

郭海宾,李朝奎,张瑞,等.基于地理探测器的长株潭“绿心”植被演变及影响因素分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):111-118. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.014

GUO H B, LI C K, ZHANG R, et al. Influencing Factors of Vegetation Change in Green Heart of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Based on Geographical Detector[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(4):111-118. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.014

基于地理探测器的长株潭“绿心”植被演变及影响因素分析

郭海宾^{1,2}, 李朝奎^{1*}, 张瑞^{1,2}, 李鑫炎³

(1.湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411201;

3.湖南省第三测绘院,湖南 长沙 410004)

摘要:为研究绿心地区的植被变化和影响因素,对长株潭绿心地区2000年—2020年归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的最大值进行数据处理、等级划分和面积统计,结合Theil-Sen Median和Mann-Kendall研究绿心地区植被长时间序列NDVI的变化趋势,使用地理探测器探究NDVI的影响因素、影响过程和影响机制.研究结果表明:(1)NDVI总体呈上升趋势,各年份NDVI呈现分级镶嵌分布,高等级在研究区中部,低等级聚集在河流附近,其他等级分散分布;(2)人口密度是影响NDVI变化的主要因素,解释力高达40%,其次是高程、降水和最低气温;(3)对NDVI变化的影响不是单个因子独立作用的结果,而是人文因子和自然因子之间交互作用的结果,且交互作用影响较大的因子组合对NDVI的空间分布均存在显著性差异.研究结果可为长株潭绿心地区的规划建设及生态环境监测提供决策参考,为该区域生态环境的保护与可持续发展提供理论与方法依据.

关键词:绿心地区;NDVI;时空变化;地理探测器;影响因素

中图分类号:K903 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)04-0111-08

Influencing Factors of Vegetation Change in Green Heart of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Based on Geographical Detector

GUO Haibin^{1,2}, LI Chaokui¹, ZHANG Rui^{1,2}, LI Xinyan³

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Geospatial Information Technology,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. The Third Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410004, China)

Abstract: As a policy protected green space in the rapidly developing Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, the study of vegetation change and influencing factors in the Green Heart area has important practical value. The maximum value of normalized difference vegetation index (NDVI) from 2000 to 2020 in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Green Heart is data-processed, rank-classified and area-counted. The change trend

收稿日期:2023-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42171418);湖南省自然资源科技计划资助项目(20230122CH);湖南省地理空间信息工程技术研究中心开放课题资助项目(HNG12023005);湖南省高新技术产业科技创新引领计划资助项目(2021GK4001)

*通信作者, E-mail: chkl_hn@163.com

of NDVI in the long time series of vegetation in the Green Heart is studied in combination with Theil-Sen Median and Mann-Kendall, and the influencing factors, processes and mechanisms of NDVI are explored by using geographical detectors. The results show that firstly the spatial distribution characteristics of NDVI in the study area are high in the middle and inlaid transition between adjacent grades. Except for low grades, the distribution of NDVI in other grades is scattered, and the overall trend of NDVI change is upward. Secondly, population density is the main factor affecting NDVI changes, with the explanatory power up to 40%, then is elevation, precipitation and minimum temperature. Thirdly, the impact on NDVI change is not the result of the independent action of a single factor, but the result of the interaction between human factors and natural factors, and the combination of factors with greater interaction has significant differences on the spatial distribution of NDVI. This research result has an important guiding role in the planning and construction and ecological environment monitoring of the Green Heart. It provides a theoretical basis for decision-making on the sustainable development and protection of the regional ecological environment.

Keywords: Green Heart; NDVI; spatio-temporal change; geographical detector; influencing factors

植被是地球生态系统的重要组成部分和光合作用的重要载体,它能为人类的生产和生活提供能量^[1-3].用来评价植被生长状态的参数中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的使用频率最高,NDVI常用于碳排放变化、土地利用类型、环境监测和植被变化监测等方面的研究^[4].NDVI值通常在-1~1,当NDVI值越接近于1时,说明植被覆盖较高,反之,植被覆盖较低.月份不同,植被的生长情况不同.一年中NDVI的最大值能有效反映植被生长的最好状态,这种方法在植被变化的研究中被广泛应用^[5-8].

