

2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 时空演变及其与人口密度的相关性

徐勇, 赵纯, 窦世卿, 郝文强, 郑志威, 靖娟利

(桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 分析 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 时空演变特征和人口密度变化的冷热点变迁格局, 探究环渤海地区植被 NDVI 对人口密度变化的响应特征, 揭示环渤海地区植被 NDVI 和人口密度重心的迁移轨迹, 为该地区植被监测和管理, 以及生态环境保护提供理论依据。[方法] 以 2000—2020 年 MODIS NDVI 和 Population Density 时间序列为数据源, 采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、格兰杰因果关系检验、Getis-Ord G_i^* 分析和重心转移模型等方法。[结果] ①2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 整体呈上升趋势, 上升斜率为 0.022/10 a, 且植被 NDVI 上升区域面积远大于下降区域面积。2000—2010 年植被 NDVI 上升速率明显高于 2010—2020 年植被 NDVI 上升速率。②2000—2020 年环渤海地区人口密度变化热点区和冷点区所占比例分别为 11.26% 和 46.84%, 人口密度变化以冷点区为主, 冷点区主要呈条带状从环渤海地区东北部延伸至西北部, 以及山东省东南部分地区。③环渤海地区人口密度对植被 NDVI 存在单向格兰杰原因, 人口密度的改变是引起植被 NDVI 变化的格兰杰原因, 而植被 NDVI 的变化不是造成人口密度改变的格兰杰原因。整体上, 人口密度的增长对区域植被 NDVI 的影响主要为负向效应, 人口集聚程度越高的区域, 植被 NDVI 下降越显著。④2000—2020 年的植被 NDVI 重心迁移方向无明显空间模式, 但总体向西北方向迁移, 人口密度重心整体呈东南至西北方向迁移。[结论] 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 整体呈上升趋势。人口密度的增长对植被 NDVI 变化具有负向影响。综合考虑人口密度变化和气候变化对环渤海地区植被 NDVI 变化的影响有待进一步研究。

关键词: 环渤海地区; 植被 NDVI; 人口密度; 热点分析; 热点区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0264-11

中图分类号: Q948, X171

文献参数: 徐勇, 赵纯, 窦世卿, 等. 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 时空演变及其与人口密度的相关性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 264-274. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.036; Xu Yong, Zhao Chun, Dou Shiqing, et al. Dynamic variation of vegetation cover and its relationship with population density in Bohai Rim region during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 264-274.

Dynamic Variation of Vegetation Cover and Its Relationship with Population Density in Bohai Rim Region During 2000—2020

Xu Yong, Zhao Chun, Dou Shiqing, Hao Wenqiang, Zheng Zhiwei, Jing Juanli

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: [Objective] The response characteristics of vegetation NDVI to population density change were explored to reveal the migration track of vegetation NDVI and population density center of gravity in the Bohai Rim region, in order to provide a theoretical basis for vegetation monitoring and management and ecological environment protection in the region. [Methods] Based on the MOD13A3 NDVI and population density time series from 2000 to 2020, the methods of Theil-Sen Median analysis, Mann-Kendall significance test, Granger causality test, Getis-Ord G_i^* analysis, and center of gravity transfer model were used to study

收稿日期: 2021-09-22

修回日期: 2021-11-21

资助项目: 广西自然科学基金项目“气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被覆盖变化相对作用研究”(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室基金课题“西南喀斯特地貌区植被 NPP 时空演变格局及其影响因素研究”(191851016); 国家自然科学基金项目(42061059)

第一作者: 徐勇(1988—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 讲师, 博士, 主要从事气候变化和植被 NDVI 反演的研究。Email: yongxu@glut.edu.cn.

通讯作者: 窦世卿(1977—), 女(汉族), 河北省定州市人, 博士, 教授, 主要从事三维 GIS 与遥感技术应用方面的研究。Email: doushiqing@glut.edu.cn.

the spatio-temporal variation of vegetation cover and the hotspot variation of population density. [Results] ① from 2000 to 2020, NDVI in the Bohai Rim region showed an upward trend, with an upward slope of 0.022/10 a, and the area of NDVI rising was much larger than that of falling area. The rising rate of NDVI from 2000 to 2010 was significantly higher than that from 2010 to 2020. ② From 2000 to 2020, the proportion of hot spots and cold spots in the change of population density in the Bohai Rim region was 11.26% and 46.84% respectively. The change of population density was mainly in the cold spot region, which mainly extended in strips from the northeast of the Bohai Rim region to the northwest and some areas in the southeast of Shandong Province. ③ There was a one-way Granger cause of population density on NDVI around the Bohai Sea. The change of population density was the Granger cause of the change of NDVI, while the change of NDVI was not the Granger cause of the change of population density. On the whole, the growth of population density mainly had a negative effect on regional NDVI. The higher the degree of population agglomeration, the more significant the decline of NDVI. ④ There was no obvious spatial pattern in the migration direction of NDVI center of gravity of vegetation from 2000 to 2020, but it generally migrated to the northwest, and the center of gravity of population density migrated from the southeast to the northwest. [Conclusion] From 2000 to 2020, the NDVI in the Bohai Rim region shows an upward trend. The increase of population density has a negative impact on the change of NDVI. Further study needs to be conducted considering the impact of population density change and climate change on NDVI change in the Bohai Rim region.

Keywords: Bohai Rim region; NDVI; population density; Getis-Ord G_i^* analysis; hot spots

环渤海地区横跨湿润区、半湿润区和半干旱区,其环境具有空间上的复杂性和时间上的易变性,是中国乃至全球气候变化的敏感区和脆弱区之一^[1-3],该地区经济发达,城市化程度较高,植被受人类活动干扰强烈并表现出明显的双重作用。一方面,人类活动对植被生长具有负向影响,主要表现为城市建筑用地扩张和居民生活住宅区域逐年扩大,占用农业和林业用地导致植被面积缩减,对植被生态系统演替具有抑制作用^[4-5];另一方面,人类活动对植被生长具有正向影响,环渤海地区处于三北防护林子区域,积极开展一系列卓有成效的生态林业工程。如三北防护林工程、京津风沙源治理工程、退耕还草还林以及小流域综合治理工程等,显著提升了区域内植被覆盖程度^[6-9]。植被 NDVI 变化与区域人类活动的相互作用及其反馈机制成为近年来研究的热点主题之一。Zheng 等^[9]、冯国艳等^[10]、梁守真等^[11]和杜佳梦等^[12]研究发现城市扩张和人口密度增加与京津冀地区、长江三角洲地区、西南地区和内蒙古中西部地区部分植被 NDVI 呈负相关关系。同时 Hu 等^[7]、冯国艳等^[10]和 He 等^[13]发现退耕还林、植树造林以及石漠化治理等生态治理工程是三北防护林地区、西南地区以及黄土高原植被覆盖状况改善的重要因素。韩贵锋等^[14]进一步探究人为因素对植被活动的影响,发现植被生长与人口、GDP 和城市化率之间均呈显著的负相关关系。梁守真等^[11]除发现城市扩张导致部分区域的植被 NDVI 降低以外,还发现人类农业生产提高了区域内部分植被 NDVI,且降水与环渤海

