

# 黄土高原人类活动与生物多样性的演变及关联性

王建<sup>1,2</sup>, 赵牡丹<sup>1,2</sup>, 樊艺<sup>1,2</sup>, 李健波<sup>1,2</sup>, 郑春燕<sup>3</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.陕西省遥感与地理信息工程研究中心,  
西安 710127; 3.湖北师范大学 城市与环境学院, 黄石 湖北 435002)

**摘要:**为了科学地分析黄土高原人类活动与生物多样性的关系,对黄土高原生物多样性保护与生态环境质量改善提供科学依据。基于 2000 年、2010 年、2018 年土地利用遥感数据,借助人類活动强度模型测度研究区人类活动强度的时空分异特征,并结合多源遥感数据采用生境质量、物种多样性以及景观格局指数构建综合生物多样性指数,综合运用相关性分析和双变量空间自相关模型,探究了黄土高原人类活动与生物多样性的空间关系。结果表明:(1) 2000—2018 年,黄土高原人类活动强度整体呈减弱趋势,空间上以太原—西安轴线为界,轴线以西的区域人类活动强度偏低,以东的区域人类活动强度偏高;(2) 2000—2018 年黄土高原地区的综合生物多样性指数基本保持稳定,无剧烈变化;生物多样性具有明显空间异质性,呈现出西北高、东部低的空间格局;(3) 2000—2018 年,黄土高原人类活动与生物多样性在空间上呈现显著负相关,二者之间有着显著的空间集聚效应,说明人类活动对黄土高原地区的生物多样性产生较大的负面影响。综上,整个黄土高原生物多样性基本保持稳定,但受人类活动强度影响仍然较大。

**关键词:**人类活动强度;生物多样性;双变量空间自相关;InVEST 模型;黄土高原

中图分类号:X176

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0154-07

## Evolution and Correlation of Human Activities and Biodiversity in the Loess Plateau

WANG Jian<sup>1,2</sup>, ZHAO Mudan<sup>1,2</sup>, FAN Yi<sup>1,2</sup>, LI Jianbo<sup>1,2</sup>, ZHENG Chunyan<sup>3</sup>

(1.School of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710027, China;

2.Shaanxi Remote Sensing and Geographic Information Engineering Research Centre, Xi'an 710027,

China; 3.School of City and Environment, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China)

**Abstract:** In order to scientifically analyse the relationship between human activities and biodiversity in the Loess Plateau, this paper seeks to provide a basis for biodiversity protection and ecological-environmental quality improvement in the Loess Plateau. The paper explores the features of the spatial and temporal differentiation of human activities by the virtue of the intensity model based on the remote sensing data of the land use in 2000, 2010 and 2018. Besides, with the combination of multi-source remote sensing data, the spatial relationship between human activities and biodiversity has been investigated via correlation analysis and bivariate spatial autocorrelation model, adopting the comprehensive biodiversity index constructed by the habitat quality, species diversity and landscape pattern index. The results show that: (1) The intensity of human activities in the Loess Plateau manifests an overall weakening trend between 2000 and 2018, given by the low intensity of human activities conducted in the west region divided by the axis of Taiyuan—Xi'an, whilst the east part takes the opposite. (2) The integrated biodiversity index remains basically stable and unchanged in the Loess Plateau from 2000 to 2018. In addition, the biodiversity obviously evidences the spatial heterogeneity with a spatial pattern of high in the northwest and low in the east. (3) A significant negative correlation in space can be concluded from human activities and biodiversity in the Loess Plateau from 2000 to 2018 which also presents a major spatial agglomeration effect between them, indicating that human activities have had a

收稿日期:2021-09-04

修回日期:2021-09-18

资助项目:国家自然科学基金“梯田对坡度坡长银子的扰动特征研究”(41271284)

第一作者:王建(1995—),男,四川广元人,硕士研究生,研究方向为遥感生态环境监测。E-mail:wang\_jian@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:赵牡丹(1969—),女,陕西富平人,博士,副教授,主要从事土地利用规划和数字地形研究。E-mail:zmudan@nwu.edu.cn

tremendously negative impact on biodiversity in this area. In conclusion, the biodiversity of the Loess Plateau was basically stable, but it was still greatly affected by the intensity of human activities.