近年来,许多学者通过不同的方法对植被覆盖变化及其影响因素进行研究.普布次仁^[9]主要研究中国北部干旱及半干旱地区的降水量、土壤湿度和NDVI最大值之间的关系,并采用相关性分析,得出NDVI最大值与降水量、土壤湿度存在显著的非线性关系;覃文汉等^[10]使用多组分植被方向反射系数的综合解析模型,研究植被结构和太阳/观测角度对NDVI的影响;戴声佩等^[11]运用趋势面分析和相关性分析,得出中国西部的NDVI变化是自然和人文因素双重作用的结论;LIU等^[12]对1982年—2015年西南地区的植被变化运用多时间尺度分析,得出时间尺度越长,气候对植被变化的影响越明显的结论;ZOUNGRANA等^[13]选取可达性因素、气候因素和地形因素对西非地区的植被进行影响因素分析,得出这3种因素有助于植被的退化,且自然植被的负变化大多发生在保护区边界和以自然植被连续性破坏为特征的破碎化景观中.

长株潭城市群是长江中游城市群的重要组成部分,是第四批获得国家发改委批准发展的都市圈.长株潭绿心地区位于长株潭三市两两接壤处,具有重要的地理位置,是长株潭城市群的重点生态保护区.李毅等^[14]对长株潭部分地区2000年和2013年的植被覆盖度进行分析,得出植被受人为因素影响较大的结论;胡顺石等^[15]从城市扩张的角度分析其对植被变化的影响,所得结果表明:长株潭周边区域的植被指数下降的速率较慢,说明在城市扩张的过程中,绿地得到了较好的保护.

本文以长株潭绿心地区为研究区,分析该区域在2000年—2020年NDVI的时空变化,并从自然和人文2个方面选取14个因子,采用地理探测器分析绿心地区NDVI的影响机制.研究成果对绿心地区的规划建设及生态环境监测具有重要的指导作用,并可为该区域的生态环境保护与可持续发展提供科学的决策依据.

1 研究区与研究方法

1.1 研究区域

长株潭绿心地区位于112°53'E~113°18'E,27°43'N~28°7'N,总面积为528.32 km².绿心地区处于长沙、株洲、湘潭这3个城市的中心交界位置,长沙绕城线及浏阳河在绿心的最北部,南至湘潭县易俗河镇,东到浏阳镇头镇,西最远可达长潭高速西线,在长沙、株洲和湘潭的面积分别为306.00, 83.87和138.45 km².绿心地区的高程在-136~288 m,地势呈中间高四周低,降水充沛,水资源较丰富,年最高气温36~41℃,年平均气温16~19℃,年最低气温-6~0℃,年总日照时数1 212~1 616 h,植被种类丰富,以常绿阔叶林为主.近些年来,在政策的保护下,绿心地区的生态环境质量正得到逐步提升.

所采用的2000年—2020年的NDVI数据来源于国家科技资源共享服务平台,将所得数据集通过线性插值和S-G平滑等方法得到NDVI最大值,NDVI的值在0~255,空间分辨率为30 m,时间分辨率为年^[16].经归一化处理,NDVI的值在0~1.0.

土地利用、降水、气温、湿度、日照、风速和气压数据来源于国家地球系统科学数据中心,人口密度数据来源于WorldPop,夜间灯光数据来源于Harvard Dataverse平台,DEM数据来源于地理空间数据云,坡度和坡向数据由DEM生成.

