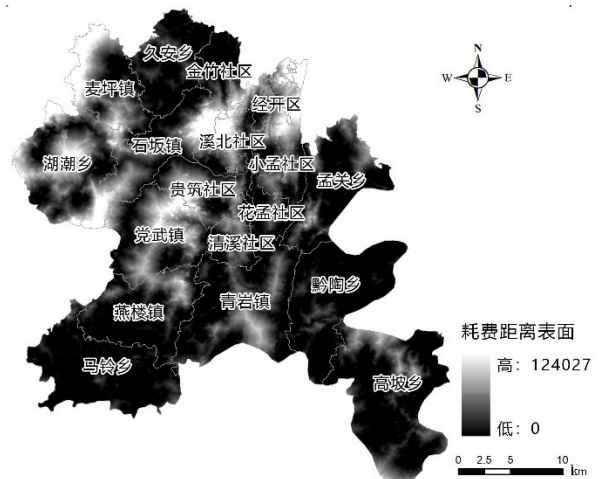


图7 花溪区耗费距离表面

Fig. 7 Surface of cost distance in Huaxi

3.3.3 花溪区景观生态廊道及节点的空间分布

生态廊道是保证各生态源地之间相互连通，维持区域生态功能的，通常为线状或带状的区域，而生态节点则是其中对生态流动起到关键影响作用的区域。

基于区域景观分布现状，生态源及各景观阻力

花溪区景观生态廊道的空间分布情况如图 8 所示，整个区域的各个部分均有生态廊道的分布，并形成了一定的网络结构，其中党武镇、贵筑社区、经开区、黔陶乡、燕楼镇以及马铃薯乡的生态廊道密度较低。而党武镇、贵筑社区及经开区是由于其间缺乏大面积的乔灌地或水体等生态源地导致其间缺乏生态廊道，黔陶乡、燕楼镇以及马铃薯乡则是因为其中存在大量的生态源地，生态流在以上区域的流动已经很通畅，所以生态廊道的密度较低。

结合卫星影像可知，山脚山谷线、河流河岸带、大面积林带以及农林交错带是花溪区景观廊道分布的主要区域，以上区域均具有较高生态服务价值以及较低的生态阻力的特点，也是生态流扩散的关键区域，其中生态廊道的设置也能够在很大程度上保证区域整体景观的连通性。

依据生态节点确定标准，花溪区共有生态节点 51 处，其中 I 类生态节点 33 处，II 类生态节点 18 处（图 8）。上述两类生态节点中，I 类生态节点主要分布在林带与水系两类景观自身或相互之间的交汇处，是区域生态流的重要枢纽；II 类生态节点则主要分布在林带或水域与建设用地的交汇处，是区域生态流的主要受限点。上述生态节点均是花溪区生态网络的重要控制点，应限制其周围的建设活动，保证区域连通性，避免阻断生态流，保证花溪区生态流的正常运行。

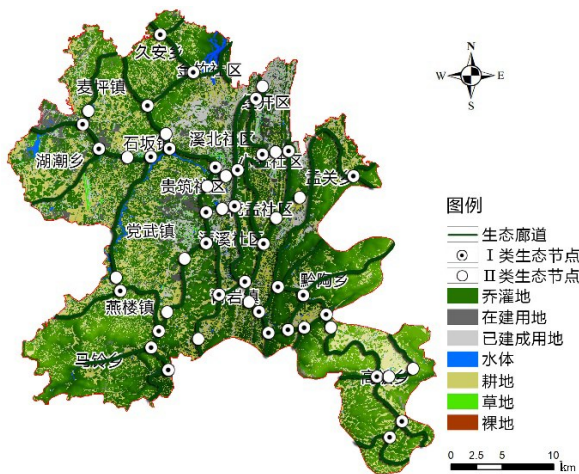


图 8 花溪区生态廊道及生态节点空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecological corridors and nodes

3.3.4 花溪区景观生态优化分区

花溪区生态恢复热点区域空间分布情况如图 9 所示，低生态系统服务价值聚集区域是生态恢复的热点区域，主要为在建用地及已建成用地，分布在

经开区、溪北社区、清溪社区等老建成区，以及湖潮乡、麦坪镇、石板镇、党武镇及青岩镇等新兴的高建设强度区域，以上区域生态服务价值显著缺失，亟需对其生态服务价值进行提升。

