

基于地形梯度的喀斯特山区景观综合破碎化演变 ——以贵阳市为例

陆清平¹, 赵翠薇^{1,2}, 王杰¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025;

2. 喀斯特山地生态环境保护与资源利用协同创新中心, 贵阳 550025)

摘要:为揭示喀斯特山区景观综合破碎呈现怎样的地形分布规律和演变态势,利用地形位指数、分布指数和生态景观指数及均方差权数法,分析贵阳市 25 年景观破碎度类型的地形梯度特征。结果表明:(1) 贵阳市 1990—2015 年以高和一般破碎度为主,1990 年各占比达 42.51%和 30.36%,2015 年为 41.33%和 30.56%,且高破碎面积减少 94.01 km²,其余 3 种破碎度类型略有增加。(2) 低破碎和一般景观破碎度主要分布在贵阳市中、北及东部,高破碎和剧烈破碎度主要集中在西部和南部。(3) 贵阳市各景观破碎有显著地形特征,25 年间耕地和水域及建设用地与地形位呈负相关,在 1~3 梯度均为优势分布,剧烈破碎度内建设用地和水域分布指数大于 3,地形位特征比耕地明显;两期低破碎林草地与地形位成正相关,在中高地形位为优势分布,且高地形位最为突出;未利用地与地形梯度均呈先增加后减小趋势,高地形梯度时有最大优势分布值。研究结果对客观全面认识喀斯特景观破碎本底具有重要现实意义,为生态环境保护和土地优化提供基础数据支撑,也可丰富不同地形景观破碎时空演变研究。

关键词:地形位指数; 分布指数; 均方差; 地形梯度; 景观综合破碎度

中图分类号:P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0242-07

Landscape Fragmentation Evolution in Karst Mountainous Area Based on Terrain Gradient —A Case Study of Guiyang City

LU Qingping¹, ZHAO Cuiwei^{1,2}, WANG Jie¹

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Collaborative Innovation Center for Ecological Environment Protection and Resource Utilization in Karst Mountains, Guiyang 550025, China)

Abstract: The objective of this study is to reveal the topographical distribution and evolutionary trend of the comprehensive fragmentation of karst mountainous landscape. We used topographic position index, distribution index, ecological landscape index and mean square error weight method to analyze the terrain gradient characteristics of the 25-year landscape fragmentation types in Guiyang. The results show that: (1) from 1990 to 2015, Guiyang City was dominated by high and general landscape fragmentation, which accounted for 42.51% and 30.36% in 1990, 41.33% and 30.56% in 2015, the area of high fragmentation decreased by 94.01 km², and the remaining three types of landscape fragmentation increased slightly; (2) low fragmentation and general landscape fragmentation mainly distributed in the middle, north and east of Guiyang City, and high fragmentation and severe fragmentation mainly concentrated in the west and south; (3) the fragmentation of various landscapes in Guiyang City had significant topographical characteristics; in 25 years, the cultivated land, water bodies and construction land were negatively correlated with the topography, cultivated land, water area and construction land in the 1~3 gradient all distributed in a dominant manner; the distribution indices of construction land and water area within the severe fragmentation degree were greater than

收稿日期:2020-06-22

修回日期:2020-07-30

资助项目:国家重点研发计划“喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范”(2016YFC0502300)

第一作者:陆清平(1994—),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事土地生态与环境保护研究。E-mail:1776280435@qq.com

通信作者:赵翠薇(1968—),女(白族),贵州大方人,教授,博士,主要从事土地利用规划与生态环境保护方面的研究。E-mail:zhaocuiwei@sohu.com

3, and the topographic characteristics were more obvious than that of cultivated land; the low-fragmented forest and grassland in the two phases were positively correlated with the terrain gradient, and both were dominant in the middle and high terrain, and the high terrain was the most prominent; the unused land and terrain gradients both increased first and then decreased, and unused land had the largest dominant distribution value at high gradients. This study has important practical significance for the objective and comprehensive understanding of the background of karst landscape fragmentation, provides basic data support for ecological environmental protection and land optimization, and can also enrich the research on the spatiotemporal evolution of landscape fragmentation in different terrains.

