

汾河流域景观格局脆弱性时空分异特征

付扬军, 师学义, 和娟

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要:为了流域的生态保护修复和可持续发展,其景观格局脆弱性的研究变得尤为重要。以黄土丘陵沟壑区汾河流域为研究对象,通过构建景观格局脆弱度指数,利用质心及标准差椭圆、探索性空间数据分析(ESDA)的方法,对近 25 年来流域景观格局脆弱度时空演变及空间关联性进行了分析。结果表明:(1) 1990—2015 年汾河流域景观格局脆弱度总体上呈现先上升后下降的趋势,脆弱度高的区域空间分布由相对集中变得较为分散;(2) 1990—2015 年景观格局脆弱度质心不断向北移动,标准差椭圆呈“东北—西南”的空间分布格局,脆弱度空间分布越发分散;(3) 研究区各时期景观格局脆弱度全局 Moran's I 表现为一定程度的正相关,且相关程度先上升后下降;(4) 研究区景观格局脆弱度局部空间自相关在 3 个时期发生了明显的变化,高低值区域呈现空间集聚,且分布范围由相对集中转变为较为分散。地形、河流等自然因素影响汾河流域景观格局脆弱性的空间分布;政策导向、社会经济活动等人为因素加速了景观格局脆弱性的变化。

关键词:景观格局脆弱度;时空分布;空间自相关;汾河流域

中图分类号:P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0197-06

Characteristics of Spatial and Temporal Differentiation of Landscape Pattern Vulnerability in Fenhe River Basin

FU Yangjun, SHI Xueyi, HE Juan

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: For the ecological protection and restoration and sustainable development of the river basin, the research on the vulnerability of its landscape pattern becomes particularly important. By constructing the landscape pattern vulnerability index and using the centroid and standard deviation ellipse, using exploratory spatial data analysis method as well, taking the Fenhe River Basin in the Loess hilly and gully region as the study area, we investigated the spatial and temporal evolution and spatial correlation of the landscape pattern fragility in the past 25 years. The results show that: (1) the landscape pattern fragility in the Fenhe River Basin generally demonstrated the increasing trend at first and decreasing trend later, and the spatial distribution of areas with high fragility became more dispersed from relative concentration from 1990 to 2015; (2) the barycentre of landscape pattern fragility moved northward gradually, and the standard deviation ellipse showed the spatial distribution pattern of 'north-southwest', and the spatial distribution of fragility was more dispersed from 1990 to 2015; (3) the Moran's I of the landscape pattern fragility in the study area showed the positive correlation at a certain degree, the correlation degree increased at first and then decreased; (4) the spatial autocorrelation of the landscape pattern fragility in the study area had changed significantly in three periods: the high and low value areas showed spatial agglomeration, and the distribution trend converted to more dispersed pattern from relatively concentrated pattern. Natural factors such as topography and rivers affect the spatial distribution of landscape pattern vulnerability in Fenhe River basin, and human factors such as policy guidance and social and economic activities accelerate the change of landscape pattern vulnerability.

Keywords: landscape pattern vulnerability; spatial and temporal distribution; spatial autocorrelation; Fenhe River Basin.

收稿日期:2019-05-24

修回日期:2019-05-24

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题“北方村庄压煤山丘区土地综合整治技术研究”(201411007)