1.2 研究方法

1.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析

本文采用Theil-Sen Median趋势分析对研究区2000年—2020年NDVI的变化趋势进行研究.Theil-Sen Median趋势分析是非参数统计方法^[17-18],该方法受异常因素的影响较小,常用于分析长时间序列变化的地理现象,其计算公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{y_a - y_b}{a - b}\right), 1 < b < a < i.$$

式中: β 为趋势值, $\beta > 0$ 时,说明NDVI变化呈上升趋势, $\beta < 0$ 时,说明NDVI变化呈下降趋势; $\text{Median}(\)$ 为中位数; y_a 和 y_b 为第 a 年和第 b 年的NDVI最大值; i 为年份总和.

1.2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall检验方法常用于检测气候的突变情况并确定突变时间^[19],适用于长时间序列变化的检验.本文通过Mann-Kendall检验方法对Theil-Sen Median的趋势结果进行分级,计算公式为

$$S = \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n \text{sgn}(x_b - x_a);$$

$$\text{sgn}(x_b - x_a) = \begin{cases} +1, (x_b - x_a > 0); \\ 0, (x_b - x_a = 0); \\ -1, (x_b - x_a < 0). \end{cases}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, (S > 0); \\ 0, (S = 0); \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, (S < 0). \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}.$$

式中: S 为统计量; Z 为检验统计量; x_a 和 x_b 为第 a 年和第 b 年的NDVI值; sgn 为符号函数; Var 为方差; n 为数据个数.

结合以上2种方法,并将所结果分为9个等级.当 $\beta > 0$ 时, $Z > 2.58$,分类等级为极显著增加; $1.96 < Z \leq 2.58$,分类等级为显著增加; $1.65 < Z \leq 1.96$,分类等级为微显著增加; $Z \leq 1.65$,分类等级为不显著增加.当 $\beta = 0, Z = 0$ 时,分类等级为无变化, $\beta < 0$ 时,与 $\beta > 0$ 时的情况相反.

1.2.3 地理探测器

地理探测器是分析空间分异性的一种方法^[20],本研究使用地理探测器的3个部分即因子探测、交互探测和生态探测对研究区2000年—2020年的NDVI影响因素进行研究,因子的选取如表1所示.与分析方法相比,地理探测器的优点在于能分析多个因素对同一对象共同作用时的影响力.因子探测用 q 值来表示影响因素对NDVI的影响力, q 值越大,影响力越大.交互探测评价多个影响因素对NDVI共同作用时的影响力强弱.生态探测评价多个影响因素对NDVI的空间分布是否有显著性差异. q 的计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}.$$

式中: L 为因子总类别数; h 为某一类因子; N_h 为 h 类因子的单元个数, N 为单元总数; σ_h 为 h 类因子的方差; σ 为总方差.

表1 因子的选取

| 因素类型 | 因子名称 | | | |
|------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| 自然 | 坡度(X_1) | 坡向(X_2) | 高程(X_3) | 土地利用(X_4) |
| | 降水(X_5) | 平均气温(X_6) | 最高气温(X_7) | 最低气温(X_8) |
| | 相对湿度(X_9) | 日照时数(X_{10}) | 风速(X_{11}) | 气压(X_{12}) |
| 人文 | 人口密度(X_{13}) | 夜间灯光(X_{14}) | | |