Keywords: topographic position index; distribution index; mean square error; topographic gradient; landscape comprehensive fragmentation

土地景观破碎是由于自然或人文因素导致单一、均质连续的土地景观分割为许多互不相连斑块镶嵌的过程现象^[1-2],其表现为图斑数量不断增加,土地利用方式和功能逐渐变化。导致了诸多问题的出现,如耕地破碎阻碍农业规模化和降低农业生产率^[3];林草等生态用地破碎造成生物多样性减少^[4],使得生态系统结构和功能及农业生产安全受到胁迫^[5],不利于地方经济^[6]、社会^[7]和城市可持续健康发展及土地保护^[8]。因此,土地景观破碎研究受到国内外学者的关注。

近年来,破碎化研究实现了从专题探讨向综合研究^[9-10]、单一向多方法集成^[11]、数理模型向“3S”时空定量研究分析的转变^[12],同时景观破碎关注重心逐渐聚焦于经济欠发达地区,并着重对其诱因的挖掘^[13],研究认为影响因素有家族世袭继承^[14]、生产商战略风险分散^[15]、土地改革制度^[16]、坡度高程和气温降水等^[17-18]。坡度和高程在现实中联系密切,两者所特有空间规律,对景观破碎演化有着深远影响^[19],特别是在山高坡陡的生态脆弱喀斯特山区更为突出,具有鲜明的梯度特征^[20]。因此研究景观破碎化的地形梯度效应,具有一定科学性与实践意义。

当前地形梯度研究,一般利用 DEM(数字高程模型,下同)提取坡度、高程和坡向等地形因子,采用地形位指数来度量地形效应^[21],并结合景观和分布指数实现破碎化的地形梯度效应分析。然而,在喀斯特地区开展景观破碎化方面的研究还较有限,进行综合破碎化的地形梯度分析研究几近空白,尤其是在石漠化恶化趋势好转和区域森林转型的背景下^[22-23],喀斯特山区景观综合破碎呈现什么样的地形变化规律和演变态势是急需摸清的家底。基于此,选取贵阳市为研究区域,尝试在 GIS 和景观分析软件支持下,运用均方差权数法构建景观综合破碎化指数。旨在揭示喀斯特山区地形和破碎化间的关系,丰富不同地形景观破碎化的时空演变研究,对客观全面认识喀斯特景观本底破碎具有重要现实意义,可为生态环境保护和

土地优化提供基础数据支持,为优化地方空间资源和环境保护提供理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

贵阳市位于云贵高原东部和贵州省中部,地处长江与珠江分水岭地带,属全国东部向西部高原过渡带^[24],坐标为 106°07′—107°17′E 和 26°11′—27°22′N。现有直辖区 6 个,分别是观山湖、云岩、南明、花溪、乌当和白云区;下辖 3 个县,即开阳、息烽及修文县,并代管 1 个县级市——清镇市,全市国土总面积 7 976.21 km²。海拔范围 511~1 738 m,落差较大,西南部和中部海拔高,东北部地势较低,见图 1,且坡度起伏较小。伴随着独特复杂的地表地下径流二元结构,境内峰丛、漏斗、洼地等发育强烈,同时低中山、中山等丘陵和山地面积分布较广,还存在少许平地坝区及峡谷,是我国典型的喀斯特地貌分布和生态环境脆弱区^[25-26]。2015 年耕地面积 2 247.93 km²,占贵阳市总面积的 28.18%,林地最大达 50.33%,建设用地为 3.71%,比 1990 年高 1.72%。贵阳市多年平均温度和平均降水量分别是 15.3℃ 和 1 095.70 mm,适宜人类居住活动,2015 年常住人口 462.18 万人,建成区面积为 235 km²,城镇化率达 73.25%,是贵州省城镇化水平最高的区域。

1.2 材料与方法

1.2.1 数据来源及处理 研究数据包括 1990 年、2015 年 2 期 TM/OLI 遥感影像数据、DEM 高程模型数据、贵阳市县域单元矢量边界和 1:5 万地形图数据。其中行政边界和地形图由贵阳市自然资源局提供;由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取 DEM 和遥感影像数据,影像云量小于 10%,两者分辨率为 30 m。首先采用 ArcGIS 10.3 及 ENVI5.1 软件实现影像融合和镶嵌,基于地形图进行影像配准和几何精校正,随后进行辐射校正和色彩增强

及裁剪等预处理。人机交互式解译获得初始土地利用类型;根据研究区实际情况、研究需要和 LUCC 土地分类标准,将土地类型归并为耕地、林地、水域、草地、建设用地和未利用地共 6 个地类,并实地抽样验证和图斑合并修正,最终获得精度 85% 以上的土地利用现状图(1:10 万)。接着运用 ArcGIS 10.3 实现土地利用数据矢量向栅格的转化(为与 DEM 分辨率保持一致,栅格大小设置为 30 m,共计 8 861 418 个栅格);然后选取半径为 1 000 m 移动窗口,在 Fragstats 4.2 软件中计算各景观指数,利用栅格计算器进行均方差运算,求取各指数权重值,获得各期综合破碎图层;最后采用自然断点法实现综合破碎化分等级,与地形位和分布指数叠加制图,分析其地形梯度特征。