地区植被 NDVI 变化具有密切关系。以上研究探讨了不同地区植被 NDVI 与人类活动之间的关系,但环渤海植被 NDVI 与人口密度的时空耦合机制及定量关系有待进一步厘清。因此,本文以环渤海地区为研究区,基于 2000—2020 年 MOD13A3 NDVI 和人口密度数据时间序列,利用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Getis-Ord G_i^* 分析和重心转移模型等研究方法,分析 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 时空演变特征和人口密度的冷热点变迁格局,探究环渤海地区植被 NDVI 对人口密度变化的响应特征,揭示环渤海地区植被 NDVI 和人口密度变化重心轨迹的转移方向。研究成果可为环渤海地区植被监测和管理,以及生态环境保护提供理论依据。

1 研究区概况

环渤海地区以“C”字形环抱渤海,包括三省两市,即辽宁省、山东省、河北省、天津市以及北京市,位于 34°22′—43°28′N, 113°26′—125°52′E。气候类型为温带季风气候,主要植被带为暖温带落叶阔叶林带。地形主要以平原、丘陵和山地为主,整体上地势呈东南低西北高的分布格局。环渤海地区是中国最为发达的经济区之一,基础设施完善,自然资源丰沛,工业基础扎实,科技实力雄厚。2019 年环渤海地区年末总人口约 2.6 亿(2020 年统计年鉴),约占全国总人口的 18.38%,为中国人口最为稠密的地区之一,尤其是北京市和天津市,不仅是中国政治、经济和文化中

心,2020 年人口密度分别高达 1 334 和 1 158 人/km², 分别居全国第 2 和第 3 位,而山东省和河北省为中国人口大省,人口总量分居全国第 2 和第 6(第 7 次人口普查数据)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所使用 MODIS NDVI 数据来源于 NASA MODIS 陆地产品组发布的植被指数产品 MOD13A3,该产品时间分辨率为每月,空间分辨率为 1 km,时间跨度从 2000 年 2 月至 2020 年 12 月,该数据已经经过大气校正,去除了水、云、重气溶胶和云影的影响。本文通过对得到的每期 MOD13A3 数据集进行影像镶嵌、重采样、投影转换、数据格式转换、最大值合成等预处理,生成 2000—2020 年覆盖中国全境的年最大值植被 NDVI 时间序列,然后通过裁剪得到环渤海地区植被年最大合成 NDVI 时间序列。2000 年 1 月植被 NDVI 数据缺失。由于 1 月为冬季,植被 NDVI 较低,故本文使用最大值合成法得到年最大合成植被 NDVI,缺失月份不会对本文研究结果产生影响。人口密度数据来源于 WorldPop 发布的 Population Density 数据,时间分辨率为每年,空间分辨率为 1 km,时间跨度为 2000—2020 年。人口密度数据需要经过镶嵌、投影转换、图像裁剪和重采样等预处理,裁剪得到 2000—2020 年环渤海地区人口密度时间序列。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验 本文采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验^[15],分析环渤海地区 2000—2010 年、2010—2020 年和 2000—2020 年植被 NDVI 时空演变特征及其变化的显著性。Theil-Sen Median 趋势分析是一种非参数统计的趋势分析方法,可以有效去除离散值和异常值对趋势结果的影响,常被用于探究长时间序列数据的变化趋势。

Theil-Sen median 趋势分析计算公式为:

$$\beta_{\text{NDVI}} = \text{median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right), \quad (1)$$

$$2000 \leq i < j \leq 2020$$

式中:NDVI_{*i*}, NDVI_{*j*} 分别表示第 *i* 和第 *j* 年的植被 NDVI 值; β_{NDVI} 代表植被 NDVI 的变化斜率,当 $\beta_{\text{NDVI}} > 0$ 时,表示在研究时间段内植被 NDVI 呈上升趋势,植被覆盖有所增加;当 $\beta_{\text{NDVI}} = 0$ 时,表示在研究时间段内植被 NDVI 基本保持不变,植被覆盖较为稳定;当 $\beta_{\text{NDVI}} < 0$ 时,表示在研究时间段内植被

NDVI 呈下降趋势,植被覆盖有所减少。

Mann-Kendall 显著性检验是稳健的非参数统计方法,不需要方差正态性假设,在一定程度上避免异常值对分析结果的影响。本文利用 Mann-Kendall 显著性检验来判断植被 NDVI 时间序列变化趋势的显著性。具体公式为:

给定 NDVI 时间序列:

$$\{\text{NDVI}_i\}, \quad i = 2000, 2001, 2002, \dots, 2020 \quad (2)$$

计算检验统计量 *S*:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

符号函数 sgn:

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

计算方差:

$$\text{var}(S) = \{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)\} \quad (5)$$

定义标准化统计量 *Z*:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

按照 Mann-Kendall 显著性检验的检验统计量 *Z* 值,将植被 NDVI 变化趋势分成 4 个等级:显著下降、不显著下降、不显著上升和显著上升。当 $|z| > 1.96$ 即置信水平为 95%^[16]下,为显著变化,当 $0 < |z| < 1.96$,为不显著变化。

2.2.2 空间关联指数 Getis-Ord G_i^* 分析 Getis-Ord G_i^* 分析可以识别一定空间范围内地理要素的高值空间聚集(热点区)和低值空间聚集(冷点区)的分布状况^[17]。本文用来探究 2000—2010 年、2010—2020 年和 2000—2020 年环渤海地区人口密度动态变化的空间集聚性,分析环渤海地区人口密度变化冷点区和热点区的空间演变格局。计算公式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (7)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (8)$$

式中: $G_i^*(d)$ 的得分为 $Z(G_i^*)$ 的统计; $Z(G_i^*)$ 表示人口密度的显著性; $E(G_i^*)$ 为 $G_i^*(d)$ 的期望值; $\text{var}(G_i^*)$ 为变异系数; $\omega_{ij}(d)$ 为空间权重矩阵。通过置信区间识别人口密度变化的热点和冷点,根据置信区

间对人口冷热点进行重分类,本文的重分类字段设置-3 的为冷点区,-2~1 为次冷点区,0~1 为次热点区,2~3 为热点区。

2.2.3 格兰杰因果分析 为检验 X 组时间序列是否为 Y 组时间序列的原因,采用格兰杰因果关系检验法验证其因果关系^[18]。本文设 Y 为年际植被 NDVI 即 $Y = \{y_t\}$, X 为年际人口密度即 $X = \{x_t\}$,假设两者之间是否具有因果解释能力,并设定滞后阶,进行格兰杰检验分析人口密度能否影响植被 NDVI。其回归模型为:

$$y_t = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^n \gamma_i y_{t-i} + \epsilon_t \quad (9)$$