**Keywords:** intensity of human activities; biodiversity; bivariate spatial autocorrelation; InVEST mode; Loess Plateau

随着全球工业化、城市化进程的不断加快,人类活动对区域生态系统结构和空间变化产生深远影响,导致全球生物多样性丧失问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。迄今为止,国内外学者围绕人类活动与生物多样性展开大量研究,主要集中在人类活动与生物多样性单方面<sup>[3]</sup>,两者内在关联方面的研究较少。

生物多样性主要是对生物物种及其相应的生存环境所构成的生态系统的统称<sup>[4]</sup>,它不仅为人类生存与发展提供物质条件,而且在气候调节、水土保持以及人与自然平衡相处等方面发挥重要作用<sup>[5]</sup>。目前,国内传统生物多样性评估工作主要是依据 2012 年原环境保护部发布的《区域生物多样性评价标准》<sup>[6]</sup>,以县域为基本单元,通过野生动植物丰富度、生态系统类型多样性、物种特有性、受威胁物种丰富度和外来物种入侵度等指标评估区域生物多样性<sup>[7]</sup>。然而,由于部分县区的统计数据缺乏,其结论在一定程度上与实际分布状况存在偏差。遥感数据因覆盖广、时序性强、可重复性等优势使其在中大尺度生物多样性评估方面得到广泛应用<sup>[8]</sup>,部分学者基于遥感数据提取的生境质量、植被净初级生产力、归一化植被指数、景观格局等指数反映区域生物多样性<sup>[9-10]</sup>。由此可见,本文利用遥感和 GIS 技术对区域生物多样性评估具有可行性。

人类活动是指人类一切可能形式的活动或行为<sup>[11]</sup>,关注和刻画人类活动对于揭示其对区域生态环境的影响具有重要意义。目前,针对人类活动的评价,部分学者采用权重多指标叠加分析方法,如人类足迹指数(Human Footprint Index, HFI)<sup>[11]</sup>、海洋生态系统多尺度空间模型(Multiscale Spatial Model)<sup>[12]</sup>、喀斯特干扰指数(Karst Disturbance Index, KDI)等<sup>[13]</sup>;也有其他学者基于景观与土地利用分析,如陆地表层人类活动强度(Human Activity Intensity of Land Surface, HAILS)<sup>[14]</sup>、景观发展强度指数(Landscape Development Intensity, LDI)等<sup>[15]</sup>。由于人类足迹指数多用于研究自然保护区,海洋生态系统多尺度空间模型、景观发展强度指数以及喀斯特干扰指数则局限于特定地区,陆地表层人类活动强度主要是从土地利用/覆盖与人类活动关系角度客观反映人类活动对陆地表层影响和作用强度<sup>[11]</sup>,该指标自提出后在黄土高

原<sup>[16-17]</sup>、黄河三角洲等<sup>[3]</sup>区域得到广泛运用。因此,本文借助 HAILS 指数表征研究区人类活动。

黄土高原是我国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分,由于人类长时间不适当的活动导致其水土流失严重、生态系统恶化,成为“人—地”关系矛盾最突出、生物多样性受威胁最严重的地区之一<sup>[18]</sup>。探讨自然环境与人类社会的相互关系,对于缓和黄土高原地区人地矛盾和促进区域高质量发展具有重要意义。2000—2018 年研究区人类活动与生物多样性状况如何? 其人类活动与生物多样性是否存在相关性? 为探究以上问题,本文以 2000—2018 年土地利用数据为基础,采用 11 km×11 km 网格作为人类活动基本单元,借助人地活动强度指标反映研究区人类活动,其次利用生境质量、物种多样性及景观格局构建区域综合生物多样性指数,最后运用相关性分析和双变量空间自相关法探究研究区人类活动与生物多样性的空间关系,旨在为保护黄土高原生物多样性以及生态文明建设提供定量、科学的分析结果和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北地区,地处黄河流域中上游,西起祁连山,东迄太行山,北到长城,南抵秦岭(33°43′—41°16′N, 100°54′—114°33′E),面积约为 6.35×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。该地区主要地形包括鄂尔多斯高原、陇中高原、陕甘晋高原、山西高原以及河套平原等,地势西北高、东南低,海拔 1 500~2 000 m,地貌类型复杂多样,土质疏松,极易被侵蚀<sup>[19]</sup>。黄土高原气候受经纬度及地形的影响,具有典型的大陆季风气候特征,年均温在 3.6~4.3℃,多年平均降水量在 150~750 mm。近年来,随着经济的迅速发展,人类活动对该地区的干预不断增强,水土流失、空气污染以及生物多样性减少等<sup>[20]</sup>生态环境问题对黄土高原的生态安全造成严重影响。目前,政府采取退耕还林还草等措施,有效地改善了黄土高原的生态环境质量<sup>[19]</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

