

DOI: 10.5846/stxb201809011864

赵维清, 李经纬, 褚琳, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力分析. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Zhao W Q, Li J W, Chu L, Wang T W, Li Z X, Cai C F. Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力分析

赵维清¹, 李经纬¹, 褚琳^{1,2,*}, 王天巍^{1,2}, 李朝霞^{1,2}, 蔡崇法^{1,2}

1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

2 华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070

摘要: 为了明确湖北省植被长势变化特征及其影响因子, 研究利用 Landsat 影像提取 2005 年、2010 年以及 2015 年湖北省景观类型信息, 分析近 10 年来景观时空变化特征; 基于 2005—2015 年夏季 MODIS/NDVI 数据, 采用一元线性回归、Theil-Sen median 趋势、Mann-Kendall 检验等分析方法对 NDVI 时空变化特征及其显著性进行探讨; 采用最小二乘法对 NDVI 与气候之间的相关关系进行分析。使用 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光数据探讨 NDVI 与人类经济活动之间的关系。结果表明: 研究区景观类型变化以建设用地和耕地为主。耕地面积呈现逐年减少的趋势, 主要转变为建设用地。建设用地面积不断增多, 主要由耕地和林地转变而来, 集中在武汉、荆州、襄阳城市圈; 研究区 NDVI 值整体上表现为西高东低, 以林地为主的十堰、恩施等地区 NDVI 值较高, 以建设用地为主的武汉、襄阳、荆州等地区 NDVI 值较低; 整体上 NDVI 变化呈轻微改善趋势, 局部地区下降明显, 鄂西北、鄂西南等地区 NDVI 稍有上升, 武汉城市圈植被呈退化趋势; NDVI 与降水量、气温的相关性均较弱, 气候因子不是该区 NDVI 变化的主导因子; NDVI 与夜间灯光亮度值呈显著负相关, 相关系数达 -0.8030, 整体上人类经济活动与 NDVI 呈负相关关系, 且有着分区性的特点, 在武汉、襄阳等以建设用地为主的地区人类经济活动对 NDVI 起抑制作用, 而在恩施、十堰等林地为主的地区人类活动对 NDVI 起促进作用。人类社会经济活动是影响研究区景观格局和植被变化的重要驱动力, 城镇化扩张是湖北省植被变化的主要原因。

关键词: 湖北省; NDVI; 时空分布; 气候因子; 夜间灯光数据; 驱动力分析

Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years

ZHAO Weiqing¹, LI Jingwei¹, CHU Lin^{1,2,*}, WANG Tianwei^{1,2}, LI Zhaoxia^{1,2}, CAI Chongfa^{1,2}

1 Department of Resource and Environmental Information, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River) of the Ministry of Agriculture, Soil and Water Conservation Research Centre, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: To analyze the variation of vegetation growth and further explore the reasons for these changes in Hubei Province, we extracted landscape type information of Hubei Province in 2005, 2010, and 2015 using Landsat data, and analyzed the spatial and temporal evolution characteristic of landscape patterns. Based on the MODIS NDVI data in the summers of 2005 to 2015, the characteristics of spatial and temporal variation in NDVI and its significance were explored by using unitary linear regression analysis, Theil-Sen median trend analysis, and Mann-Kendall test. The relationship between NDVI and climatic factors (temperature and precipitation) was explored using the least squares method. The relationship between

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505401); 国家自然科学基金 (41877071); 中央高校基本科研业务费专项资助项目 (2662016QD030)

收稿日期: 2018-09-01; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chulin@mail.hzau.edu.cn