式中: β_i 为时间序列 X 的趋势项; γ_i 为时间序列 Y 的趋势项; n 为滞后阶数; α 为常数项; ϵ_t 为残差项。

假定原假设 H_0 : 人口密度不是引起植被 NDVI 的格兰杰原因($H_0: \forall i \in (1, 2, \dots, n), \gamma_i = 0$); 其余假设 H_1 : 人口密度是引起植被 NDVI 的格兰杰原因($H_1: \exists i \in (1, 2, \dots, n), \gamma_i \neq 0$)。当不考虑 X 的情况下(即假设 $\beta_i = 0$),设置回归模型的残差平方和 RS_R ; 当考虑 X 即人口密度的情况下(即假设 $\beta_i \neq 0$),设置残差平方和 RS_U 。构建 F 统计值:

$$F = \frac{RS_R - RS_U}{RS_U} \times \frac{N - 2n - 1}{n} \sim F(n, N - 2n - 1) \quad (10)$$

选取置信水平为 95%,若 $F \geq F_{0.05}(n, N - 2n - 1)$,即拒绝原假设 H_0 ,认为人口密度是引起植被 NDVI 的格兰杰原因,反之则保持原假设。

式中: F 为统计值; RS_R 为没有 X 约束下的残差平方和; RS_U 为在 X 约束下的残差平方和; n 为待估参数的个数; N 为样本容量。

2.2.4 重心转移模型和标准差椭圆 为分析 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 和人口密度迁移特征,本次研究运用属性重心迁移模型^[19]进行植被 NDVI 和人口密度演化模式的定量化表达,具体公式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (11)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (12)$$

式中: M_i 表示第 i 个次一级区域的某种属性的量值; (X_i, Y_i) 表示第 i 个次一级区域中心的坐标,若属性值 M_i 为各小区单元的面积,则空间均值 (\bar{x}, \bar{y}) 就是区域的几何中心即人口密度转移的“重心”。

标准差椭圆从数据范围、数据集聚性、变化方向和形状等多个角度,呈现地理要素的空间格局分布特征。方向角是正北方向与顺时针旋转的椭圆长轴形成的夹角,代表数据空间分布的主趋势方向,长半轴表示数据在主趋势方向上集聚性,短半轴反映数据在此趋势方向上集聚性。主要计算公式为:

$\tan\theta =$

$$\frac{(\sum_{i=1}^n x_i'^2 - \sum_{i=1}^n y_i'^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i'^2 - \sum_{i=1}^n y_i'^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n x_i' y_i')^2}}{2 \sum_{i=1}^n x_i' y_i'} \quad (13)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i' \cos\theta - y_i' \sin\theta)^2}{n}} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i' \sin\theta + y_i' \cos\theta)^2}{n}} \quad (15)$$

式中: x_i', y_i' 分别为椭圆几何区域重心经度和重心纬度; σ_x 为椭圆短半轴标准差; σ_y 为椭圆长半轴标准。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 的时空演变特征

3.1.1 NDVI 的时间变化趋势 由图 1 可知,整体上,2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 呈波动上升趋势,上升速率为 0.022/10 a。2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 均值为 0.728,最小值出现在 2000 年,为 0.666,最大值出现在 2011 年,为 0.748,且 2009 和 2014 年植被 NDVI 值明显低于相邻年份。2000—2010 年环渤海地区植被 NDVI 呈上升趋势,上升速率为 0.057/10 a,2000—2010 年环渤海地区植被 NDVI 均值为 0.716,略低于 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 平均值。相较于 2000—2010 年和 2010—2020 年环渤海地区植被 NDVI 上升趋势较为平缓,上升速率仅为 0.000 1/10 a。2010—2020 年环渤海地区平均植被 NDVI 值最高,为 0.738。综上所述,整体上,2000—2020 年环渤海地区植被覆盖呈改善态势,改善趋势明显,且 2000—2010 年植被 NDVI 改善程度强于 2010—2020 年,这与徐勇等^[15]和张鹏骞等^[20]的研究结果一致。自 2000 年以来,针对环渤海地区采取了林草地植被保护、小流域生态治理和高原地区水土保持等一系列林业生态工程,且取得了良好的效果,加之为筹备 2008 年奥运会,北京市开展了一系列绿化工程,短期内明显提升了区域植被 NDVI 值。2009 年植被 NDVI 值明显低于 2008 和 2010 年,

这与李卓等^[21]的研究结果一致,是由于 2009—2010 年环渤海地区遭受了历史极严重的旱灾,导致整体植被 NDVI 值较低。

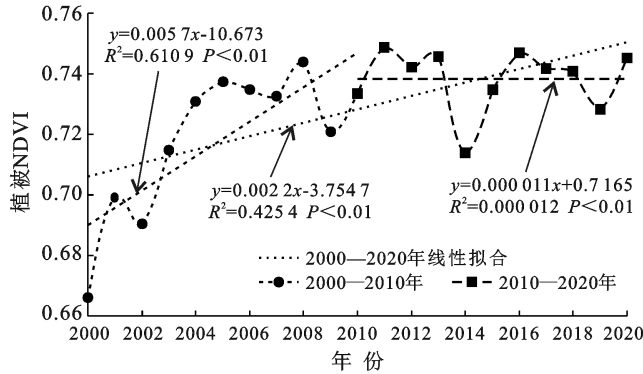


图 1 环渤海地区 2000—2020 年植被 NDVI 变化趋势

3.1.2 植被 NDVI 的空间变化特征 本文利用 Theil-Sen Median 趋势分析法得到 2000—2010 年、2010—2020 年以及 2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 变化趋势,并根据 Mann-Kendall 显著性检验,检验其变化趋势的显著性。由表 1 和图 2 可知,2000—2010 年和 2010—2020 年环渤海地区植被 NDVI 变化呈明显空间异质性,变化斜率分别在 $-0.076 \sim 0.072/a$ 和 $-0.087 \sim 0.070/a$ 之间。2000—2010 年植被 NDVI 呈上升趋势的区域面积占 83.83%,其中,呈显著上升的面积占 30.26%,均匀分布在研究区内,无明显集现象;呈显著下降的面积仅占 1.35%,零星分布在各大中城市中心及其周边地区。而 2010—2020 年植被 NDVI 呈上升趋势的面积