2 试验与结果分析

2.1 NDVI 时空变化

2.1.1 NDVI 时空变化特征

选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的NDVI数据,从时间尺度分析NDVI时空变化特征.NDVI值的范围为0~1,根据相关参考文献将其平均划分为5个等级^[7-11]:低等级($[0, 0.2]$)、较低等级($(0.2, 0.4]$)、中等等级($(0.4, 0.6]$)、较高等级($(0.6, 0.8]$)和高等级($(0.8, 1.0]$).研究区各年份的NDVI面积统计如表2所示.由表2可知:各年份低等级和高等级NDVI面积的占比较小,其次是较低等级,中等等级和较高等级NDVI面积的占比较多.2000年—2020年,低等级的NDVI面积呈波动增加,2020年的面积最大,为36.92 km²;较低等级的NDVI面积持续增加,且在2015年—2020年这5年间的增长幅度最大;中等等级的NDVI面积在2010年和2020年超过100 km²;较高等级的NDVI面积除2020年外均超过300 km²,呈波动性减少;高等级的NDVI面积在10~35 km²,2020年达到最高.各年份的NDVI分布如图1所示.由图1可知:植被覆盖等级高的NDVI分布在中部,逐渐向东扩散;较高等级的分布较广,均匀分散在研究区内,在2020年减少较多,减少的大部分变为中等等级;中等等级部分聚集在河流周围,与较低等级呈镶嵌状分布;低等级主要分布在西部和南部,呈蜿蜒状,聚集在河流处,河流地区主要是水面,因此是NDVI的最低值处.

表2 各年份NDVI面积统计 km²

| 等级 | 2000年 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 低 | 20.74 | 17.77 | 25.83 | 16.33 | 36.92 |
| 较低 | 17.85 | 17.86 | 32.42 | 31.15 | 54.71 |
| 中等 | 76.34 | 80.17 | 103.15 | 76.31 | 181.65 |
| 较高 | 402.47 | 391.05 | 335.40 | 382.36 | 221.81 |
| 高 | 10.92 | 21.47 | 31.52 | 22.17 | 33.23 |

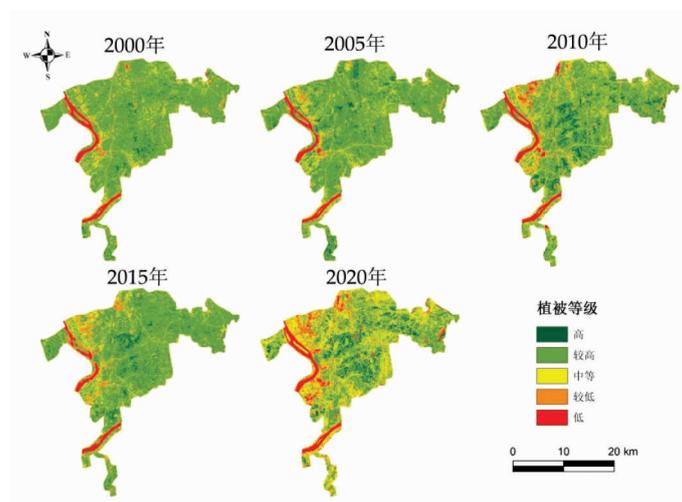


图1 各年份NDVI分布

2.1.2 NDVI 时空变化趋势

2000年—2020年NDVI变化趋势及显著性检验如图2所示.由图2可知:2000年—2020年连续的NDVI变化趋势中,上升趋势的面积占总面积的53.47%,分散分布于研究区内,其中,极显著增加面积占总面积的6.83%,显著增加面积占比为9.04%,微显著增加面积占比为5.98%,不显著增加面积占比为31.62%;无变化的面积主要分布在河流及河流附近,占总面积的7.05%;下降趋势的面积占总面积的39.49%,大部分聚集在中部偏西区域,距离河流较近,其中,极显著减少、显著减少、微显著减少、不显著减少面积占比依次为9.21%,6.26%,3.38%和20.64%.总体来看,不显著增加和不显著减少的面积较多,NDVI呈上升趋势的部分多于下降趋势的部分.