NDVI and human economic activities was also examined based on DMSP/OLS and NPP-VIIRS night-time light data. The results concluded that cultivated land and construction land were the landscape types that varied most in the study area between 2005 and 2015. The area of cultivated land continued to decline, and most of the area lost was transferred into construction land. The area of construction land continued to increase, and most of this increase was transferred from cultivated land and woodland, which were distributed in Wuhan City, Jingzhou City, and Xiangyang City. The NDVI value of the study area was generally high in the west and low in the east. The areas with higher NDVI values such as Shiyan and Enshi had woodland as the major landscape type. The areas with lower NDVI values such as Wuhan, Xiangyang, and Jingzhou, had construction land as the major landscape type. The overall variation of NDVI showed a slight improvement trend in Hubei Province. There was also an obvious declining trend for NDVI variation in some areas. The NDVI in the northwestern and western parts of Hubei Province increased slightly, and the vegetation in the Wuhan city showed a degrading trend. The correlation between NDVI and climatic factors (temperature and precipitation) was weak, which indicated that climatic factors are not the dominant factor causing NDVI variation. There was a significant negative correlation between NDVI and night-time light value, with a correlation coefficient of $r = -0.8030$. Overall, human economic activities were negatively correlated with NDVI, which also showed partitioning characteristics. Human economic activities have inhibited NDVI in areas where construction land is dominant such as Wuhan and Xiangyang, while NDVI is promoted in areas where woodland is dominant such as Enshi and Shiyan. Human economic activities were the key driving force for landscape pattern and vegetation variation in the study area. Urban expansion was the main reason for the spatial and temporal variations of vegetation in Hubei Province.

Key Words: Hubei Province; NDVI; spatial and temporal distribution; climatic factors; night light data; driving force analysis

在全球环境变化中,植被扮演着陆地生态系统中最重要的作用。植被不仅参与全球物质与能量循环、调节全球气候,同时在自然地理环境中起到“指示器”的作用^[1]。植被通过光合作用、地表反射率以及粗糙度调节生物圈层中的能量转换、碳循环和气候变化。从不同空间、时间尺度上理解植被变化及其与气候变量之间的关系不仅能揭示植被对气候变化的响应机制,还能预测植被未来生长趋势^[2]。通常,通过遥感光谱计算的植被指数来研究植被和环境的变化关系^[3-4]。其中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是监测地区或全球植被和生态环境的有效指标,是植被生长状况及植被覆盖度的最佳指示因子^[5-6]。

近年来,利用遥感数据对植被覆盖变化特征的研究已经较为成熟,研究尺度多样、范围广、时间连续性强。国内外学者通过一元线性回归分析、Mann-Kendall 非参数检验、时间序列稳定性分析等方法对不同时空植被覆盖区域 NDVI 的时空分布特征展开了深入探讨,如 Park 等^[7]基于 1982—2006 年东亚地区生长季平均 NDVI 数据,发现以 90 年代中期为转折点,研究区植被覆盖变化趋势由增加转变为停滞或下降;Piao S 等^[8]对于欧亚大陆植被覆盖变化的研究同样表明了 1997 年前后 NDVI 变化趋势发生了逆转,转折点在不同地区有所不同;我国学者对于黄土高原^[9]、青藏高原^[10]、三江源^[11]、华北^[12]等地区的植被覆盖时空变化进行了大量研究,得出了有意义的结论。

在此基础上,国内外逐渐把研究领域扩展到植被及其驱动因子的响应和反馈关系上来。蒙古军等^[13]基于 AVHRR 数据集,研究发现 20 世纪 80 年代以来,我国西南喀斯特地区植被覆盖受气温变化的影响要高于降水;刘绿柳^[14]等通过研究黄河流域 NDVI 与气候因子关系的时空变化规律发现,二者呈显著相关的植被类型以草地、灌木为主,但相关区域的空间位置随时间变化。伴随着遥感技术的发展,MODIS 数据因其质量高、光谱分辨率高、获取便捷等优势成为大尺度植被覆盖研究的主要基础数据^[15]。徐浩杰等^[16]利用 2000—2010 年间 MODIS/NDVI 数据和气候资料证明了影响祁连山植被生长的主要因子是气温和降水;褚琳等^[17]采用 MODIS/NDVI 数据结合气候观测数据对近 10 a 来玛曲湿地变化与气候间相互关系进行了探讨,发现 NDVI 与