为 50%,其中,呈显著上升的面积仅占 9.85%,主要分布在北京和河北省西北部以及辽宁省东部;呈显著下降的面积占 5.71%,零星分布在辽宁省中部、天津以及河北和山东部分地区。由上可知,2000—2010 年环渤海地区植被 NDVI 以上升为主,上升区域面积明显高于下降区域面积,而 2010—2020 年环渤海地区植被 NDVI 上升趋势明显减缓,植被 NDVI 呈上升趋势面积等于呈下降趋势面积。整体上,2000—2020 年植被 NDVI 变化斜率在 $-0.034 \sim 0.037/a$ 之间,植被 NDVI 整体呈上升趋势。植被 NDVI 上升区域面积远大于下降区域面积。植被 NDVI 呈上升趋势的面积占 76.37%,下降趋势面积占 23.68%。植被 NDVI 显著上升区域面积占总面积的 45.18%,主要分布在辽宁省东部和西部、北京和河北西北部、山东省中部以及河北省和山东省交界处。这与 Zheng 等^[5]和 Jiang 等^[22]和研究结果一致,以上地区植被 NDVI 上升,主要得益于环渤海地区多年来实施退耕还林,京津风沙源治理工程和三北防护林工程等项目,使得地表植被覆盖程度得到提升,植被生态稳定性以及抵御风险的能力得到加强^[6,8-9]。植被 NDVI 呈显著下降趋势区域占总面积的 6.42%,主要分布在辽宁省中部、北京市城市中心和南部、天津市南部、河北省西南部至东北部沿海地区、山东省少部分地区,呈斑块状零星分布,这与 Zheng 等^[5]、Jiang 等^[22]、孙涛等^[23]和赵安周等^[24]的研究结果一致,由于北京、天津、石家庄等城市周边的工业用地急剧扩张,耕地、有林地等生态空间大幅度缩减,人类活动对植被 NDVI 的变化产生负向影响^[11,25-26]。

表 1 环渤海地区植被 NDVI 变化趋势面积比例统计

NDVI 变化趋势	β_{NDVI}	Z	面积比例/%		
			2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
显著下降	<0	$Z \geq -1.96$	1.35	5.71	6.43
不显著下降	<0	$-1.96 \leq Z < 0$	14.82	44.29	17.21
不显著上升	>0	$0 \leq Z < 1.96$	53.57	40.15	31.18
显著上升	>0	$Z \geq 1.96$	30.26	9.85	45.18

注: β_{NDVI} 为 Theil-Sen Median 趋势分析的统计值;Z 为 Mann-Kendall 显著性检验统计值

3.2 植被 NDVI 与人口密度变化的相关性

3.2.1 人口密度冷热点的空间分布格局 为揭示环渤海地区人口密度变化的集聚性和空间异质性,基于 Getis-Ord G_i^* 分析探究环渤海地区 2000—2010 年、2010—2020 年以及 2000—2020 年人口密度变化的冷热点空间分布格局。如图 3 和表 2 所示,2000—2010 年环渤海地区人口密度变化以冷点区为主,占总面积的 43.07%,且冷点区具有较强的空间集聚性,主要从环渤海东北部以条带状延伸至西北部,以及山东

省东南部分地区。热点区仅占总面积的 13.07%,主要分布在北京、天津、河北省的石家庄和邯郸以及山东省的济南、淄博、潍坊和青岛一带。相较于 2000—2010 年,环渤海地区 2010—2020 年人口密度变化的热点区和冷点区面积均有所减少,分别减少 4.38%和 3.85%。次冷点区增加显著,新增区域主要呈条带状分布在河北省和山东省交界处以及冷点区和次热点区的交界处。2010—2020 年人口密度变化的热点区主要分布在北京和天津,山东、河北经济水平较为落

后,城市基础设施不足以容纳更多人口,导致人口向京津地区迁移^[27-28],山东省南部地区人口—经济—土地城镇化协调性较为失衡,经济发展较为缓慢^[28-29],人口流失现象严峻,冷点区在山东省南部得到大幅扩张。2000—2020 年环渤海地区人口密度变化的冷点区面积大于热点区面积,其中冷点区所占比例为 46.84%,主要从辽宁省东北部延伸至河北省西北部,以

及山东省东南地区;热点区所占比例为 11.26%,主要呈团状分布在北京市和天津市,以及辽宁省、河北省和山东省各大中城市及其周边地区。由此可知,2000—2020 年环渤海地区人口密度变化以冷点区为主,表明以上地区人口集聚性不明显。相较于 2000—2010 年和 2010—2020 年人口密度变化的冷点区、次冷点区以及热点区均有所减少,主要表现为次热点区增加。