第一作者:付扬军(1995—),男,山西吕梁人,硕士,主要从事土地资源评价与土地利用规划。E-mail:fuyangjun95@163.com

通信作者:师学义(1960—),男,山西祁县人,博士,教授,主要从事土地利用规划与土地利用工程。E-mail:shixueyi60@163.com

景观格局是许多大大小小的斑块长期相互作用的产物,不同的景观格局对景观上的个体、种群或生态系统的作用差别很大^[1]。景观格局与生态过程密切相关,对于保护自然资源和生物多样性、提高抗干扰能力、维持系统稳定性具有深刻的影响。21 世纪以来,随着科技的进步和社会经济的不断向前发展,在这个过程中伴随着高强度的土地开发与土地利用方式的快速转变,人类对生态过程的干扰日益增强^[2],资源大量消耗、环境容量萎缩、生态欠账问题突出等都对景观格局的研究提出了新要求,在这一背景下开展景观格局脆弱性的研究显得十分必要。国内外已有的研究多集中在对景观格局变化^[3-4]、景观破碎化^[5-6]以及景观生态风险^[7-8]等领域,而对景观脆弱性的研究相对较少。景观格局脆弱性的概念最初源于生态脆弱性,集中体现在景观格局在外界因素影响下受到的干扰及脆弱程度^[9-10]。孙才志等根据生态脆弱性以及景观敏感性等研究成果对景观格局脆弱性做出如下定义:由于景观格局在受到外界扰动时所表现出来的敏感性以及缺乏适应能力从而使景观系统的结构、功能和特性容易发生改变的一种属性^[9],其包含了景观格局在受到外界干扰下所做出的反应和最终受到干扰后的调整适应能力两方面的内涵。景观格局具有时空动态变化的特点,对于景观脆弱性的空间关联性及空间异质性需要进一步的研究,这对景观格局内部空间结构调整和布局优化等具有重要意义。

流域是承载人类社会与自然生态系统重要的地理单元,随着流域生态学的发展,流域尺度的研究受到更多学者的关注^[11-13]。汾河流域作为山西省的母亲河,黄河第二大支流,位于黄土丘陵沟壑区,土地支离破碎,自然条件恶劣,生态环境较脆弱。此外,早先大面积、高强度、不合理的开采矿产资源,造成了地表沉陷和裂缝,土地资源及生态景观破坏,河流断流等生态问题,给原本脆弱的生态环境再添创伤。同时,流域内分布有多个国家级贫困县,在长期的经济社会发展和人口激增的过程中,流域景观格局产生深刻变革,为了流域的生态保护修复和可持续发展,其景观格局脆弱性的研究变得尤为重要。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

汾河是山西境内第一大河流,黄河的第二大支流,山西人民的“母亲河”,自北向南流经忻州市、太原

市、吕梁市、晋中市、临汾市、运城市 6 市的 27 县(市、区),干流全长 716 km,流域面积 39 471 km²,其中流域面积超过 50 km² 的一级支流有 83 条。流域西靠吕梁山、东临太行山,地势北高南低,支流水系发源于两大山系之间,是黄土高原的重要组成部分。区域多年平均(1980—2016 年)天然径流量为 16.2 亿 m³,多年平均气温 13.7~7℃,最大冻土深 60—95 cm,无霜期 230~155 d,褐土是其主要土壤之一。流域内人口 1 266.2 万,国内生产总值占全省的 50% 左右,多年来经济社会发展和人口激增,流域用水量持续增加,加之煤炭开采、植被退化等对水资源的影响,生态环境受到了严重破坏。

1.2 数据来源与处理

本次研究的基础数据源是 1990 年、2000 年、2015 年三期 19 景 Landsat 遥感影像,时相为 5—9 月份,所有影像经过辐射校正、镶嵌、裁剪等图像预处理,运用 ArcGIS 10.3,ENVI 5.3 软件采取监督分类的方式获得三期土地利用解译数据,分为六大景观类型:耕地、林地、草地、建设用地、水域、其他土地。经过野外调查和高分辨率影像检验,总体精度大于 80%,满足本次研究的需要。根据笔者对汾河流域景观格局指数粒度效应的分析,选取 70 m 为最佳分析粒度单元,将土地利用数据统一重采样为 70 m 分辨率大小。

1.3 研究方法

1.3.1 景观脆弱度指数 景观脆弱度指数(LVI)是用来表征景观脆弱性的大小,主要是通过景观敏感度(LSI)和景观适应度(LAI)两方面来体现^[9]。景观敏感度反映了不同景观类型在不同时空条件下对外界干扰的反应程度,与景观脆弱性成正相关,可以通过景观干扰度指数(U)和景观类型易损度指数(V)来构建;景观干扰度指数由破碎化指数(FN)、分维数倒数(FD)、优势度指数(DO)组成,根据相关研究成果^[14],各自权重取 0.5,0.3,0.2;景观类型易损度指数指不同景观类型在外界干扰下容易发生改变的程,综合他人研究成果^[15],将其他土地赋值为 7,林草地为 5,耕地为 3,建设用地和水域为 1。景观适应度是指景观系统在对外界干扰作出敏感性响应后最终的适应调整能力,与斑块丰富密度指数(PRD)、Shannon 多样性指数(SHDI)、Shannon 均匀度指数(SHEI)有关;景观系统多样性越丰富、结构越复杂且越均匀,系统越稳定,适应能力越强,脆弱性越低。

$$LVI=LSI \times (1-LAI) \quad (1)$$

$$LSI=\sum_{i=1}^n U_i \times V_i \quad (2)$$

$$U_i=a \cdot \text{FN}_i+b \cdot \text{FD}_i+c \cdot \text{DO}_i \tag{3}$$
$$\text{LAI}=\text{PRD} \times \text{SHDI} \times \text{SHEI} \tag{4}$$