遥感影像数据包括:(1) 30 m 分辨率土地利用遥感监测数据(2000 年、2010 年、2018 年)来源于中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc>。

cn)。其中 2000 年、2010 年的数据是由 Landsat-TM/ETM 遥感影像数据解译而成,2018 年数据使用 Landsat 8 OLS 遥感数据解译得到,将土地利用数据重分类为 6 类:未利用地、城乡工矿用地、水域、草地、林地、耕地;(2) 黄土高原 90 m DEM 是利用 Google Earth Engine 云平台下载 SRTM 数据;(3) NDVI, NPP 数据源于 NASA(美国国家航空航天局)网站,采用 MODIS13Q1 和 MODIS17A3H 产品,其空间分辨率为 1 km。借助 MRT 在月数据基础上采用 MVC 方法生成年度 NDVI, NPP 数据。

矢量数据包括:(1) 河流、矢量边界以及居民点数据从全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)的 1:25 万基础数据库获取;(2) 道路交通数据由 OpenstreetMap 网站爬取,并进行合并、裁剪等处理。

### 1.3 研究方法

1.3.1 人类活动强度计算 人类活动强度是指一定地域人类对陆地表层自然覆被利用、改造和开发的程度,这种程度可以通过土地利用/覆被类型反映<sup>[14,16]</sup>。计算公式如下:

$$\text{HAILS} = \frac{S_{\text{CLE}}}{S} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{\text{CLE}} = \sum_{i=1}^n (SL_i \times CI_i) \quad (2)$$

式中:HAILS 为人类活动强度(%); $S_{\text{CLE}}$ 为各种不同土地利用类型面积折算为建设用地的面积; $S$ 为单元格网面积; $SL_i$ 为第  $i$  个土地类型的面积; $CI_i$ 为第  $i$  种土地类型所折算的建设用地系数,其中耕地、草地和城乡工矿用地所折算的建设用地系数分别为 0.4,0.067,1,其余的土地类型所折算的建设用地系数为 0。

### 1.3.2 综合生物多样性指数

(1) 生境质量指数。生境质量(Habitat Quality, HQ)是指生态环境为生物的持续生存提供适当条件的能力,其优劣与生物多样性的丰度呈正相关<sup>[21]</sup>。InVEST 模型是一种量化多种生态系统服务功能的综合评价模型<sup>[22]</sup>,本文运用 InVEST 模型中的“生境质量”模块对黄土高原的生境质量进行评估。计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_{xj} \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2}\right) \quad (3)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^n \sum_{y=1}^{Y_r} \frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^n \omega_r} r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (4)$$

式中: $Q_{xj}$ 为第  $j$  种土地类型中第  $x$  栅格的生境质量,生境质量值为 0~1,其值越高表示生境质量越好; $D_{xj}$ 为生境退化度; $H_{xj}$ 为第  $j$  种土地类型中第  $x$  栅

格的生境适应性; $k$ 为半饱和常数; $\omega_r$ 为不同威胁因子的权重; $r_y$ 为不同威胁因子强度; $\beta_x$ 为生境抗干扰水平; $S_{jr}$ 为不同生境对不同威胁因子的相对敏感程度; $i_{rxy}$ 为栅格  $y$  中的威胁因子  $r$  对栅格  $x$  的影响; $r$  为生境威胁因子; $y$  为威胁因子  $r$  中的栅格; $Y_r$  为威胁源栅格总数。

(2) 归一化植被指数和植被初级净生产力。归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可以准确地表征植被生长以及覆盖状况等信息<sup>[23]</sup>。部分学者认为 NDVI 等植被指数与植物多样性存在显著相关性<sup>[24]</sup>。植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)反映了植被在自然环境下的生产能力,有学者发现 NPP 越高,生物多样性相对较高<sup>[25]</sup>。因此本文选取最大值合成法

得到年度 NDVI, NPP 值。计算公式如下:

$$S_j = \max(S_1, S_2, \dots, S_{12}) \quad (5)$$

式中: $i$ 为年份,本文取值为 2000 年、2010 年、2018 年; $S_j$ 为第  $j$  年 NDVI, NPP 最大值; $S_1, S_2, \dots, S_{12}$ 为 1—12 月份的 NDVI, NPP 值。

(3) 景观格局指数。近年来,景观格局指数在生态环境研究中得到广泛应用,已有研究结果发现部分景观格局指数与区域生物多样性呈显著正相关<sup>[10]</sup>,因此本文选取 SHDI, LSI 两种景观格局指数表征区域生物多样性。