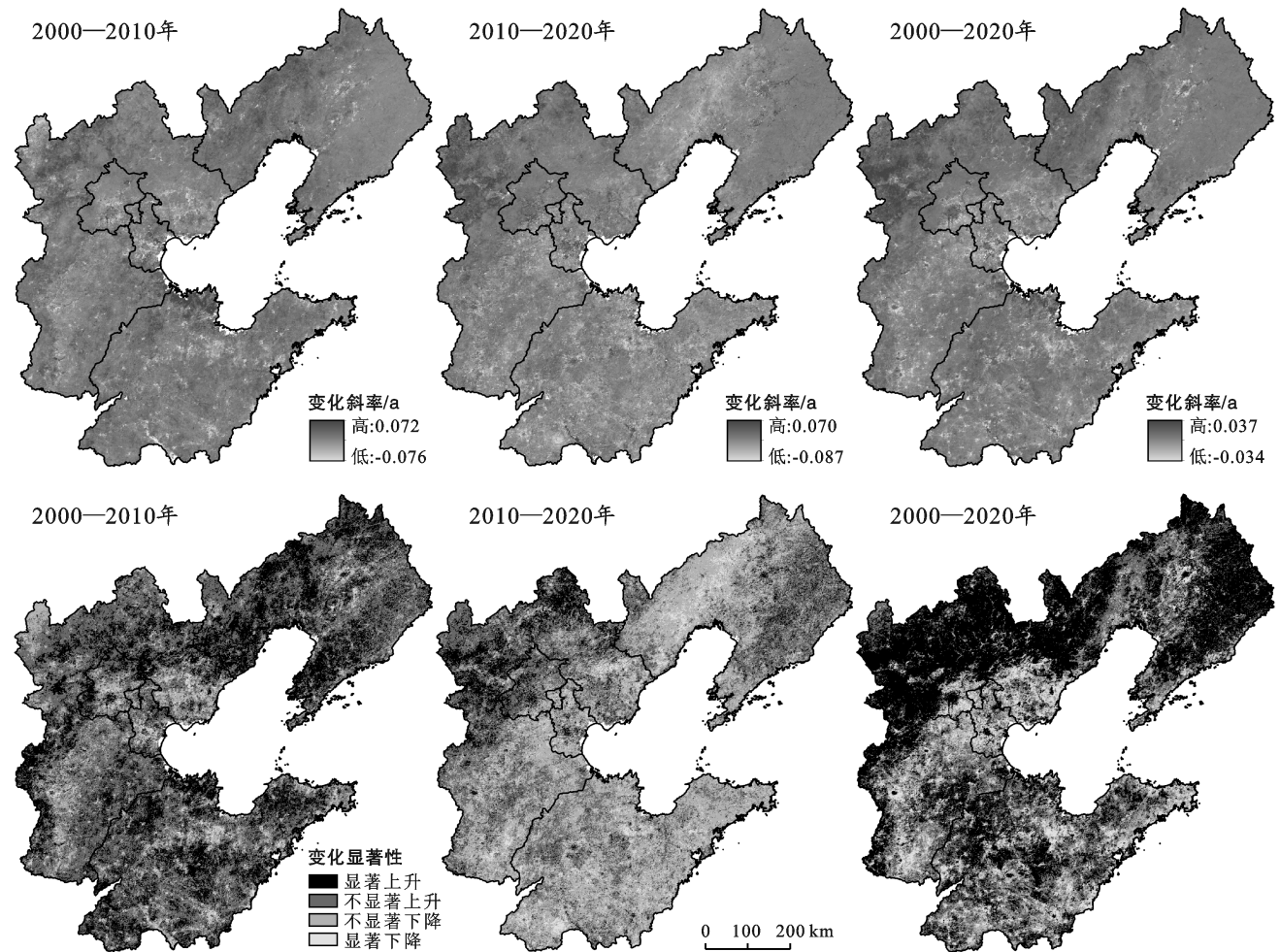


图 2 环渤海地区 2000—2020 年植被 NDVI 变化趋势及显著性检验

表 2 环渤海地区人口密度冷热点区域面积比例统计 %

年份	热点区	次热点区	次冷点区	冷点区
2000—2010	13.07	11.56	32.30	43.07
2010—2020	8.69	29.15	22.94	39.22
2000—2020	11.26	27.36	14.54	46.84

3.2.2 植被 NDVI 与人口密度变化的相关性 为检验环渤海地区人口密度和植被 NDVI 的因果关系,本文利用格兰杰因果关系检验法对两者的相关关系进行验证。该方法可判断两个时间序列之间是否存在因果性^[30]。采用 E-G 两步法^[31]对人口密度和植被 NDVI 两者的时间序列进行平稳性验证,由协整检验

一般规律可得,两者的时间序列较平稳,存在协整关系进行格兰杰因果检验。滞后期取 1~6,选择最优解作为结果进行分析。当 p 值 < 0.05 时,拒绝原假设,即认定两者之间存在单向格兰杰原因^[32]。根据表 3 可知,滞后期为 2 a 时,环渤海地区人口密度是植被 NDVI 的格兰杰原因,但植被 NDVI 不是人口密度的格兰杰原因,山东省人口密度是植被 NDVI 的格兰杰原因,但植被 NDVI 不是人口密度的格兰杰原因。滞后期为 1 a 时,北京市、河北省和辽宁省的人口密度是植被 NDVI 的格兰杰原因,但植被 NDVI 不是人口密度的格兰杰原因。滞后期为 4 a 时,天津市人口密度是植被 NDVI 的格兰杰原因,但植被 NDVI 不是

人口密度的格兰杰原因。综上所述,环渤海地区人口密度对植被 NDVI 存在单向格兰杰原因,人口密度的改变是引起植被 NDVI 变化的格兰杰原因,而植被 NDVI 的变化不是造成人口密度改变的格兰杰原因。为探究植被 NDVI 变化与人口密度变化的空间耦合关系,本文将植被 NDVI 变化趋势结果与人口密度冷热点区进行叠置分析,得到植被 NDVI 与人口密度的空间耦合特征和数量关系,结果如图 4 所示。2000—2010 年各冷热点区植被 NDVI 呈上升趋势的面积远

大于呈下降趋势的面积。植被 NDVI 呈显著上升的面积占比随人口密度变化热点区到冷点区依次上升,其在冷点区面积占比最大,为 37.11%,在热点区面积占比最小,为 13.83%。而植被 NDVI 呈显著下降的面积占比在各冷点区面积占比与显著上升面积占比成相反,显著下降的面积占比在热点区最大,为 31.16%,在冷点区最小,为 9.17%。由此可见,2000—2010 年环渤海地区的植被覆盖整体呈改善趋势,其中冷点区改善程度最为明显,次冷点区其次。

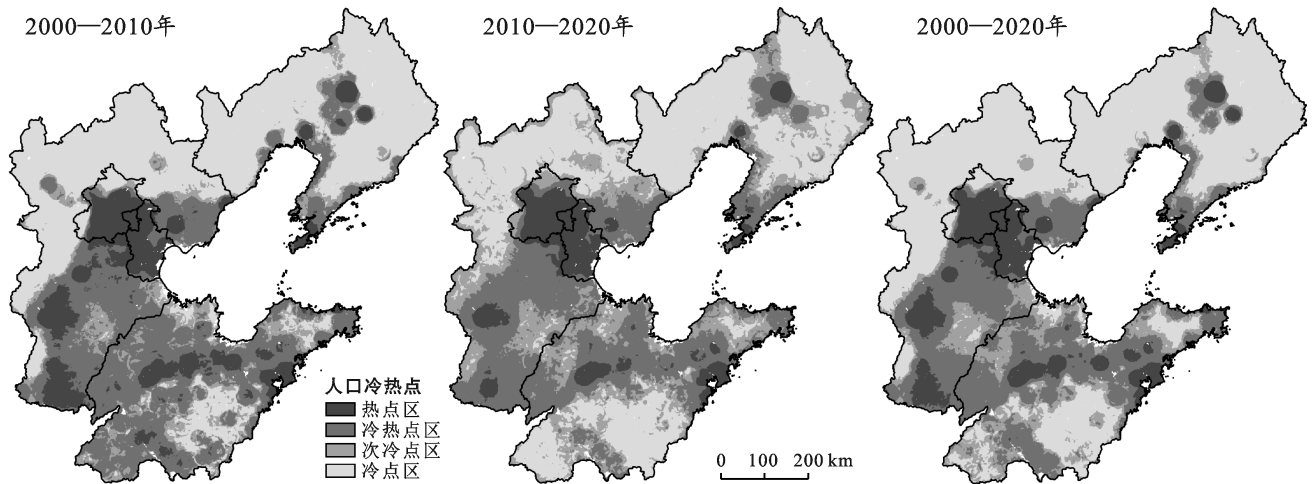


图 3 环渤海地区人口密度冷热点区域分布

由图 4 可见,2010—2020 年植被 NDVI 呈显著上升的面积占比随人口集聚程度的下降呈现先减少后升高的趋势,其中次热点区面积占比最小,为 3.97%,冷点区面积占比最大,为 14.02%。同样,植被 NDVI 呈显著下降的面积占比呈现先减少后升高的趋势,其中次冷点区面积占比最小,为 4.81%,热点区面积占比最大,为 7.02%。相较于 2000—2010 年,2010—2020 年植被 NDVI 变化趋势的面积占比变化规律不显著,且植被 NDVI 显著上升的面积占比有所减少,植被 NDVI 显著下降的面积占比增加。2000—2020 年冷点区、次冷点区和次热点区的植被 NDVI 呈上升趋势变化的面积大于呈下降趋势面积。植被 NDVI 呈显著上升区域面积占比排序为:冷点区>次冷点区>次热点区>热点区,其中在冷点区的面积占比为 65.14%,热点区的面积占比为 19.94%。由此可知,植被 NDVI 呈显著上升的面积占比随人口集聚程度的下降呈上升趋势。植被 NDVI 显著下降变化趋势的面积占比排序为:热点区>次热点区>次冷点区>冷点区,其中热点区的面积占比为 18.50%,冷点区的面积占比为 1.88%,植被 NDVI 呈显著下降的面积占比随人口集聚程度的下降呈现降低的趋势。2000—2020 年环渤海地区植被 NDVI 在次热点区、