式中: n 为景观类型数目; i 为景观类型。

本研究将研究区域划分为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 的方形网格,共得到 665 个网格,以各网格为基本单元计算每个网格景观格局脆弱度指数,并将其值赋予网格中心点,运用 Kriging 插值得到三期的景观格局脆弱度空间分布图。

1.3.2 质心及标准差椭圆 质心用来识别一组要素的地理中心;标准差椭圆是用来测量一组数据在空间分布上的趋势,通过判断要素的分布是否为狭长型,使要素的方向趋向更为明确,主要由 3 个要素组成:沿 x 轴标准差、沿 y 轴标准差和方位角。短半轴表征要素的空间分布范围,长半轴表征要素的主要分布方向,长短半轴比值越接近 1 要素空间离散程度越大,反之方向性越明显。具体计算方式参见参考文献[16]。

1.3.3 探索性空间数据分析 采用探索性空间数据分析方法能够通过可视化方式描述数据在空间分布上的格局以及分布模式,在此基础上,深入探索数据在空间的集聚性和异质性。本文采用全局和局部自相关分别探索汾河流域全域和局域的景观格局脆弱度分布规律。

全局空间自相关是用来检验某一要素在整个空间上的分布模式,分为聚集、离散和随机。本研究采用全局 Moran's I 指数来反映研究区脆弱性的空间相关关系。计算公式如下[17]:

$$\text{Global Moran's } I=\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \tag{5}$$

$$S^2=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i-\bar{x})^2, \quad \bar{x}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{6}$$

式中: S^2 为方差; x_i 表示第 i 个单元的观测值; n 为栅格数; W_{ij} 为二进制的邻接空间权重矩阵; $i=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,m$;当区域 i 和区域 j 相邻时, $W_{ij}=1$;当区域 i 和区域 j 不相邻时, $W_{ij}=0$ 。Moran's I 在行标准化下取值 $[-1,1]$ 之间,小于 0 为空间负相关,表示不同属性值的空间单元趋向于聚集在同一区域;等于 0 表示空间单元彼此不相关;大于 0 表示空间正相关,表示相似属性值的空间单元分布趋向于聚集在同一区域。

局部空间自相关是将全局空间自相关分解到各个空间单元上,用以反映整个大区域内,局部小区域上某一要素的属性值与相邻要素之间的空间关联性,

其公式为[18]:

$$\text{LISA}_i=(\frac{x_i-\bar{x}}{S^2}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j-\bar{x}), \quad i \neq j \tag{7}$$

$$S^2=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i-\bar{x})^2, \quad \bar{x}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{8}$$

式中: S^2 为方差; W_{ij} 为空间权重矩阵的元素; x_i, x_j 为经过行标准化后的空间单元。局部 Moran's I 取值范围在 $[-1,1]$,依据 LISA_i 值的正负,空间单元可分为高一高、低一低两种正相关和高一低、低一高两种负相关类型以及不显著 5 种类型,正相关表示相似属性值的面积单元在空间集群现象,负相关表示不相似属性值的面积单元在空间集群。

2 结果与分析

2.1 景观格局脆弱度时空演变

为了更好地可视化景观格局脆弱度空间分布的等级差异,本研究对克里金插值的结果进行了重采样,划分了 5 个等级区域。从表 1 可以看出,3 个时期景观格局脆弱度等级区域整体上都呈现正态分布,中等脆弱度区域所占比例始终高于其他等级。1990 年以较低、中等脆弱度为主,占到流域总面积 70% 以上,脆弱度情况较好;2000 年较高、高脆弱度等级区域的比例明显增加,流域整体景观格局脆弱度呈恶化趋势;2015 年中等脆弱度等级区域增长尤为显著,较高脆弱度等级一直居高不下,但是高脆弱度等级区域的比例又恢复到 1990 年的水平,流域整体景观格局脆弱度情况有所好转。