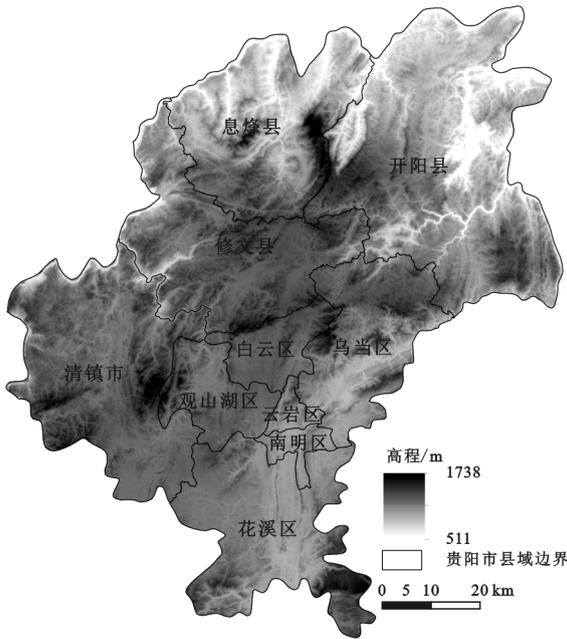


图 1 贵阳市高程分布

1.2.2 地形位指数 景观破碎是受高程和坡度综合

作用的结果^[27],因此采用坡度与高程组成的地形位指数定量描述景观破碎与地形梯度间的关联性^[21]。计算公式如下:

$$T = \text{Lg}[(E/E_0 + 1) \times (S/S_0 + 1)] \quad (1)$$

式中: T 表示地形位指数; E, E_0 分别表示高程及平均高程值; S, S_0 表示坡度和坡度均值。其中, T 与高程和坡度呈正相关,当坡度和高程增加时, T 随之增大,相反则会减小,而当坡度增加高程减小,或者高程增加坡度减小等组合时, T 则处于前两者的中间。

1.2.3 分布指数 地形对景观分布的影响实质可理解为各梯度上景观破碎度分布频率,因此以分布指数来表达景观破碎的分布特征,同时可消除地形梯度下各个景观破碎度面积比例差异而造成的量纲差异。其表达式如下:

$$P = (S_{ie}/S_i)/(S_e/S) \quad (2)$$

式中: P 表示分布指数,值越大分布优势越明显; S_{ie} 表示第 i 种景观破碎度在 e 地形梯度内的面积; S_i 和 S_e 分别表示第 i 种景观破碎度类型和 e 地形的总面积; S 为研究区总面积。当 $p=1$ 时则认为 e 地形内 i 破碎类型的占比与研究区内该破碎类型占比一样;当 $p < 1$ 时,该类型破碎等级在 e 梯度里呈劣势分布;反之则为优势分布。

1.2.4 综合破碎化指数和均方差权数法 景观指数是表征破碎化常用方法^[28],在已有研究基础上结合贵阳市自身特点^[11,17],选取景观形状、聚集度、边界密度、斑块分维数、斑块密度、平均斑块面积和景观分割度等 7 个景观指数。首先在 Fragstats 4.2 软件中进行景观指数的运算,然后对 7 个指数进行无量纲化处理,并求出各自的均方差值,接着归一化处理即可计算出各指标的权重,最后利用加权求和获得综合破碎化指数权重值。计算步骤参考文献^[29]。各指标权重见表 1。

表 1 贵阳市景观综合破碎化评价指标权重

年份	景观分割度 (DIVISION)	边界密度 指数(ED)	斑块分维数 (FRACT)	景观形状 指数(LSI)	平均斑块面积 指数(MPS)	斑块密度 (PD)	聚集度指数 (AI)
1990	0.2622	0.1867	0.0313	0.1385	0.2092	0.1332	0.0388
2015	0.2686	0.1887	0.0320	0.1400	0.2209	0.1110	0.0389

2 结果与分析

2.1 梯度分区的地形位指数面积

根据公式(1),基于高程和坡度计算出贵阳市地形位指数,参考汤国安等研究^[30],采用自然断点法(可使各变异总和最小,更加突出地形特征)和分区统计获得贵阳市地形位区间面积及占比。由表 2 可知,贵阳市梯度以 2~6 等级为主,面积占比达 75.49%,其中中等地形占 44.78%,而低地形位中 2,3 等级占

20.71%;其次分别是 1,7 等级共占 16.95%,高地形位中 8,9 等级面积比例最小,仅 7.57%。从图 2 看出,贵阳市高地形位指数分布在西北及中偏北部区域,白云、观山湖、修文东部和花溪中北部则是低地形位指数集中区域,低海拔和缓坡主要分布在贵阳市中偏南和东北少部分地区。