次冷点区和冷点区呈改善趋势,其中冷点区改善程度最为明显,但热点区的植被 NDVI 呈退化趋势。综上所述,环渤海地区人口密度变化是引起植被 NDVI 改变的格兰杰原因,且对区域植被生长具有双重作用。环渤海地区植被 NDVI 呈下降趋势的面积主要分布在热点区和次热点区,原因是热点区和次热点区主要位于各大中型城市及其周边地区,以上地区人口基数大,人口增长快,其中北京和天津的人口增长最为显著,其他省会城市次之。另外,以上地区城市化程度高,如 2019 年北京、天津、辽宁和山东的城市化率在分别为 86.6%,83.5%,68.1%和 61.5%,高于全国平均水平,相较于 2000 年,城市化率分别增长了 9.1%,12.3%,13.9%和 23.5%(中国统计年鉴 2001—2020);其次,热点区和次热点区城市的第二、三产业对劳动力需求较大,对流动人口具有较强的吸引力,导致热点区和次热点区城市人口集聚程度较高,城市扩张,人类活动较为频繁,对植被覆盖造成破坏,从而抑制植被生长。环渤海地区植被 NDVI 呈上升趋势的部分主要集中在冷点区,冷点区的地理位置缺乏优越区位条件,基础设施较为落后,导致人口向北京市、天津市两个直辖市以及石家庄、邯郸、济南、青岛和沈阳等经济核心城市流动。冷点区的经济开发活动较

低,对自然环境的负向干扰程度较弱,为了保障环渤海地区经济的可持续发展,冷点区主要推行“三北”防

护林工程、京津风沙源治理工程以及退耕还林还草工程等^[6,8-9],对植被生长起促进作用。

表3 人口密度和植被NDVI两个时间序列的Granger检验结果

地区	原假设	滞后期	F 值	p 值	结果
环渤海地区	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	2	3.667	0.052 4	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	2	1.238	0.319 8	接受
北京	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	1	4.699	0.044 7	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	1	1.874	0.188 8	接受
天津	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	4	4.251	0.039 0	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	4	1.696	0.243 1	接受
河北	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	1	4.258	0.054 7	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	1	2.486	0.133 3	接受
山东	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	2	6.912	0.008 2	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	2	2.584	0.110 9	接受
辽宁	POP 不是 NDVI 的 Granger 原因	1	4.185	0.056 6	拒绝
	NDVI 不是 POP 的 Granger 原因	1	1.526	0.233 5	接受

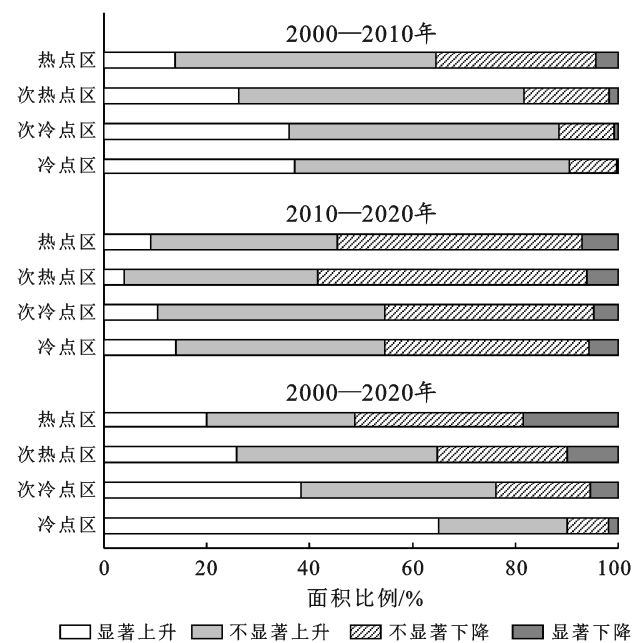


图4 环渤海地区人口密度冷热点区域植被NDVI变化显著性面积比例统计

3.3 植被NDVI与人口密度重心迁移

3.3.1 植被NDVI重心迁移 由图5可知,2000—2020年环渤海地区植被NDVI标准差椭圆的重心经度在 $118^{\circ}39'54''$ — $118^{\circ}46'13''$ 之间,重心纬度在 $39^{\circ}03'40''$ — $39^{\circ}10'52''$ 之间,表明环渤海地区植被NDVI呈“东北—西南”走向,且在“东北—西南”空间格局进一步扩大。长半轴标准差由4.890 km下降至4.846 km,而短半轴标准差由2.628 km上升至2.668 km,标准差椭圆变化较小,表明植被NDVI年际变化较为平稳。总体上,2000—2020年环渤海地

区植被NDVI重心往西北方向迁移。研究区内植被NDVI的改变以及重心迁移受人类活动因子的影响^[33]。主要有两个方面原因:一方面,与环渤海地区,尤其是沿海地区,经济发展和城市扩张紧密相关。随着改革开放,以京津冀为经济中心带动辐射周围城市经济发展,城市用地的急剧扩张,人口密度显著增加,导致耕地、草地和林地等转为城市建设用地,人类活动频繁,环渤海地区沿海地区的植被覆盖率下降显著,植被NDVI重心向西北方向迁移。另一方面,三北防护林工程和环渤海地区农业生态补偿建设,实施封山育林、退耕还林等山区保护措施,退耕还林等举措初见成效,增加了环渤海地区北部的森林覆盖率,提高水土涵养能力,尤其是环渤海地区东北和西北部地区,植被覆盖得到明显的改善^[34-35],因此,环渤海地区植被NDVI重心向西北方向迁移。

3.3.2 人口密度重心迁移 2000—2020年环渤海地区人口密度标准差椭圆形成东北—西南的空间分布格局,标准差椭圆参数变化较为稳定,重心经度由 $118^{\circ}05'38''$ 逐步下降至 $117^{\circ}58'30''$,而重心纬度由 $38^{\circ}12'00''$ 逐步上升至 $38^{\circ}17'21''$,方位角由 59.48° 逐步扩大至 61.32° 。长半轴标准差从4.254 km缩小至4.061 km,表明环渤海地区人口密度在“东北—西南”方向上呈收敛趋势,空间集聚性轻微上升,而短半轴标准差由2.405 km扩大至2.419 km,表明2000—2020年的环渤海地区人口密度在“西北—东南”方向上呈扩张趋势,空间集聚性轻微下降。由图6可知,2000—2020年环渤海地区人口密度变化较为平稳,重心逐步向西北方向迁移。影响环渤海地区人口密