表 1 不同时期各景观格局脆弱度等级区域占流域面积比例

年份	脆弱度等级				
	低/%	较低/%	中等/%	较高/%	高/%
1990	7.38	33.23	38.58	17.19	3.62
2000	6.20	12.40	36.40	30.01	14.99
2015	2.42	12.64	46.56	34.77	3.61

从图 1 可以看出,1990 年景观格局脆弱度高的区域空间分布相对集中,主要呈带状分布,脆弱度高的区域分布与汾河走向基本一致,大体分布在干流两岸。干流两岸人口分布集中,农业开发和城市化快速发展,耕地和建设用地为优势景观类型,土地开发利用程度高,景观破碎化严重,景观生态系统自稳定性降低,脆弱度较低。2000 年脆弱度高的区域空间分布与流域地形分布具有一致性。地势较低的区域由于土地开发利用程度不断提高,土地利用结构不断优化,景观系统多样性丰富,结构复杂且均匀,这对景观格局脆弱度有缓和的作用;流域的东北、西南、东部以

山地丘陵为主,林草地为主要的景观基质,景观类型易损毁较高,以致景观敏感度提升,景观格局脆弱度较高。2015 年,景观脆弱度不同等级区域占比呈现明显的两头低中间高的分布态势,且空间分布较为分散。脆弱度低的区域主要分布在南部临汾市的尧都区、太原市的市区以及晋中市的榆次市,这些区域是城市化水平高度发达的区域,建设用地分布集中,在中分辨率影像土地利用解译数据中基本呈现一个完整的大的斑块类型,景观破碎化程度低,且景观易损毁度低,从而大大降低了景观格局脆弱度。

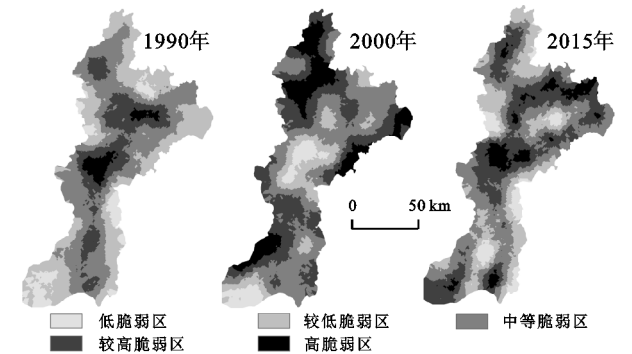


图 1 1990—2015 年汾河流域景观格局脆弱度空间分布

2.2 景观格局脆弱度空间格局变化

以不同等级的景观格局脆弱度网格为研究单元,分别对 1990 年、2000 年、2015 年三期景观格局脆弱度进行质心和标准差椭圆的计算,计算参数见表 2,空间分布态势见图 2。结合图表可以看出,1990—2000 年汾河流域的脆弱度质心总体呈现“东北—西南”的空间分布格局,质心转移距离 29.7 km,受人类活动的影响,质心的位置不断向北移动,且移动方向逐渐由东北向正北转移,这是由于研究区北部分布有省会城市太原,受太原市城市发展及城市辐射效应的影响,人类活动广泛,交通条件便利,使北部许多开发初期不便开发的宜农荒地得到进一步开垦利用,景观破碎化程度加剧,进而使北部景观格局脆弱度有所增加。不同时期脆弱度标准差椭圆以质心为中心,呈现“东北—西南”的空间分布格局。从方位角的变化来看,1990—2015 年,方位角由降低转为升高,表明东北—西南的分布格局由弱化转为了加强,向正东南方向转变。沿 X、Y 坐标轴标准差的变化可以代表标准差椭圆长短半轴的变化,1990—2015 年沿 X 轴标准差不断增加,沿 Y 轴标准差先增加后下降,表明了景观格局脆弱度在 X 轴方向上出现扩散现象且变化趋势明显,在 Y 轴方向上景观格局脆弱度先扩散后出现缩减;且 1990—2015 年短半轴与长半轴的比值不断增大,表明脆弱度空间分布的方向性越发不明显,

数据的离散程度变大,在空间分布上越发分散。

表 2 不同时期各景观格局脆弱度等级区域标准差椭圆参数

年份	沿 X 轴 标准差/m	沿 Y 轴 标准差/m	短长 半轴之比	方位角/ (°)
1990	43529.81984	140389.8603	0.3101	18.02015
2000	55259.90076	156879.8133	0.3522	16.39336
2015	58723.93639	148158.8851	0.3964	22.41238