2.2 贵阳市破碎度分布特征

1990 年破碎最小值为 0.22,最大值为 0.72,2015 年分别是 0.23,0.70。为使结果具有可比性,在自然

断点法分级基础上^[31],参考已有研究^[3],并根据贵阳市实际情况和对其破碎化进行分级,将研究区分为 4 个等级,分别是:破碎度低区(≤ 0.39)、破碎度一般区($0.39 \sim 0.47$]、破碎度高区($0.47 \sim 0.52$]、破碎度剧烈区(> 0.52),结果见图 3。

表 2 贵阳市地形梯度区间及面积统计

地形位 梯度	分级 区间	面积/ km ²	面积 占比/%
1	≤ 0.3898	645.80	8.10
2 低	$(0.3898 \sim 0.4601]$	1133.16	14.21
3	$(0.4601 \sim 0.5266]$	1315.70	16.50
4	$(0.5266 \sim 0.5891]$	1316.05	16.50
5 中等	$(0.5891 \sim 0.6516]$	1227.67	15.39
6	$(0.6516 \sim 0.7181]$	1027.98	12.89
7	$(0.7181 \sim 0.7884]$	706.45	8.86
8 高	$(0.7884 \sim 0.8783]$	440.37	5.52
9	> 0.8783	163.04	2.04



图 2 贵阳市地形指数分布

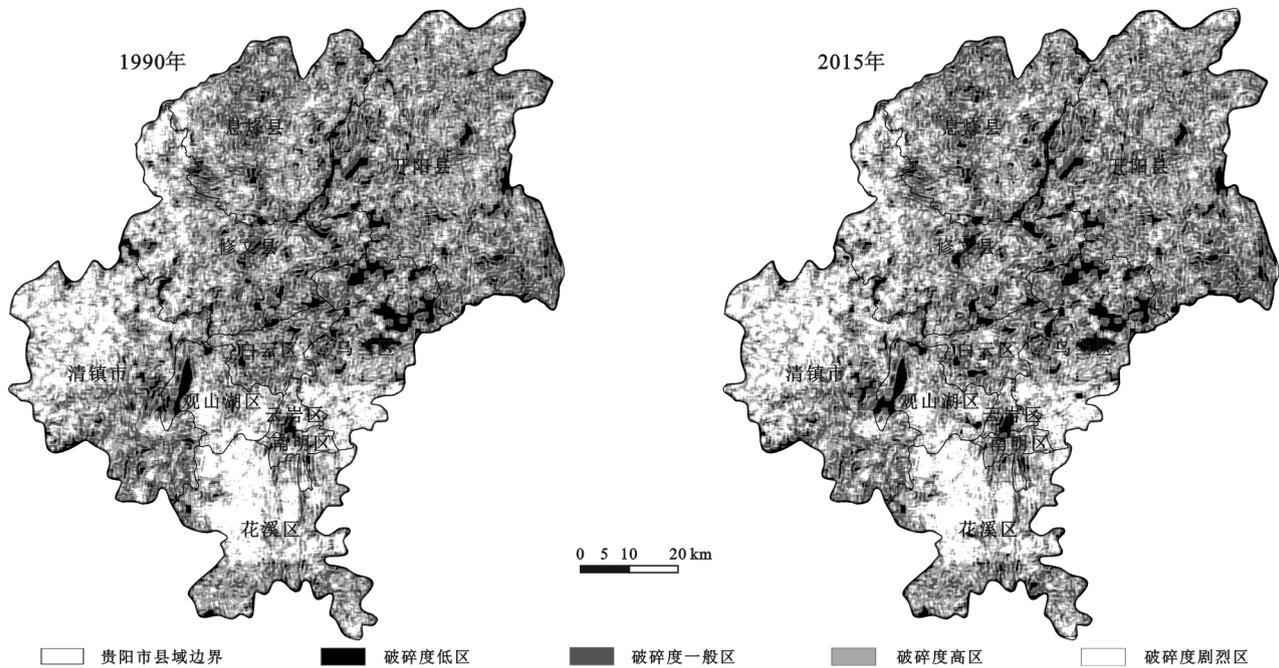


图 3 1990—2015 年贵阳市破碎度类型分布

由图 3 可知,1990 年和 2015 年破碎度剧烈区分布在研究区西部和南部,以清镇市、修文县、花溪区、观山湖和乌当区最为集中,北部地区有少许分布;破碎度低区主要集中在中部和中偏北部,同时东部和西南区域也有少量分布,但整体上都是零星无规律分布,没有形成连片区域;破碎度一般区域同低区一样,零星分布,但其面积分布更为广泛,有微小增加趋势,两者面积占比由 1990 年的 36.75% 增加到 2015 年的 37.47%,而破碎度高区和剧烈区与这两者相反,由 63.25% 减小到 62.53%,呈现减小的趋势。县域层面对比发现,两个时期破碎化最高均为花溪区,1990 年破碎度高和剧