度重心迁移的主要因素是本地人口基数大以及外部人口的迁入^[36],使得人口密度逐年上升。辽中南经济集聚区、京津唐工业区的城市经济发展良好,城市化和工业化水平高,带动了产业经济由东南沿海逐步向西北内陆扩张,而产业发展和城市建设需更多人口弥补劳动力不足,吸引外来人口向该地区迁移,导致环渤海地区的人口重心向西北内陆迁移。2000—2020年的环渤海地区植被 NDVI 重心与人口密度重心均往西北方向迁移,表明人口重心迁移方向和 NDVI重心迁移方向呈现一定相关性,人口密度重心迁移轨迹比较均一,单方向往西北迁移,植被 NDVI重心整体往西北迁移,但迁移轨迹较为复杂,无明显迁移模型,振荡幅度较大,不与人口密度重心迁移轨迹呈明显的线性关系。原因是除人口密度外,植被生

长还与区域地形、气候条件以及林业生态工程等息息相关,已有研究^[11]表明,环渤海地区植被与降水、气温以及相对湿度呈明显的正向效应,近年来,环渤海地区年际气温和降水呈波动上升趋势,温暖湿润的环境对区域植被生长具有促进作用。此外,环渤海地区积极开展退耕还林还草工程、京津风沙源治理工程和三北防护林工程,以上工程不仅抵消人类活动对植被生长带来的负向影响,还提高了环渤海地区植被覆盖程度,增加了区域植被 NDVI^[37]。综上所述,环渤海地区人口密度与植被 NDVI 重心变化具有一致性,但人口密度与植被 NDVI 变化没有明显的线性相关性,人口密度是影响环渤海地区植被 NDVI 的因素,但该地区的植被 NDVI 同时还受气候变化和生态林业工程等因素的影响^[6,8-9,11]。

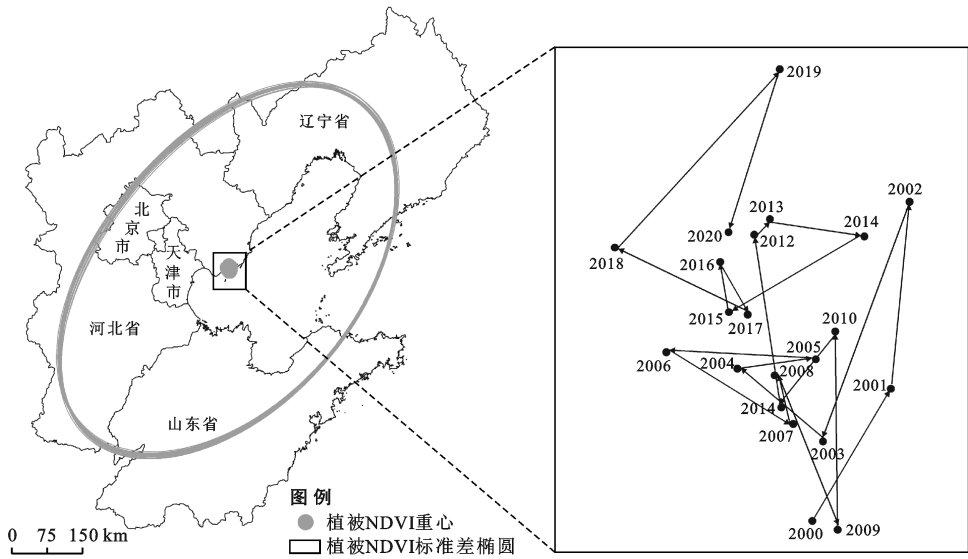


图 5 环渤海地区 2000—2020 年植被 NDVI 重心转移空间变化

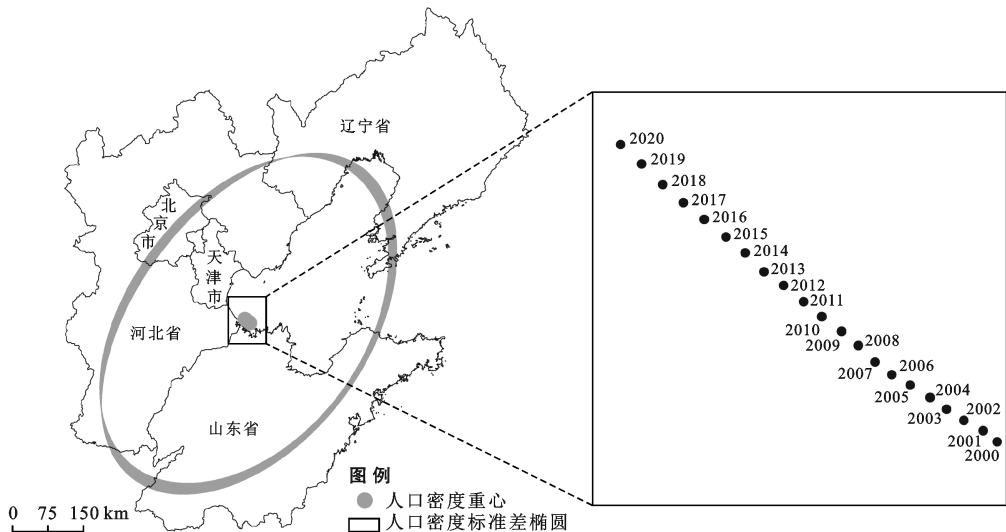


图 6 环渤海地区 2000—2020 年人口密度重心转移空间变化

4 结论

(1) 2000—2020年环渤海地区植被NDVI整体呈上升趋势,上升斜率为0.022/10 a。2000—2010年植被NDVI上升速率高于2010—2020年植被NDVI上升速率。2000—2020年植被NDVI呈上升趋势的面积大于呈下降趋势的面积,其中显著上升区域面积占总面积的45.18%,主要分布于研究区的西北部和东北部。

(2) 2000—2020年环渤海地区人口密度变化以冷点区为主,主要从辽宁省东北部延伸至河北省西北部,以及山东省东南地区。相较于2000—2010年,2010—2020年人口密度变化的冷点区、次冷点区以及热点区均有所减少,主要表现为次热点区增加。

(3) 环渤海地区人口密度变化是引起植被NDVI变化的格兰杰原因,而植被NDVI的变化不是造成人口密度改变的格兰杰原因。且人口密度变化对植被NDVI变化的负向效应要强于正向效应,植被NDVI呈显著下降趋势面积主要集中于热点区,呈显著上升趋势主要位于冷点区。

(4) 2000—2020年的环渤海地区植被NDVI重心与人口密度重心均往西北方向迁移,表明人口重心迁移方向和NDVI重心迁移方向呈现一定相关性,人口密度重心迁移轨迹比较均一,但植被NDVI重心迁移轨迹较为复杂,不与人口密度重心迁移轨迹呈明显的线性关系。

本文的研究结果基本符合一般规律,表明利用人口密度分析研究对植被NDVI的研究方法切实可行,但仍存在不足之处。首先考虑的人为因素较少,人口密度作为单一因子进行分析导致的结论可能过于片面,后期的研究可以加入地区GDP、人口劳动力等人为因子^[38],从多角度分析人类活动对植被NDVI的影响。其次未采用最优滞后期模型计算人口密度与植被NDVI的最优滞后期,导致格兰杰因果关系方法的检验结果比较粗略,在一定程度上影响评价结果的精度。因此,后续的研究应从适当增加研究因子、采用先进数学模型计算相关性等方面对人类活动与植被NDVI的相关性进行深入研究,使得研究结果与结论更加准确与科学。

[参 考 文 献]

[1] Zhang Yan, Wu Tong, Arkema Katie K, et al. Coastal vulnerability to climate change in China's Bohai Economic Rim [J]. *Environment International*, 2021, 147: 106359.