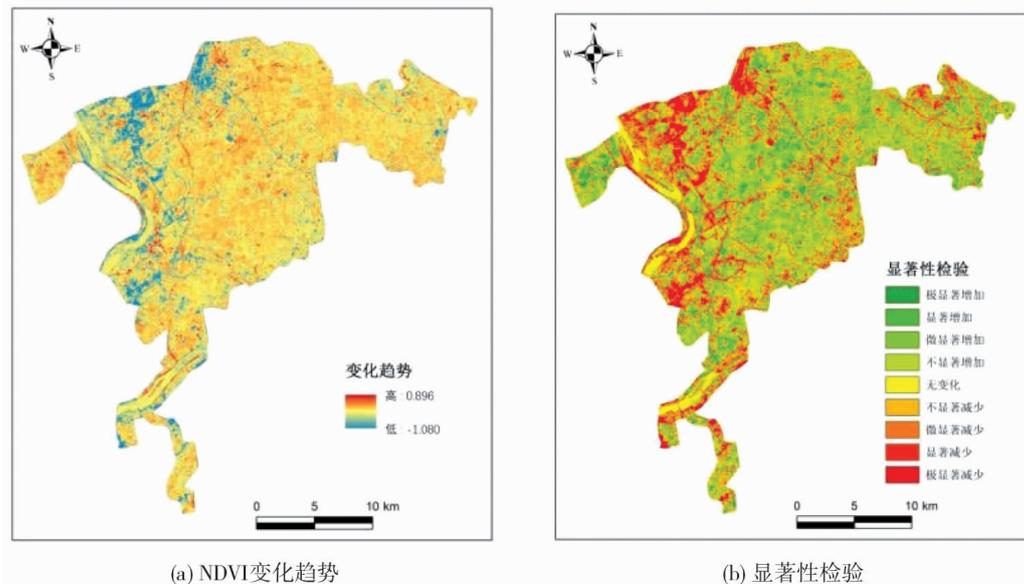


图2 2000年—2020年NDVI变化趋势及显著性检验

2.2 NDVI 影响因素探测

2.2.1 影响因素因子探测

根据2020年的因子探测结果,将 q 值由大到小进行排序:人口密度(0.43)>高程(0.30)>降水量(0.25)>最低气温(0.24)>最高气温(0.22)>平均气温(0.19)>坡度(0.18)>风速(0.16)>日照时数(0.12)>夜间灯光(0.11)>气压(0.06)>相对湿度(0.04)>坡向(0.02)>土地利用(0.01).人口密度和高程的 q 值都大于等于0.3,是影响NDVI变化的主要因素;降水量、最低气温、最高气温、平均气温、坡度、风速、日照时数和夜间灯光的 q 值在0.1~0.3,是影响NDVI变化的次要因素;相对湿度、坡向、气压和土地利用的 q 值小于0.1,对NDVI变化的影响较弱.

根据2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的因子探测结果(图3),人文因子中,人口密度对NDVI的影响程度在2000年最大,到2020年的影响程度变弱,但解释力仍超过40%,夜间灯光对NDVI的影响程度逐渐增加,2015年和2020年 q 值均超过0.10;地形因子中,高程和坡度对NDVI的影响程度持续增加,在2020年达到最大,坡向对NDVI的影响较小,且变化不大;气候因子中,降水量对NDVI的影响在2010年最低,2020年最高,总体呈变强状态,最低气

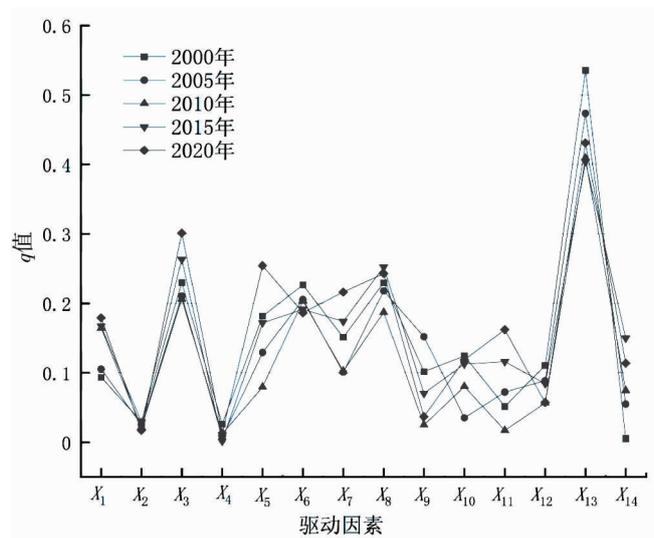


图3 各年份 q 值

温和最高气温对 NDVI 的影响呈波动增加的趋势,平均气温的 q 值逐渐减小,但 q 值均在 0.19 以上,风速和气压对 NDVI 的影响呈波动性变强,日照时数的 q 值先减小后增加,总体不变,气压和相对湿度的 q 值的变化呈波动性减小.