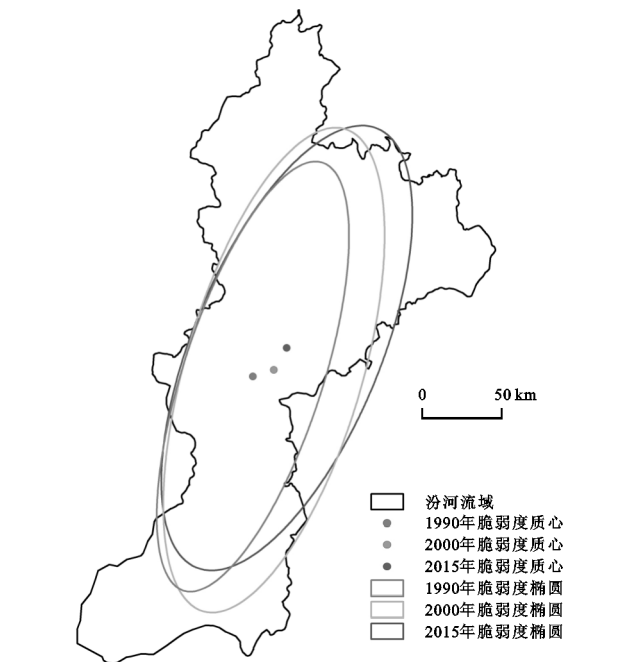


图 2 1990—2015 年汾河流域景观格局脆弱度质心和标准差椭圆动态变化

2.3 景观格局脆弱度空间关联性

2.3.1 全局空间自相关分析 为进一步挖掘景观格局脆弱度的空间分异和聚类特征,利用 GeoDa 1.12 软件计算了 1990—2015 年 3 个时期的景观格局脆弱度全局和局部 Moran's I,得到 3 个时期的全局 Moran's I 散点图(图 3),所有结果均已通过假设性检验,可以用于下一步的分析。从图中可以看出,3 个时期的 Moran's I 分别为 0.390 7,0.408 875,0.320 361。表明:(1) 3 个时期全流域景观格局脆弱度全局空间自相关特征显著,散点大部分位于第 1、3 象限内,表明景观格局脆弱度在空间分布上呈高值—高值、低值—低值的集聚状态,全域空间上表现为脆弱度高的单元彼此趋于相邻,脆弱度较低的单元也趋于集聚。(2) 研究期内全局 Moran's I 均为正,波动中呈上升趋势。1990—2000 年指数增加,说明了全域景观格局脆弱度的差异性逐渐变小,级间联系增强;2000—2015 年指数下降,表明了景观格局脆弱度的差异有所增大,空间集聚性减弱。(3) 就总体而言,25 a 间的 Moran's I 整体降低了,说明了景观格局脆

弱度变化动态平稳且分布变得较为分散。

2.3.2 局部空间自相关分析 全局空间自相关分析中已经判断出 3 个时期的景观格局脆弱度指数在空间分布上具有集聚现象,为了可视化具体体现出某一相邻区域之间的空间关系,进一步开展局部空间自相关分析,得到局部空间自相关 LISA 集群图(图 4)。从图中可以看出,在总体空间分布上,1990—2015 年 3 个时期高一高值与低—低值集聚区分布范围发生了很大的变化,由相对集中转变为较为分散;高低值集聚区相间分布,形成明显的空间集聚。从具体表现来看,1990 年高一高值集聚区主要分布在汾河流域的中游,以吕梁市的汾阳市、孝义市,晋中市的介休市、平遥县为核心;低—低值集聚区主要分布在汾河下游入黄口处以及流域的东南部,以运城市北部各区县、临汾市南部和东部区县为主。高值集聚区城市发展相对滞后,境内林草地覆盖率高,容易受人类活动影响,景观易损度高,景观格局脆弱度相对较高。另外汾河流域中部分布有范围较大的国家级规划矿区汾阳—孝义铝土矿区,长期人类开山凿矿,破坏了区域景观生态系统的稳定性,使其景观格局脆弱度增大;低值集聚区分布范围较大的是在水量较为丰富