烈类型占 78.30%,2015 年略微降低至 76.14%,破碎化最低的分别是白云区 and 开阳县,低破碎和一般破碎类型从 1990 年的 50.72% 降至 2015 年的 46.72%。贵阳市总的变化趋势表现为景观破碎略有降低。

2.3 贵阳市地形梯度破碎度特征分析

有研究表明,破碎化会受制于区域社会经济和自然条件。利用 ArcGIS 10.3 进行破碎度类型分区统计,根据公式(2)和 Origin 2017 软件获得贵阳市地形梯度分布指数(图 4)。

A, B, C, D 分别表示景观低、一般、高和剧烈破碎度类型,横坐标 1~9 分别表示地形梯度等级。(1)图

4A表示低破碎度类型。由图可知,2个时期的低破碎度等级在1~5均为劣势分布,其分布指数小于1,而6~9地形梯度是优势分布区间,分布指数大于1,两时期分别占低破碎总面积的47.35%和47.02%。同时分布指数是随着地形梯度的增加而上升,表明景观低破碎化在低海拔坡度地区分布不占据优势,在高海拔坡度大的区域景观连贯性更强,破碎化程度更轻。(2)图4B表示一般破碎度类型。1990年、2015年分布指数与地形梯度呈正相关关系,分布指数在地形梯度4~5间发生从劣势向优势的转变,优势分布

面积分别占整个破碎度类型的47.73%和47.37%,但上升速率方面明显低于低破碎度类型。(3)图4C表示高破碎度类型,贵阳市土地利用类型复杂多样,两期破碎度均随着地形梯度的增加而分布指数逐渐减小,且减小速率逐渐增大。在第5梯度时由优势向劣势过渡,1990年和2015年的优势分布面积各占72.10%和72.48%。(4)图4D为破碎度剧烈类型,两期均与地形梯度呈负相关关系,在第4梯度后向劣势发展,且变化速率相对高破碎度区更为迅速,优势区域分别为62.39%和61.36%。