(4) 综合生物多样性指数构建。本文拟从生境质量指数、物种多样性指数以及景观格局指数等方面,并基于层次分析法,构建黄土高原区域综合生物多样性指数。计算公式如下:

$$BI_i = 0.45 \text{HQ}_i + 0.15 \text{NDVI}_i + 0.2 \text{NPP}_i + 0.1 \text{SHDI}_i + 0.1 \text{LSI}_i \quad (6)$$

式中: $BI_i$ 为第  $i$  年区域综合生物多样性指数; $\text{HQ}_i, \text{NDVI}_i, \text{NPP}_i, \text{SHDI}_i, \text{LSI}_i$  分别为区域第  $i$  年的生境质量、归一化植被指数、植被净初级生产力、香浓多样性指数和景观形状指数;0.45,0.15,0.2,0.1,0.1 为利用层次分析法得到的各指标权重。

### 1.3.3 双变量空间自相关

(1) 双变量全局自相关。双变量全局自相关是指在整体上反映该研究区内的地理要素空间分布特征及集聚状况。通常用 Moran's  $I$  指数进行表示。计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中:  $X_i, X_j$  分别为单元格网内人类活动强度和综合生物多样性指数;  $n$  为格网数;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵;  $\bar{x}$  为人类活动强度和综合生物多样性指数平均值。  $I \in [-1, 1], I > 0$  表示空间正相关, 即两个变量趋于集聚;  $I < 0$  表示空间负相关, 即两个变量趋于负相关;  $I = 0$  表示无相关性, 即随机分布。  $|I|$  越大表示相关性越强。

(2) 双变量局部自相关。双变量局部自相关表示研究区域内的相邻地要素在空间分布的相关性与差异性。通常用局部自相关(LISA)进行表示。其公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{i,j} (x_j - \bar{x}) \quad (8)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (9)$$

式中:  $X_i, X_j$  分别为单元格网内人类活动强度和综合生物多样性指数;  $n$  为格网数;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵;  $\bar{x}$  为人类活动强度和综合生物多样性指数平均值。

表 1 2000—2018 年黄土高原人类活动强度分级

等级 类型	分级 标准/%	2000 年		2010 年		2018 年	
		面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
高	>50	29887	4.53	9922	1.50	14641	2.22
较高	35~50	74778	11.32	61831	9.36	62799	9.51
中等	20~35	227117	34.40	180169	27.29	187066	28.33
较低	8~20	172546	26.13	229295	34.73	221914	33.61
低	≤8	155969	23.62	179080	27.12	173877	26.33

从空间尺度(图 1)上看, 黄土高原人类活动强度以太原—西安轴线为界, 轴线以西的区域人类活动强度偏低, 主要以中等为主, 以东的区域人类活动强度偏高, 主要以较高为主。高人类活动强度区域占比较少, 为 2%~5%, 主要分布在西安、太原以及洛阳等地区, 由于这些地区自然环境相对优越, 人类活动相对频繁, 对环境的干扰强度也较高; 较高人类活动强

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土高原人类活动强度时空特征

从时间尺度来看, 黄土高原人类活动强度总体呈现减弱趋势, 主要得益于政府的退耕还林、还草政策以及生态文明建设战略的深入贯彻实施。其人类活动强度以 2010 年为界, 2000—2010 年人类活动强度变化较大, 其均值从 21.03% 降至 17.93%。2010—2018 年期间研究区人类活动强度变化较小, 其平均值基本保持稳定。

根据人类活动强度(表 1)划分等级可知, 2000—2018 年人类活动强度主要以中和较低等级为主, 其中 2010 年以前人类活动强度为中等为主, 2010 年以后较低等级成为主要类型。人类活动强度高等级区域出现“V”的波动变化, 2000—2010 年人类活动干扰强度大幅度降低, 2010—2018 年, 人类活动强度呈现增强的变化趋势; 较低等级、低等级区域面积都呈现增长的趋势; 中等级、较高等级区域都略微的减少。

度地区占比为 9%~11%, 主要分布在关中平原、汾渭盆地以及豫北地区; 中等人类活动强度区域占比在 27%~35%, 主要分布在黄土丘陵沟壑以及平原谷等地区; 较低和低人类活动强度区域占比最高, 一直保持在 50% 以上, 主要分布在青藏高原东部以及内蒙古高原的毛乌素沙漠地区, 土地利用类型主要以林、草地为主。