的汾河入黄口地区,地势平坦,土壤肥沃,受农业开发和城市发展的影响,大量土地转变为耕地和建设用地,耕地集中连片,建设用地以点状式分布为主,景观生态系统相对稳定,景观类型多样且结构复杂,景观格局脆弱度相对较低。2000 年高一高值集聚区主要分布在汾河上游地区,流域的东北部和西南部也有局部分布,以忻州市静乐县,太原市娄烦县、古交市,临汾市的乡宁县、尧都区,晋中市的西部区县为主;低—低值集聚区主要分布在汾河中游以及下游入黄口处,以吕梁市东部、运城市北部、晋中市西部各区县为核心。西北高值区域处于西山矿区,受国家和山西省发展战略的影响,土地开发利用程度高,景观破碎化严重,加剧了地区景观格局脆弱度,其他高值区域地势相对较高,林草地为主要景观基质,景观易损度高;南部低值区域同 1990 年分布范围基本一致,土地利用变化相对稳定。2015 年,高一高值与低—低值集聚区分布范围较为分散,相对于前两个时期而言,范围较大的集聚区都破碎成小的区域,原来并未集聚的区域出现了新的集聚,一些本是集聚的区域消失。如汾河入黄口处,在 1990 年、2000 年是大范围的低—低值集聚区,目前均已消失,且部分区域转化为了高一高值集聚区。

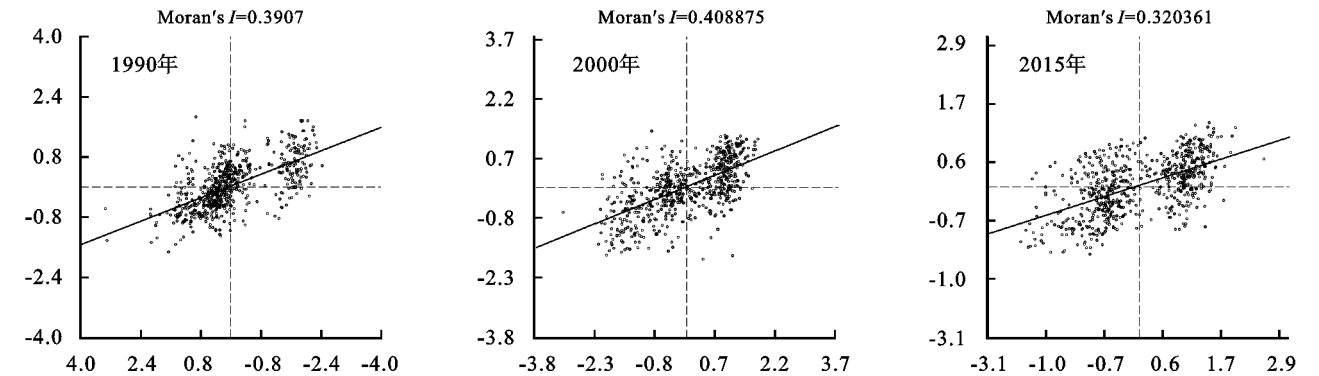


图 3 1990—2015 年汾河流域景观格局脆弱度 Moran's I 散点图

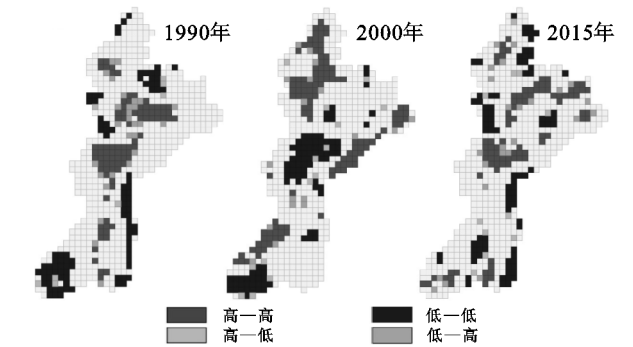


图 4 1990—2015 年汾河流域景观格局脆弱度局部空间自相关 LISA 集群图

3 结论

(1) 1990—2015 年 3 个时期不同等级景观格局脆

弱度区域所占比例呈现正态分布,中等脆弱度区域占流域总面积的比重始终高于其他等级;高脆弱度等级区域面积先增加后减少,表明流域整体景观格局脆弱度情况有所好转。1990 年景观格局脆弱度高的区域空间分布与汾河流域走向基本一致;2000 年脆弱度等级高的区域空间分布与流域地形分布具有一致性;2015 年不同等级景观格局脆弱度空间分布较为分散。