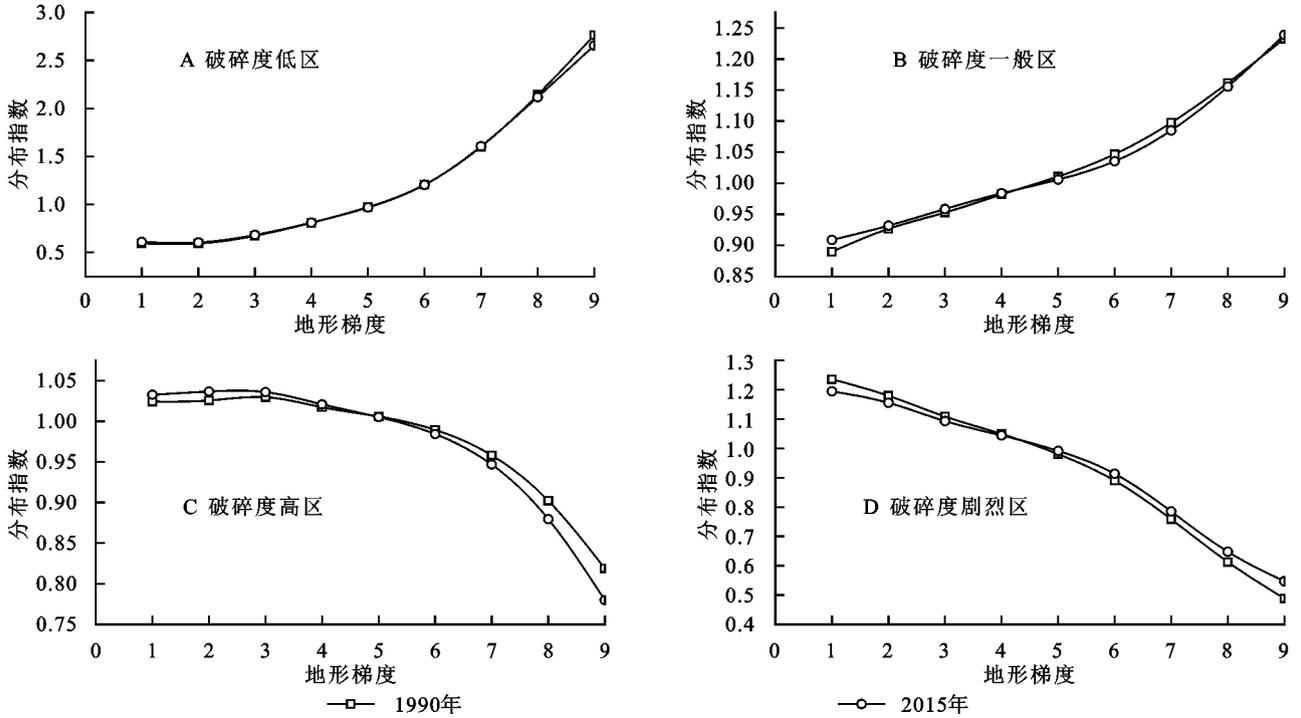


图4 地形梯度上各破碎度类型分布指数

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)基于地形梯度的破碎度一般规律。研究区存在着各种自然和人文的差异,通过对不同梯度上地类的破碎度及其分布指数进行统计分析,发现存在区域差异性的同时,也存在着一些共同的分布特征(图5)。

4个破碎度等级中,1990年和2015年建设用地均在1~3梯度内表现为优势分布,且均随着梯度增加而分布指数减小。1990年耕地从低破碎度到剧烈破碎度等级时,均在1~3梯度表现为优势分布,2015年除低破碎度外,耕地的其他破碎类型优势分布扩大到了第4梯度,说明贵阳市耕地分布有向中高地形位变化的趋势,与魏小芳等^[32]研究结论相同。总体而言,贵阳市耕地和建设用地及水域的4种破碎度,在1~3地形梯度内均为优势分布,且随着地形位的升

高,分布指数逐渐趋近于0。草地和林地在中高地形位分布面积最广。未利用地在中高地形位具有优势。

(2)喀斯特山区景观破碎影响因素。山区景观破碎是社会和经济和政府政策及自然因素综合作用的结果^[33]。坡度高程等自然因素决定土地利用类型的空间分布格局,也是景观破碎的基底^[34],贵阳市破碎度具有显著的地形梯度特征。受地形影响,人类经济活动主要集中在坡度和海拔较小的区域,而高海拔高坡度大地区活动不频繁,形成建设用地、水域和耕地破碎主要集中于人类活动密切的地形位较低区域;林地和草地破碎则分布在地形位较大位置,且林地表现出地形位越大,其破碎化越向低破碎度靠拢的趋势。社会经济涵盖城镇化、经济、交通建设和生活高质量追求等,是景观破碎的内在动力^[24]。贵阳市经济和城市化发展的集聚效应,诱使人们为增加经济收入而远离农村,推动城市不断扩张,使得建设用地和耕地破

碎度低和一般等级的分布范围逐渐向中地形位区间拓展^[35]。同时贵阳市是西南地区铁路和公路交通枢纽中心,近年来县县通高速和村村通公路的建设,耕地、林地和草地等被切割分化,图斑面积减小。此外,人们对生活质量的追求不断上升,城市草地、林地和公园绿

地面积攀升,迫使低地形位草地和林地的高破碎和剧烈破碎分布指数逐渐扩大。政策方面受退耕还林和精准扶贫等影响,大于 25 度耕地实行严格退耕,贵阳市地处高海拔、坡度大的区域,在人为政策活动干预下已经出现了向森林和草地及未利用地转型的现象^[23]。