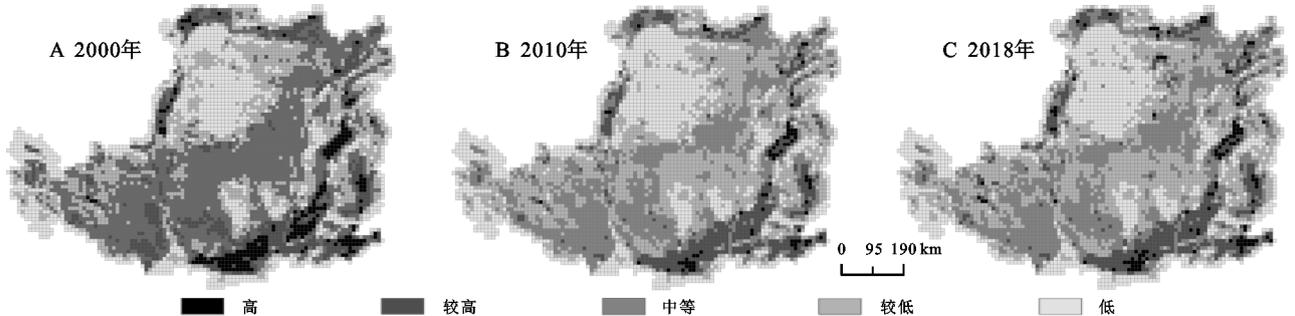


图 1 2000—2018 年黄土高原人类活动强度空间分布

### 2.2 黄土高原生物多样性时空分布特征

从时间尺度(表 2)上来看, 2000—2018 年黄土高原地区的综合生物多样性指数略有增加, 其平均值从

0.529 增加到 0.557。其中高值地区范围不断扩大, 面积比重由 27.91% 增加至 38.58%; 低值地区面积比重由 2000 年的 11.32% 减少至 2018 年的 7.55%, 表明黄土高

原生物多样性两极分化趋势显著,其主要是因退耕还林还草、生态文明建设以及黄河流域高质量发展战略等的实施,极大地提高黄土高原的生态环境质量。整体而言,黄土高原生物多样性呈现增长趋势,但是低和一般值区域面积占比仍然在 40% 以上,表明黄土高原生物多样性保护与生态修复工作依然较严峻。

表 2 2000—2018 年黄土高原生物多样性分级

生物多样性	分级标准	面积比重/%		
		2000 年	2010 年	2018 年
低	$\leq 0.35$	11.32	9.28	7.55
一般	$0.35 \sim 0.5$	30.26	31.23	32.07
中	$0.5 \sim 0.65$	30.50	25.39	21.79
高	$> 0.65$	27.91	34.10	38.58

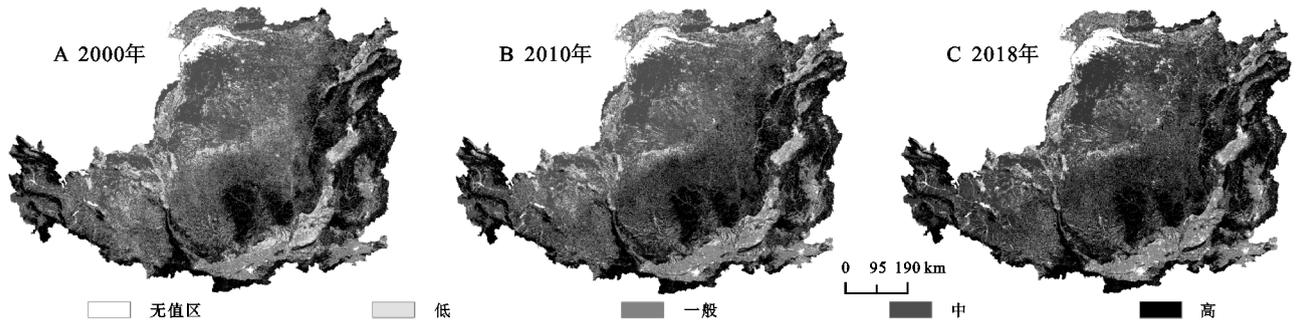


图 2 2000—2018 年黄土高原生物多样性分布

## 2.3 黄土高原人类活动强度与生物多样性关系

2.3.1 人类活动强度与生物多样性相关性 根据 2000—2018 年黄土高原人类活动强度与综合生物多样性指数相关系数可知,研究时期内二者始终保持着中度负相关,且相关分析结果均具有统计意义 ( $p < 0.01$ )。两者间的  $R^2$  呈现上升趋势,说明黄土高原地区人类活动与生物多样性具有一定的相关性,且二者间相关性逐渐增强。