(2) 1990—2015 年质心的位置不断向北移动,3 个时期的脆弱度标准差椭圆呈现“东北—西南”的空间分布格局,且这一分布格局由弱化转向了加强,向正东南方向转变;景观格局脆弱度在 X 轴方向上出现扩散,在 Y 轴方向上先扩散后缩减,且短半轴与长半轴的比值不断增大。

(3) 1990 年、2000 年、2015 年景观格局脆弱度全局 Moran's I 均大于 0, 表明 3 个时期景观格局脆弱度存在正的相关现象; 研究期内全局 Moran's I 波动中呈上升趋势, 散点大部分位于第一、三象限内, 空间分布上表现为高值—高值、低值—低值的集聚状态。

(4) 在总体空间分布上, 1990—2015 年高低值区域形成明显的空间集聚, 且分布范围由相对集中转变为较为分散; 从具体表现来看, 1990 年高一高值集聚区主要分布在汾河的中段, 低—低值集聚区主要分布在汾河下游入黄口处以及流域的东南部; 2000 年高一高值集聚区向西北、西南、东部进行了转移, 低—低值集聚区主要分布在汾河中下游; 2015 年景观格局脆弱度空间分布范围较为分散, 集群分布发生明显的变化。

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] 赵宏飞, 何洪鸣, 白春昱, 等. 黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 49-57.
 - [3] 段翰晨, 王涛, 薛娴, 等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局: 以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 917-928.
 - [4] 曾光, 高会军, 朱刚. 近 40 年来山西省湿地景观格局变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 103-108.
 - [5] 李帅, 马文超, 顾艳文, 等. 宁夏黄河流域景观破碎化时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3312-3320.
 - [6] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 等. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2551-2562.
 - [7] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.
 - [8] 简卿, 张立强, 张蓬涛, 等. 基于显隐性分析的青龙满族自治县景观生态风险评价空间分异研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 228-235.
 - [9] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 247-257.
 - [10] 张金茜, 李红瑛, 曹二佳, 等. 多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2897-2906.
 - [11] 杨海乐, 陈家宽. 流域生态学的发展困境: 来自河流景观的启示[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3084-3095.
 - [12] 梁二敏, 张军民. 新疆玛纳斯河流域景观格局变化的生态安全分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 170-175.
 - [13] 陈希, 王克林, 祁向坤, 等. 湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应[J]. 经济地理, 2016, 36(5): 175-181.
 - [14] 韩振华, 李建东, 殷红, 等. 基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 701-705.
 - [15] 宁静, 张树文, 王蕾, 等. 农林交错区景观敏感性分析: 以黑龙江省牡丹江地区为例[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 35-38.
 - [16] 褚艳玲, 宫之光, 杨志振. 21 世纪以来中国航空货运空间变化研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 335-341.
 - [17] Cliff A D, Ord J K. Spatial Autocorrelation[M]. London: Pion, 1973.
 - [18] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- ~~~~~
- (上接第 196 页)
- [26] 李卓, 张继超, 孙然好, 等. 气候和地形对植被覆盖动态演化的影响研究[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 35-43.
 - [27] 袁兴仁. 评《现代地理学中的数学方法》一书[J]. 地理学与国土研究, 1997(3): 47.
 - [28] 孙晓鹏, 王天明, 邬建国, 等. 北京市 2008 年奥运前后植被覆盖变化趋势[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3133-3140.
 - [29] 夏军, 李璐, 严茂超. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 319-323.
 - [30] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 158-160.
 - [31] 刘涛, 曹广忠. 北京市制造业分布的圈层结构演变: 第一、二次基本单位普查资料的分析[J]. 地理研究, 2010, 29(4): 716-726.
 - [32] 胡云锋, 赵冠华, 张云芝. 北京城市绿化的时空动态分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 332-339.
 - [33] 贾文雄, 陈京华. 1982—2014 年祁连山植被生长季 NDVI 变化及其对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 264-268.
 - [34] 刘洋, 李诚志, 刘志辉. 1982—2013 年基于 GIMM—NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.
 - [35] 刘正才, 屈瑶瑶. 基于 SPOT-VGT 数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 80-87.
 - [36] 李舒婷, 周艺, 王世新, 等. 2001—2015 年内蒙古 NDVI 时空变化及其对降水和气温的响应[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(1): 48-55.