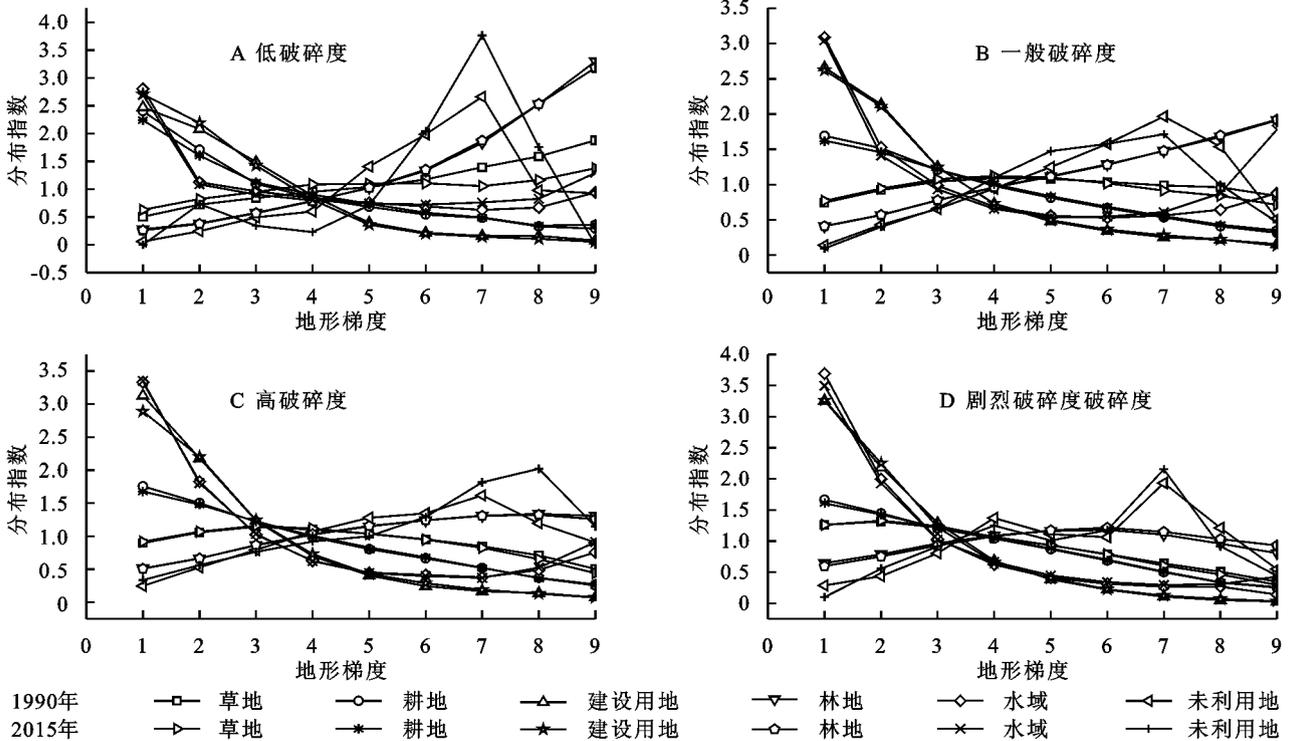


图 5 贵阳市 1990 年、2015 年各地类破碎度在地形梯度上的分布指数

(3)研究特色及不足。研究景观破碎化的成果颇丰,但已有对景观破碎的研究,只是简单指出其空间分布,没有对破碎进行分级研究,更缺乏对景观破碎地形梯度方面的探究。本文特色之处在于将景观破碎与地形梯度联系起来,指出了各景观破碎度在各地形位上的分布特征。不足之处在于对景观破碎演化因素只是简单的从定性方面进行阐述,而没有进行定量的探究,对地形梯度上景观破碎度演化因素定量研究是下一步研究的重点。

3.2 结论

贵阳市 1990—2015 年以高破碎和一般破碎度为主。1990 年占比达 42.51%和 30.36%,2015 年为 41.33%和 30.56%,且高破碎面积减少 94.01 km²,其余 3 种破碎度类型略有增加。25 a 间,高破碎度有所减少,其余 3 种类型略有增加。高和剧烈破碎度类型主要集中于研究区的西部和南部地域,而北部则相对较少;低破碎度和一般景观破碎度在贵阳市中部、北部和东部区域较为密集。

贵阳市各景观破碎有显著的地形梯度分异效应。1990—2015 年耕地和水域及建设用地与地形位呈负

相关关系,在 1~2 梯度内均为优势分布,且在剧烈破碎度时,耕地的地形梯度特征没有建设用地和水域明显;二期低破碎林草地与地形梯度成正相关,在 5~9 梯度为优势分布,而剧烈破碎的林草地随地形位增加而减小,地形位高的区域以林草地为主。未利用地与地形梯度均呈现先增加后减小的趋势,且在 7~8 梯度时优势分布达到最大值。

参考文献:

[1] 王宪礼,布仁仓,胡远满,等.辽河三角洲湿地的景观破碎化分析[J].应用生态学报,1996,7(3):299-304.
 [2] 邱海军,曹明明,黄龙县土地利用景观格局及其破碎化分析[J].西北大学学报:自然科学版,2011,41(6):1102-1106.
 [3] 陈帷胜,冯秀丽,马仁锋,等.耕地破碎度评价方法与实证研究:以浙江省宁波市为例[J].中国土地科学,2016,30(5):80-87.
 [4] Botsch J C, Walter S T, Karubian J, et al. Impacts of forest fragmentation on orchid bee (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) communities in the Chocobiodiversity hotspot of northwest Ecuador[J]. Journal of Insect Conservation, 2017,21(2):1-11.