2.3.2 人类活动强度与生物多样性全局自相关 从分析结果(图 3)得到 2000—2018 年黄土高原地区人类活动强度与综合生物多样性空间关系整体较稳定,

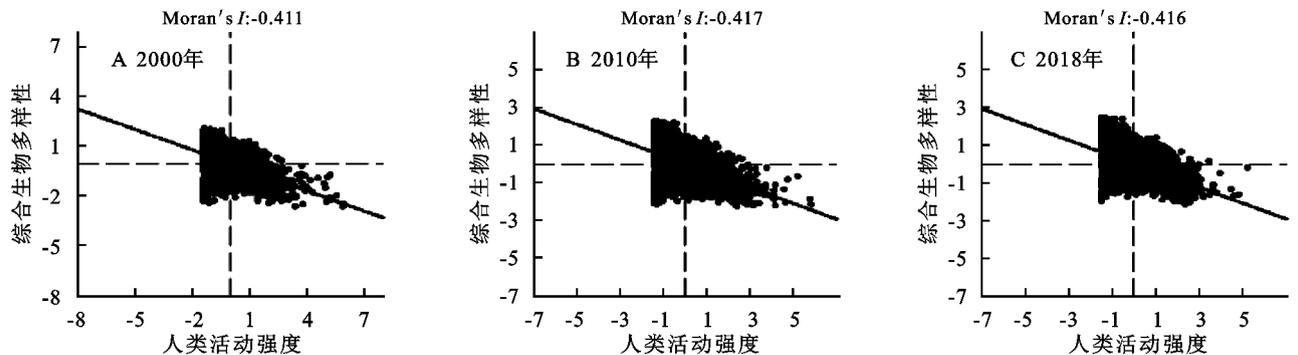


图 3 2000—2018 年黄土高原人类活动与综合生物多样性全局自相关结果

2.3.3 人类活动强度与生物多样性局部自相关 2000—2018 年黄土高原地区人类活动强度与景观生

从空间尺度(图 2)上看,黄土高原生物多样性空间分异明显,呈现出西北高、东部低的分布特征,主要以一般、高等级为主。其中高值区域主要集中在黄土高原的中部晋中—陕北—甘东丘陵地区以及东部太行—吕梁山区,这些地区生物种类丰富、植被生长相对较好、生境质量较高且生态系统多样;生物多样性中值地区主要以草地为主,主要分布在内蒙古高原南部地区;低和一般值区域分布范围广,面积占比为 40% 左右,主要集中在关中平原、陕北高原地区、豫北地区、晋北地区、河套平原以及甘东丘陵地区,这些地区的用地类型主要为建设用地,人类活动较频繁,生态环境相对脆弱,景观破碎度高,生境质量差,生物多样性较低。

其 Moran's  $I$  指数分别为  $-0.411$ ,  $-0.417$ ,  $-0.416$ , 且在 99% 置信区间内显著。2000—2018 年,黄土高原地区的生物多样性与人类活动强度在空间上呈现显著负相关,表明人类活动强度的增加会导致黄土高原地区的生物多样性水平下降。双变量全局自相关结果显示研究区人类活动与生物多样性之间有着显著的空间集聚效应,这表明 2000—2018 年西安市、兰州市、银川市、太原市、鄂尔多斯市等城市的快速扩张,对黄土高原地区的生物多样性产生较大的负面影响。研究时期内黄土高原 Moran's  $I$  虽具有相关关系,但其绝对值呈上升趋势,这与上述相关分析结论相符合。

物多样性局部自相关结果(图 4)表明,研究时期内,低—高类型(低人类活动强度和高生物多样性类型

区域)是黄土高原地区的主要类型区域,主要位于渭北台塬地区以及山西省的吕梁山、太行山大部分区域,这些地区人类活动偏低、植被生长状况相对较好、生境质量较高,动植物类型多样;高一低类型区域(高人类活动强度和低景观生物多样性区域)主要分布在西安—太原带型区域、豫北地区、河套平原、兰州—银川的城市发展轴带区域,这些区域自然环境优越,人类活动频繁,对区域多样性影响也相应的较大;

高一高类型区域(高人类活动强度和高生物多样性区域)主要分布在西安—太原带型轴带的外围城郊区,主要是由于大城市的城乡结合区,城市的建设活动相对较多,其生态环境并未受到太大的影响,生物多样性质量依然较高;低—低类型(低人类活动强度和低生物多样性区域)分布相对较少,其主要位于黄土高原北部的鄂尔多斯市的南部地区以及宁夏平原的边缘地区。