2.2.2 影响因素交互探测

交互探测主要用来分析其中某两个因子对 NDVI 共同作用时的结果.对所选取的 14 个因子进行交互探测,出现两种交互作用结果:一种是双因子增强,即两个因子共同对 NDVI 作用的影响程度大于两个因子单独作用时的最大值;一种是非线性增强,即两个因子共同对 NDVI 作用的影响程度大于两个因子单独作用时的影响程度之和.

交互探测结果如表 3 所示.由表 3 可知:人口密度和坡度共同作用时的交互值最大,为 0.62,解释力高达 60%以上,属于双因子增强;人口密度与夜间灯光、气压、日照时数、风速、高程、降水、坡向、最高气温、平均气温、最低气温和相对湿度对 NDVI 共同作用时的交互值均超过 0.50;降水与坡向对 NDVI 共同作用时的交互值为 0.51,属于非线性增强;高程与坡度、日照时数与风速、土地利用与人口密度对 NDVI 共同作用时的交互值在 0.45~0.50;坡度与平均气温、最低气温与相对湿度、最低气温与气压、坡度与最高气温、高程与夜间灯光、坡度与最低气温、坡向与风速、高程与降水、高程与平均气温、高程与最高气温、高程与最低气温、高程与气压、降水与相对湿度、最高气温与相对湿度、最高气温与相对湿度、最高气温与夜间灯光的交互值均大于 0.40,小于 0.45.

表 3 交互探测结果

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| X_1 | 0.18 | | | | | | | | | | | | | |
| X_2 | 0.31 | 0.02 | | | | | | | | | | | | |
| X_3 | 0.46 | 0.37 | 0.30 | | | | | | | | | | | |
| X_4 | 0.22 | 0.09 | 0.34 | 0.01 | | | | | | | | | | |
| X_5 | 0.39 | 0.51 | 0.41 | 0.32 | 0.25 | | | | | | | | | |
| X_6 | 0.40 | 0.32 | 0.41 | 0.23 | 0.34 | 0.19 | | | | | | | | |
| X_7 | 0.43 | 0.32 | 0.41 | 0.26 | 0.32 | 0.26 | 0.22 | | | | | | | |
| X_8 | 0.45 | 0.40 | 0.41 | 0.31 | 0.35 | 0.26 | 0.27 | 0.24 | | | | | | |
| X_9 | 0.27 | 0.24 | 0.36 | 0.12 | 0.42 | 0.39 | 0.41 | 0.42 | 0.04 | | | | | |
| X_{10} | 0.33 | 0.33 | 0.45 | 0.21 | 0.35 | 0.31 | 0.34 | 0.36 | 0.34 | 0.12 | | | | |
| X_{11} | 0.34 | 0.43 | 0.47 | 0.22 | 0.36 | 0.38 | 0.38 | 0.36 | 0.30 | 0.26 | 0.16 | | | |
| X_{12} | 0.30 | 0.21 | 0.44 | 0.13 | 0.33 | 0.30 | 0.35 | 0.41 | 0.23 | 0.28 | 0.36 | 0.06 | | |
| X_{13} | 0.62 | 0.53 | 0.59 | 0.45 | 0.54 | 0.52 | 0.53 | 0.53 | 0.51 | 0.54 | 0.55 | 0.52 | 0.43 | |
| X_{14} | 0.31 | 0.30 | 0.41 | 0.17 | 0.37 | 0.39 | 0.41 | 0.39 | 0.21 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.52 | 0.11 |