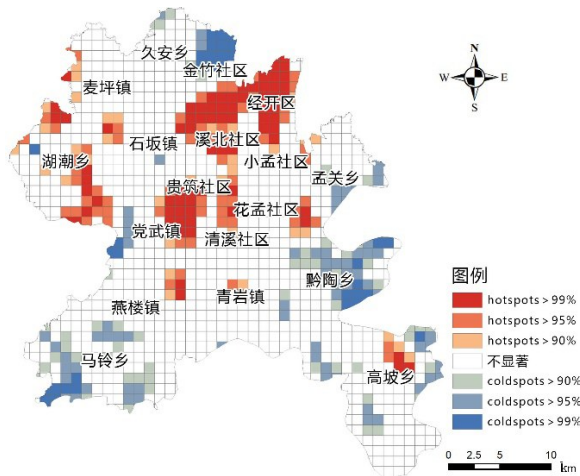


图 9 花溪区生态提升热点

Fig. 9 Hot spots of ecological improvement in Huaxi

基于热点分析结果，结合景观空间分布情况及各类景观生态服务价值，将花溪区划分为景观生态核心区、景观生态维持区、景观生态恢复区以及景观生态提升区（图 10）。其中，景观生态核心区是区域生态功能最强、生态服务价值最为突出的区域，是维持区域生态系统稳定的核心区域；景观生态维持区是区域内具备一定生态功能且斑块面积较大，生态过程较为稳定的区域；景观生态恢复区是具备一定生态功能但景观斑块破碎，受人为干扰较大，生态过程易受影响的区域；而景观生态提升区是指生态功能及价值缺乏，生态阻力较大，由人为活动主导的建设用地所在区域。

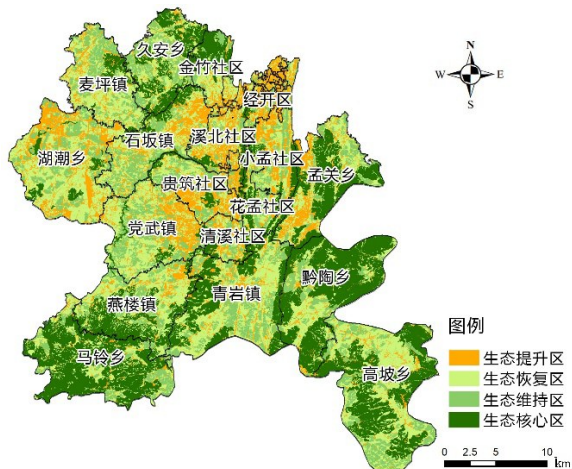


图 10 花溪区景观优化分区

Fig. 10 Division of landscape optimization in Huaxi

景观生态核心区即上文中花溪区生态源地所在区域,同时与生态提升冷点区域高度吻合,主要分布在区域西南侧的燕楼镇、马铃乡,东南侧的高坡乡,东侧的黔陶乡、孟关乡,区域北侧的金竹社区、久安乡以及大将山脉、花溪水库上游等区域。其是花溪区生态系统功能的最重要载体,主要由乔灌地及水体景观构成,是生态保护的核心目标。而其中的金竹社区中的啊哈水库、花溪水库上游的大体量水体,兼具了高生态服务功能及高生态脆弱度的特点,同时也是重要饮用水源地,是生态保护的重中之重,应设置河岸缓冲带。保护水质及土壤,严格管控岸线附近开发建设。对于其他的大面积山区林带,应注意保持其内部生态的稳定性,指定保护措施,严控区域内的人类活动,防止人为破坏,并可实施相应的生态规划对其进行长期保护。

景观生态维持区主要由面积超过 10 hm^2 的乔灌地以及其它自然河流构成,主要分布在景观生态核心区周边以及花溪区中西部。以上乔灌地及水体景观具备较强的生态功能,同时其生态过程也相对稳定,是区域生态功能的重要基础。上述区域的维持保护工作应注意防止河流岸线的水土流失,注重具备可达性的绿色空间及绿色基础设施的建设,同时注重其与生态源地及建设用地交错区域的过渡功能,并注意与相关土地利用及城乡规划政策相衔接。

景观生态恢复区主要由区域内耕地、裸地、草地及其余较小乔灌地构成,在花溪区内广泛分布,以上区域同样具备一定的生态服务功能,但其景观破碎化程度高,单个斑块生态过程不稳定,易受人类活动影响。对于其中耕地、乔灌地及草地,应强化其间农田网络的建设,并联系其中的人行道路、林带、乔灌地及草地斑块,形成一个较为完整的景观网络,恢复其生态功能。对于裸地,则应增加其覆土厚度及植被覆盖度,模拟自然过程逐步恢复其生态功能。