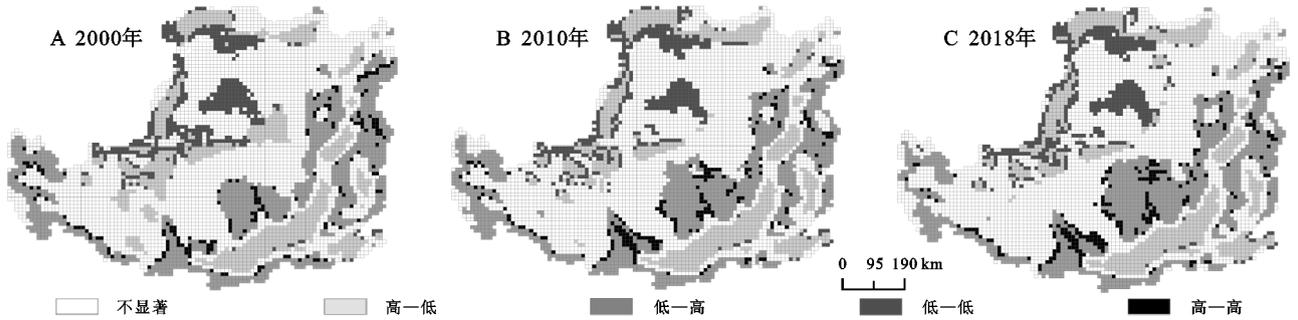


图 4 2000—2018 年黄土高原人类活动与综合生物多样性空间 LISA 图

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

3.1.1 黄土高原生物多样性变化和影响因素 黄土高原地区的综合生物多样性时空分异特征具有一定的规律,低值区域分布范围广,主要分布在关中平原、陕北高原地区、豫北地区、晋北地区、河套平原以及甘肃丘陵地区;高值区域主要集中在黄土高原的中部晋中—陕北—甘东丘陵地区以及东部太行—吕梁山区,这与黄土高原植被覆盖<sup>[23]</sup>、太行山优先保护区<sup>[26]</sup>基本一致,说明综合生物多样性指标能够较客观地表征区域生物多样性状况。但由于评价区域时空尺度不同,生物多样性评价指标也不尽相同,目前尚未形成统一的区域生物多样性评价方法<sup>[5]</sup>。如谢宇初等<sup>[5]</sup>利用生境质量、植被净初级生产力以及景观状态指数构建区域生物多样性指数;杨渺等<sup>[7]</sup>仅利用景观多样性(SHDI)表征四川省生物多样性等。

根据 2018 年黄土高原生物多样性与自然因素的相关性分析发现,黄土高原生物多样性与气温、降水以及坡度在 95% 置信区间内显著相关,其相关系数分别为 0.281, 0.463, 0.584。二者之间符合线性相关,且降水和坡度呈现出逐渐增加趋势,说明黄土高原的生物多样性一定程度上受到气候和地形的影响。因此,在今后研究中,应该会结合研究区实际情况,增加气候、地形等因素,进一步完善区域生物多样性评价体系。

3.1.2 黄土高原人类活动强度的影响因素 本文以格网为研究单元,与前人采用县域为单元得到黄土高

原人类活动强度的结果基本一致<sup>[16-17]</sup>。但本文可以充分反映行政单元内部人类活动的空间分异,更好地研究人类活动对区域生态环境的影响。

研究区人类活动强度时空分异特征受到自然、社会经济及国家政策等因素的影响<sup>[16]</sup>。由于国家政策因素难以用数据表示,本研究从地形、交通方面分析其对黄土高原人类活动强度的影响。研究区人类活动强度空间格局与地形格局、交通分布格局具有一定的相关性。关中平原、汾渭盆地以及豫北地区地形平坦、交通便利和社会经济发展较好,建设用地面积大于其他地区,人类活动强度较高;青藏高原东部丘陵、黄土高原丘陵沟壑等地区地形起伏较大,生态环境脆弱,交通网络密度和建设用地面积较小,人类活动强度较低。

### 3.2 结论

(1) 时间尺度上,2000—2018 年,黄土高原人类活动强度总体呈现减弱趋势。2000—2010 年研究区人类活动强度变化较大,人类活动强度的平均值从 21.03% 降至 17.93%,2010—2018 年期间研究区人类活动强度变化较小,其平均值基本保持不变;空间尺度上,以太原—西安轴线为界,轴线以西的区域人类活动强度偏低,主要以中等为主,以东的区域人类活动强度偏高,主要以较高为主。