- [5] Zeng H, Wu X B. Utilities of edge-based metrics for studying landscape fragmentation[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2003, 29(2):159-178.
- [6] 张云路,李雄,田野.基于景观生态学“源—汇”理论的市域尺度生态功能分区:以内蒙古通辽市为例[J].*生态学报*, 2018, 38(1):65-72.
- [7] 邹月,周忠学.西安市景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J].*应用生态学报*, 2017, 28(8):2629-2639.
- [8] 张金茜,巩杰,马学成,等.基于 GeoDA 的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性[J].*生态学杂志*, 2018, 37(5):1476-1483.
- [9] Rafael M N C, Vieira D J E, Susana O G, et al. Land cover changes and fragmentation in mountain neotropical ecosystems of Oaxaca, Mexico under community forest management[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1):143-155.
- [10] 徐晓然,谢跟踪,邱彭华.1964—2015 年海南省八门湾红树林湿地及其周边土地景观动态分析[J].*生态学报*, 2018, 38(20):313-323.
- [11] 张金茜,巩杰,柳冬青.地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J].*地理科学*, 2018, 38(8):1370-1378.
- [12] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征:以新疆精河县为例[J].*生态学报*, 2009, 29(3):1251-1263.
- [13] Sudhakar Reddy C, Vazeed Pasha S, Satish K V, et al. Quantifying nationwide land cover and historical changes in forests of Nepal(1930—2014): implications on forest fragmentation[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2018, 27(1):91-107.
- [14] Waleed H, Abou E H. Irrigation management assessment from land fragmentation perspective in the Nile Delta[J]. *Irrigation and Drainage*, 2018, 67(3):354-362.
- [15] Sikor T. Land fragmentation and cropland abandonment in Albania; Implications for the roles of state and community in post-socialist land consolidation [J]. *World Development*, 2008, 37(8):1411-1423.
- [16] Ciaian P, Guri F, Rajcaniova M, et al. Land fragmentation and production diversification: A case study from rural Albania[J]. *Land Use Policy*, 2018, 76:589-599.
- [17] 付扬军,师学义,和娟.汾河流域景观破碎化时空演变特征[J].*自然资源学报*, 2019, 34(8):1606-1619.
- [18] 李哲,张飞,张海威,等.艾比湖典型区域景观格局及累积环境效应研究[J].*环境科学与技术*, 2018, 41(4):172-181.
- [19] 陈铸,黄雅冰,朱志鹏,等.基于地形梯度特征的福州市景观格局演变[J].*应用生态学报*, 2018, 29(12):4135-4144.
- [20] 喻红,曾辉.快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J].*地理科学*, 2001, 21(2):64-69.
- [21] 董顺舟,赵宇鸾,李秀彬.基于地形梯度的高原山地区土地利用格局时空特征:以贵州省盘县为例[J].*水土保持研究*, 2017, 24(2):213-222.
- [22] 熊康宁,陈起伟.基于生态综合治理的石漠化演变规律与趋势讨论[J].*中国岩溶*, 2010, 29(3):267-273.
- [23] 赵宇鸾,葛玉娟,旷成华,等.乡村振兴战略下贵州山区森林转型路径研究[J].*贵州师范大学学报:自然科学版*, 2018, 36(1):1-7.
- [24] 陈勇杰,张朝琼,王济.西部欠发达地区生态宜居城市评价与建设研究:以贵阳市为例[J].*贵州师范大学学报:自然科学版*, 2017, 35(2):7-13.
- [25] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].*地理学报*, 2012, 67(7):878-888.
- [26] 蒙吉军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].*长江流域资源与环境*, 2016, 25(7):1052-1061.
- [27] 孙丕苓,许月卿,王数.环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J].*农业工程学报*, 2014, 30(14):277-288.
- [28] 王永军,李团胜,刘康,等.榆林地区景观格局分析及其破碎化评价[J].*资源科学*, 2005, 27(2):161-166.
- [29] 任彩凤,程艳妹,郑欣,等.基于均方差决策法的淮北市生态承载力评价[J].*生态科学*, 2019, 38(5):168-177.
- [30] 汤国安,宋佳.基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J].*水土保持学报*, 2006, 20(2):157-160,192.
- [31] 裴欢,魏勇,王晓妍,等.耕地景观生态安全评价方法及其应用[J].*农业工程学报*, 2014, 30(9):212-219.
- [32] 魏小芳,赵宇鸾,朱昌丽,等.岩溶山地城市建设用地扩展的地形梯度特征:以贵阳市为例[J].*湖南师范大学自然科学学报*, 2020, 43(1):22-29.
- [33] 肖以恒,朱晓玥,杨春霞,等.基于 RS 和 GIS 的旗山森林公园景观格局变迁分析[J].*西南林业大学学报*, 2017, 37(4):140-149.
- [34] 简萍,李阳兵,王权.基于地形梯度的典型峰丛洼地区土地利用空间分布格局分析[J].*长江流域资源与环境*, 2020, 29(5):1128-1139.
- [35] 李松,罗绪强.基于 RS 的多数据源的 700 多年来贵阳城市扩展时空特征研究[J].*自然资源学报*, 2014, 29(10):1734-1745.