[2] 张学珍,郑景云,郝志新.中国主要经济区的近期气候变

化特征评估[J].*地理科学进展*,2020,39(10):1609-1618.

[3] Liu Yubin, Hou Xiyong, Li Xiaowei, et al. Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone [J]. *Ecological Indicators*, 2020,111:106004.

[4] 于莉莉,孙立双,张丹华,等.基于Google Earth Engine的环渤海地区土地覆盖分类[J].*应用生态学报*,2020,31(12):4091-4098.

[5] Zheng Kaiyuan, Tan Linshan, Sun Yanwei, et al. Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: Evidence from typical areas in China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,126:107648.

[6] 王强,张勃,戴声佩,等.三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J].*中国环境科学*,2012,32(7):1302-1308.

[7] Hu Yugang, Li Huan, Wu Dan, et al. LAI-indicated vegetation dynamic in ecologically fragile region: A case study in the Three-North Shelter Forest program region of China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,120:106932.

[8] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].*生态学报*,2014,34(17):5007-5020.

[9] Cao Shixiong, Xia Chengqi, Suo Xinhao, et al. A framework for calculating the net benefits of ecological restoration programs in China [J]. *Ecosystem Services*, 2021,50:101325.

[10] 冯国艳.2001—2016年西南地区植被动态变化及驱动因素研究[D].重庆:西南大学,2018.

[11] 梁守真,禹定峰,王猛,等.应用遥感时序数据研究植被变化与气候因子的关系:以环渤海地区为例[J].*国土资源遥感*,2015,27(3):114-121.

[12] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,等.1982—2015年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J].*草业学报*,2021,30(2):1-13.

[13] He Peng, Xu Lishuai, Liu Zhengchun, et al. Dynamics of NDVI and its influencing factors in the Chinese Loess Plateau during 2002—2018 [J]. *Regional Sustainability*, 2021,2(1):36-46.

[14] 韩贵锋,徐建华.长江三角洲地区城市化与植被活动之间的时空相关性[J].*生态科学*,2008,27(1):1-5.

[15] 徐勇,黄雯婷,靖娟利,等.京津冀地区植被NDVI动态变化及其与气候因子的关系[J].*水土保持通报*,2020,40(5):319-327.

[16] 徐勇,吴杰峰,郭振东.2001—2019年广东省植被NDVI时空演变特征及持续性分析[J].*无线电工程*,2021,51(8):691-698.

[17] Kuznetsov Andrey, Sadovskaya Veronika. Spatial Variation and Hotspot Detection of COVID-19 Cases in Kazakhstan, 2020 [J]. *Spatial and Spatio-Temporal*

- Epidemiology, 2021:100430.
- [18] 曹永福, 格兰杰因果性检验评述[J]. 数量经济技术经济研究, 2006(1):155-160.
- [19] Balsa-Barreiro José, Li Yingcheng, Morales Alfredo. Globalization and the shifting centers of gravity of world's human dynamics: Implications for sustainability [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117923.
- [20] 张鹏骞, 胡理乐, 白加德. 京津冀地区近 20 年 NDVI 时空变化特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1):29-36.
- [21] 李卓, 孙然好, 张继超, 等. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22):7418-7426.
- [22] Jiang Meichen, He Yuexin, Song Conghe, et al. Disaggregating climatic and anthropogenic influences on vegetation changes in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 786, 147574.
- [23] 孙涛, 孙然好, 陈利顶. 京津冀城市群土地利用转化对植被净生产力的影响模式研究[J]. 环境生态学, 2020, 2(4):1-8, 17.
- [24] 赵安周, 裴韬, 曹森, 等. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4):1825-1833.
- [25] 武爱彬. 京津冀区域“三生空间”分类评价与格局演变[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11):237-242.
- [26] 张滔, 唐宏. 基于 Google Earth Engine 的京津冀 2001—2015 年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4):593-599.
- [27] 曹琳剑, 王杰, 王欢欢, 等. 京津冀基础设施建设与人口集聚耦合演进分析: 基于推拉理论解析[J]. 地理科学, 2019, 39(8):1256-1264.
- [28] 杨洋, 梅洁. 环渤海地区县域土地: 人口城镇化水平时空演化与失调发展特征[J]. 经济地理, 2019, 39(7):205-215.
- [29] 刘建志, 刘志刚, 范梦甜, 等. 山东省人口—经济—土地城镇化耦合协调度时空差异分析[J]. 经济研究导刊, 2017(30):68-71, 126.
- [30] 曹永福, 格兰杰因果性检验评述[J]. 数量经济技术经济研究, 2006(1):155-160.
- [31] 姜涛, 杜两省. 我国城镇居民收入差距与经济增长关系的实证分析: 基于 E-G 两步法[J]. 宏观经济研究, 2014(3):114-124.
- [32] 周玉科. 青藏高原植被 NDVI 对气候因子响应的格兰杰效应分析[J]. 地理科学进展, 2019, 38(5):718-730.
- [33] 马宗文, 许学工, 卢亚灵. 环渤海地区 NDVI 拟合方法比较及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7):1558-1564.
- [34] Zhang Yao, Peng Changhui, Li Weizhong, et al. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013 [J]. Ecological Indicators, 2016, 61:404-412.
- [35] Wu Zhitao, Wu Jianjun, Liu Jinghui, et al. Increasing terrestrial vegetation activity of ecological restoration program in the Beijing-Tianjin Sand Source Region of China [J]. Ecological Engineering, 2013, 52:37-50.
- [36] 马忠东, 王建平. 区域竞争下流动人口的规模及分布[J]. 人口研究, 2010, 34(3):3-16.
- [37] Piao Shilong, Yin Guodong, Tan Jianguang, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 2015, 21(4):1601-1609.
- [38] 陈宽, 潮洛濛. 内蒙古植被 NDVI 变化趋势及影响因子数据集(2000—2015) [J]. 全球变化数据学报(中英文), 2020, 4(2):137-143, 137-143.

(上接第 263 页)

- [13] 张盛霖, 项俊, 吴博文, 等. 基于遥感与 GIS 的黄冈市植被覆盖时空特征研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(10):2358-2362.
- [14] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation [J]. Soil Science Society Proceedings, 1959, 23(3):246-249.
- [15] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. USDA: Agriculture Handbook, 1978.
- [16] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5):1-20.
- [17] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量试验[J]. 中国水土保持, 1985(2):24-30.
- [18] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J]. 中国水土保持, 1989(8):23-24.
- [19] 王玉宽. 黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀试验研究[J]. 中国水土保持, 1993(7):22-24.
- [20] 李宗勋, 李启艳, 侯晓龙, 等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1):27-33.