(2) 2000—2018 年黄土高原地区的综合生物多样性指数基本保持稳定,无剧烈变化,其平均值从 0.529 增加到 0.557;生物多样性空间分异明显,呈现出西北高、东部低的空间分布特征,主要以一般、高等级为主。

(3) 2000—2018年,黄土高原人类活动与生物多样性在空间上呈现显著负相关,表明人类活动对黄土高原地区的生物多样性产生较大的负面影响;二者之间有着显著的空间集聚效应,其中低—高类型(低人类活动强度和高生物多样性类型区域)是黄土高原地区的主要类型区域。

#### 参考文献:

- [1] Borie M, Gustafsson K M, Obermeister N, et al. Institutionalising reflexivity: Transformative learning and the Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) [J]. *Environmental Science & Policy*, 2020, 110: 71-76.
- [2] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].*地理研究*, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [3] 朱纹君,韩美,孔祥伦,等.1990—2018年黄河三角洲人类活动强度时空格局演变及其驱动因素[J].*水土保持研究*, 2021, 28(5): 287-292.
- [4] 杨海军,李营,洪运富,等.县域尺度生物多样遥感监测与评价研究[J].*遥感技术与应用*, 2015, 30(6): 1138-1145.
- [5] 谢余初,巩杰,齐姗姗,等.基于综合指数法的白龙江流域生物多样性空间分异特征研究[J].*生态学报*, 2017, 37(19): 6448-6456.
- [6] 李咏红,香宝,袁兴中,等.成渝经济区生物多样性空间分异特征[J].*环境科学研究*, 2012, 25(10): 1148-1154.
- [7] 杨渺,肖焱,欧阳志云,等.四川省生物多样性与生态系统多功能性分析[J].*生态学报*, 2021, 41(24): 9738-9748.
- [8] 胡海德,李小玉,杜宇飞,等.生物多样性遥感监测方法研究进展[J].*生态学杂志*, 2012, 31(6): 1591-1596.
- [9] 谢余初,巩杰,张素欣,等.基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J].*地理科学*, 2018, 38(6): 979-986.
- [10] 林世滔,谢弟炳,刘郁林,等.景观格局特征与区域生物多样性的关系研究[J].*生态环境学报*, 2017, 26(10): 1681-1688.
- [11] 刘世梁,刘芦萌,武雪,等.区域生态效应研究中人类活动强度量化评价[J].*生态学报*, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [12] Ze H, Yuan H, Wang L, et al. Modeling spatial layout for scene image understanding via a novel multiscale sum-product network[J].*Expert Systems With Applications*, 2016, 63: 231-240.
- [13] Johanna L K, Philip E V B. Application of the Karst Disturbance Index as a raster: based model in a developing country[J].*Applied Geography*, 2015, 63: 396-407.
- [14] 徐勇,孙晓一,汤青.陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用[J].*地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [15] Guo Z, Zhang M. The conservation efficacy of coastal wetlands in China based on landscape development and stress[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 175: 70-78.
- [16] 赵亮,刘宇,罗勇,等.黄土高原近40年人类活动强度时空格局演变[J].*水土保持研究*, 2019, 26(4): 306-313.
- [17] 徐小任,徐勇.黄土高原地区人类活动强度时空变化分析[J].*地理研究*, 2017, 36(4): 661-672.
- [18] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J].*水土保持研究*, 2017, 24(5): 63-68.
- [19] 王欢欢,赵杰,岳超,等.黄土高原植被恢复对地表的冷却作用及变化规律[J].*水土保持学报*, 2021, 35(3): 214-220.
- [20] 周亮,唐建军,刘兴科等.黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响:以兰州、西安—咸阳及太原为例[J].*应用生态学报*, 2021, 32(1): 261-270.
- [21] 朱增云,阿里木江·卡斯木.基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J].*生态学杂志*, 2020, 39(10): 3408-3420.
- [22] 刘冠,李国庆,李洁,等.基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J].*干旱区研究*, 2021, 38(1): 267-274.
- [23] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等.黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J].*中国环境科学*, 2021, 41(8): 3832-3841.
- [24] 何荣晓,雷金睿,杨帆.遥感植被指数与植物多样性的相关性及其空间分布特征研究:以海口市主城区为例[J].*广西植物*, 2021, 41(3): 351-361.
- [25] Lausch A, Bannehr L, Beckmann M, et al. Linking earth observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 317-339.
- [26] 万华伟,王永财,侯鹏,等.2001—2016年中国生物多样性保护优先区域植被和水域动态监测与分析[J].*生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 273-282.