2.2.3 影响因素生态探测

置信水平为 95%时各影响因素的生态探测结果如表 4 所示.表 4 中,Y 代表因子组合对 NDVI 的空间分布存在显著性差异,N 代表不存在显著性差异.人文因子中的人口密度与其他 13 个因子对 NDVI 的空间分布均存在显著性差异,夜间灯光与高程对 NDVI 的空间分布均存在显著性差异.自然因子中,地形方面的坡向与高程、降水、平均气温、最高气温和最低气温因子结果存在显著性差异,高程与土地利用、相对湿度、日照时数和气压对 NDVI 的空间分布均存在显著性差异;气候方面的降水与相对湿度和气压,最低气温与相对湿度和气压的生态探测结果存在显著性差异;土地利用与降水、平均气温、最高气温和最低气温对 NDVI 的空间分布存在显著性差异;部分因子与因子之间的结果表现为 N,表明对 NDVI 的空间分布不存在显著性差异.

表4 生态探测结果(置信水平为95%)

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| X_1 | | | | | | | | | | | | | | |
| X_2 | N | | | | | | | | | | | | | |
| X_3 | N | Y | | | | | | | | | | | | |
| X_4 | N | N | Y | | | | | | | | | | | |
| X_5 | N | Y | N | Y | | | | | | | | | | |
| X_6 | N | Y | N | Y | N | | | | | | | | | |
| X_7 | N | Y | N | Y | N | N | | | | | | | | |
| X_8 | N | Y | N | Y | N | N | N | | | | | | | |
| X_9 | N | N | Y | N | Y | N | Y | Y | | | | | | |
| X_{10} | N | N | Y | N | N | N | N | N | N | | | | | |
| X_{11} | N | N | N | N | N | N | N | N | N | N | | | | |
| X_{12} | N | N | Y | N | Y | N | N | Y | N | N | N | | | |
| X_{13} | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | | |
| X_{14} | N | N | Y | N | N | N | N | N | N | N | N | N | Y | |

3 讨论

本研究提取2000年—2020年各年份的NDVI最大值,对绿心地区长时间序列的植被覆盖情况进行分析。随着社会的发展,人类活动密集处的植被覆盖度逐渐降低,低等级和较低等级面积的NDVI逐渐增多。2015年,低等级和较低等级NDVI的面积出现波动性减少;中等等级呈波动性增加,主要分布在地势平坦处;高等级和较高等级NDVI的面积主要分布在高程较高地区。从整体来看,NDVI的变化呈上升趋势的面积比下降趋势的面积多13.97%,且NDVI极显著增加和显著增加的面积要多于极显著减少和显著减少的面积,植被变化向好的趋势发展。2013年湖南省颁布了长株潭绿心地区的保护政策,将绿心地区划分为禁止开发区、限制开发区和控制建设区,这一政策大大地限制了人类在绿心地区的建设扩张行为,严格控制了绿心地区的建设。由于建设活动的减少,后续生态环境将恢复到较好水平,植被覆盖的变化也呈上升趋势。

使用地理探测器对NDVI变化的影响因素进行探究,从单因子的角度来看,主要受到人口密度的影响,人口密度代表人类活动的强度和频率,人口密度越高,NDVI的值越小;其次是高程、降水和最低气温,高程越高,NDVI的值越大,研究区的降水量和最低气温与NDVI的值均呈正比关系。从时间序列的角度来看,由于政策限制了人类的开采活动,人文因子中的人口密度对NDVI变化的影响减弱,自然因子中的高程、坡度、降水和温度对NDVI变化的影响增强。从双因子的角度来看,人口密度和坡度对NDVI变化的影响最大,且对NDVI的空间分布呈显著性差异。从14个因子的两两交互结果来看,不存在以下3种情况:一是因子独立作用对NDVI变化的影响,二是交互作用时的值小于两个因子单独作用时的最小值,三是交互作用时的值在两个因子单独作用时的值之间,这说明NDVI变化的影响因素是人文因子和自然因子共同作用的结果。在接下来的研究中,应更深入更全面地对人文因子和自然因子的影响程度进行定量研究,考虑将POI、路网数据等纳入植被变化影响因素的研究中。