景观生态提升区主要为花溪区生态价值提升的热点区域,由建设用地以及其中的部分人工绿地构成,主要集中在花溪区的中北部及西侧。上述区域的生态服务功能缺失,在高建设强度区域内部,应注重自然绿地的保留及补充人工绿地,提升其生态服务功能。在建设用地扩张时,应注意保证生态节点的连通性,同时,应注意建设用地与其他景观交错区域的过渡性,钝化不同景观间异质性,缓和人地矛盾。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究所建立预测模型虽已通过一致性 Kappa 检验,但由于花溪区 2018 年内各个乡镇或社区的人口、社会生产等具体数据难以明确,无法纳入预测适宜性图集,导致模型承载的因素存在部分缺失。当下景观格局相关研究通常在单一理论模型下进行,而本研究首先基于总体景观格局,使用 CA-Markov 模型,对花溪区景观格局进行预测,在景观格局优化部分,则使用关注生态过程的“源-汇”理论模型,以耗费距离表面为基础构建花溪区的景观生态网络,基于热点分析进行优化分区,尝试将上述基于不同理论模型所得到的分析结果进行相互借鉴参考,并进一步进行分析讨论。

总体来说,当下城市景观格局相关研究的体系仍不够完善。在理论层面,研究结果与生态过程的内涵表征难以量化联系;在研究方法上,也存在关注特定过程的“源-汇”理论模型与基于总体景观格局的研究方式存在较大分异,难以真正耦合,以及景观格局相关评价的阈值难以划定等问题。理论的推进与方法的革新也成为当下景观格局相关研究的难点,而格局与过程的耦合则是建立完善景观格局研究体系的必经之路。

4.2 结论

本研究基于 CA-Markov 模型对花溪区未来 10 a 景观格局进行预测,并以景观生态服务价值为基础,使用累计阻力模型构建耗费距离表面,对区域景观格局进行优化,得到以下结论:

花溪区景观类型的基底主要由乔灌地及耕地构成,2008—2018 年间,区域建设用地扩张迅速,景观斑块数量及破碎化程度不断提升,反映了区域高速的城镇化建设进程,其它景观类型基数较少,其中草地占比稳步升高,裸地占比总体下降,水体景观的变化则相对平稳。

预测结果表明,2018—2028 年花溪区建设用地面积仍呈快速扩张趋势,城镇建设相比 2008—2018 年更为集中连片,新增的在建及已建成用地主要集中在高程较低,坡度较缓,并已具备一定建设强度的党武镇、石板镇、麦坪镇及湖潮乡等区域,耕地面积持续下降,乔灌地面积呈下降趋势,草地及裸地面积呈上升趋势,水体面积相对稳定。

依据耗费距离表面的提取结果,花溪区景观生

态廊道主要分布在山脚山谷线、河流河岸带、大面积林带以及农林交错带等区域，而生态节点则是生态廊道上生态流的交汇处以及主要受限区域。Ⅰ类生态节点主要分布在林带与水系两类景观自身或相互之间的交汇处，Ⅱ生态节点则分布在林带或水域与建设用地的交汇处。依据热点分析结果，最终以景观生态核心区、景观生态维持区、景观生态恢复区以及景观生态提升区定义并划分出花溪区景观生态优化分区并针对各区域提出建议。

参考文献：

- [1] 易丹, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态敏感性评价和 CA-Markov 模拟的平原型城市开发边界划定——以南昌市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 208-218.
- [2] 赵筱青, 王海波, 杨树华, 等. 基于 GIS 支持下的土地资源空间格局生态优化[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4892-4901.
- [3] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 830-840.
- [4] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [5] 罗鼎, 许月卿, 邵晓梅, 等. 土地利用空间优化配置研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 791-797.
- [6] 俞孔坚, 王思思, 李迪华. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [7] 李绥, 石铁矛, 付士磊, 等. 南充城市扩展中的景观生态安全格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 734-740.
- [8] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23: 1-16.
- [9] 潘竟虎, 杨旺明, 刘莹. 兰州市景观生态功能评价和格局优化[J]. 西北师范大学学报, 2011, 47(5): 96-103.
- [10] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.
- [11] 中国科学院地理资源科学研究所. 2015 年中国陆地生态系统类型空间分布数据 [DB]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=198&WebShieldDRSessionVerify=1ztJN6SxZ72TFPPymuB5>. 2016-01-02.
- [12] 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 等. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 120-130.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [14] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [15] 江世丹, 潘洪义, 姜允芳. 成都市中心城区绿地景观格局时空演化: “城”与“郊”的比较[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3): 90-96.
- [16] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究——以河北省怀来县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569.
- [17] 陆禹, 余济云, 罗改改, 等. 基于粒度反推法和 GIS 空间分析的景观格局优化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 534-545.
- [18] 张利利, 厉月桥, 李锐. 海口市 2000—2015 年城乡交错带景观格局梯度变化研究[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(1): 133-139.
- [19] 李晖, 易娜, 姚文璟, 等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [20] 李平星, 陈东, 樊杰. 基于最小费用距离模型的生态可占用性分析——以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 227-236.
- [21] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源—汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [22] 刘慧, 朱国平. 近百年来南极磷虾分布冷热点的时空变动[J]. 应用生态学报, 2020, 37(16): 5324-5333.

(编辑: 李甜江)