绿心地区作为长株潭城市群的生态绿地,全面深入地了解绿心地区的植被覆盖情况及影响因素的驱动机制十分必要,长株潭绿心地区的规划建设还在进行中,本研究成果可为长株潭绿心地区的治理规划提供参考,以便更有针对性和方向性地对绿心地区的生态提供保护。

4 结论

1)长株潭城市群2000年—2020年NDVI的变化趋势明显,总体呈上升趋势。高等级NDVI面积的波动性增多,河流及周边地区的植被覆盖稳定不变,属于低等级。高等级NDVI聚集在研究区中部,相邻等级之

间呈镶嵌状分布.由于政策的保护,与周边地区相比,绿心地区的植被覆盖水平较高.

2)各因子对NDVI的影响程度的强弱依次为人口密度、高程、降水、最低气温、最高气温、平均气温、坡度、风速、日照时数、夜间灯光、气压、相对湿度、坡向和土地利用.其中,主要影响因素有人文因子中的人口密度和自然因子中的高程,解释力超过30%.

3)各因子之间的交互作用表现为双因子增强和非线性增强,在因子间的91个组合中,35.16%的因子组合对NDVI的空间分布具有显著性影响,14.28%的因子组合的交互值超过0.50,21.97%的因子组合的交互值在0.4~0.5.

参考文献:

- [1] JIAO W Z, WANG L X, SMITH W K, et al. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades[J]. *Nature Communications*, 2021, 12:3777.
- [2] SUN Y L, SHAN M, PEI X R et al. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2020, 115:102834.
- [3] ZHANG B W, CUI L L, SHI J, et al. Vegetation dynamics and their response to climatic variability in China[J]. *Advances in Meteorology*, 2017, 2017 :1-10.
- [4] ZHAO L, DAI A G, DONG B. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982- 2013[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 198-209.
- [5] 焦阿永,陈伏龙,闫俊杰,等.北疆地区草地 TI-NDVI 与 NDVI_{max} 时空异质性评价[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1155-1165.
- [6] 贾云飞,李云飞,范天程,等.基于长时间序列 NDVI 的黄土高原延河流域及其沟壑区植被覆盖变化分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 240-247.
- [7] 徐勇,戴强玉,黄雯婷,等.2000—2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 323-335.
- [8] 杨城,邢艳秋,马超.青藏铁路沿线 NDVI 的人类活动和气候变化响应[J]. *测绘科学*, 2022, 47(4): 137-145.
- [9] 普布次仁.归一化植被指数与降水量、土壤湿度的关系[J]. *气象*, 1995, 21(12): 8-12.
- [10] 覃文汉,项月琴.植被结构及太阳/观测角度对 NDVI 的影响[J]. *环境遥感*, 1996(4): 285-290.
- [11] 戴声佩,张勃,王海军.中国西北地区植被 NDVI 的时空变化及其影响因子分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(3): 315-321.
- [12] LIU H Y, ZHANG M Y, LIN Z S, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 10-21.
- [13] ZOUNGRANA B J B, CONRAD C, THIEL M, et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, WestAfrica[J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 153 : 66-75.
- [14] 李毅,杨仁斌,伍格致,等.长株潭核心区植被覆盖度动态监测与分析[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 265-270.
- [15] 胡顺石,彭雨龙,秦建新,等.长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J]. *经济地理*, 2019, 39(12): 178-186.
- [16] YANG J L, DONG J W, XIAO X M, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233:111395.
- [17] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [18] 赵伟,高博,卢清,等.2006—2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 97-105.
- [19] 杨玉莲,杨昆,罗毅,等.1998—2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5100-5108.
- [20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.