降水量及温度均有关系,但与前者相关性更强。

植被覆盖的时空变化不仅与气候因子密切相关,人类活动也是重要的驱动因子。国内外学者通过预测气温和降水因子对 NDVI 的贡献率,剔除自然因素的影响从而得到人为因素的作用,如张嘉琪等^[18]基于残差分析法探讨了人为因子对植被覆盖变化的影响,发现人类活动对山西省植被覆盖变化的正影响远大于负影响;韦振锋等^[19]采用同样的处理方法,发现我国西北地区植被变化强度空间差异是人类活动和气候要素共同作用的结果。由于 DMSP/OLS 传感器具有能够探测到城市灯光甚至小规模居民地和低强度灯光等特点,目前已被广泛应用到城市与环境关系的研究当中。胡稳^[20]利用 MODIS 植被指数产品及 DMSP/OLS 遥感影像数据对贵州省近 10 a 间年际和空间的夜间灯光及 NDVI 动态变化进行分析,结果表明 NDVI 与夜间灯光强度呈反相对关系;程志刚等^[21]利用植被覆盖数据和夜间灯光数据对成都地区近 16 a 来城市化进程对植被覆盖度的影响进行了研究,发现植被覆盖度与夜间灯光亮度值呈显著负相关关系;董晨炜等^[22]利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据和 MODIS/NDVI 数据发现环杭州湾地区城市扩张对植被产生了不利影响;李景刚等^[23]利用 DMSP/OLS 和 SPOT/NDVI 数据评价了环渤海城市群快速城市化的生态效应。

目前许多学者在研究植被覆盖变化时,对气候因子的关注居多,对人为因子的考虑较少,并且在对气候因子的研究中,主要以对研究区域植被指数与降水、气温等要素进行简单相关分析或回归分析为主,少有对特定区域进行 NDVI 像元尺度的多元回归分析以及定量区分气候因子与人类活动对植被指数的影响方面的研究。因此,本研究利用多元回归方法对研究区域进行 NDVI 像元尺度的分析,准确分析了气候因子对植被指数的影响及贡献,将气候因子与人为因子对植被指数的影响进行了定量区分,对湖北省植被指数进行了分析和研究,旨在为当前城市建设及可持续发展,土地资源的合理利用、开发与保护,提供有效的决策支持。

湖北省处于中国地势第二阶梯向第三阶梯的过渡地带,位于长江中游地段,地形复杂多样,生物资源丰富^[24]。本文基于湖北省 2005—2015 年夏季 MODIS/NDVI 数据,在 250 m×250 m 的空间分辨率和 11 a 的时间尺度上,结合气象数据和夜间灯光数据,详细分析了 2005—2015 年湖北省景观类型空间格局变化特征、NDVI 的时空变化特征,探讨了气候因子与人为因子在植被演化过程中的驱动作用,以期对湖北省生态环境的保护与建设提供参考和依据。

1 研究区概况

湖北省位于我国中部、长江中游,介于 29°05′—30°20′N, 108°30′—116°20′E 之间(图 1),面积 18.59 万 km²,占全国总面积的 1.95%。湖北省作为我国交通枢纽、中部崛起战略的重要支点,近年来在全国经济东西结合、南北交流的战略格局中的作用不断提高,经济得到较快发展,城市化进程显著。湖北省地貌类型多样,山地、丘陵、岗地和平原兼备;地势高低相差悬殊,全省地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地^[25]。该区域属于亚热带季风湿润气候,年均降水量 800—1600 mm,年平均气温 15—22℃。景观类型多样,其中以耕地、林地、水域为主,拥有国家级生态示范区 10 个,森林生态站 4 个,分别是大巴山、神农架、秭归和恩施森林生态站^[26]。

2 数据来源与处理

2.1 景观分类

研究选用 2005 年、2010 年 Landsat-5 TM 影像和 2015 年 Landsat-8 OLI 影像,数据来源于美国地质调查局(USGS)(<http://glovis.usgs.gov/>),3 期影像选择了云量少、月份接近的夏季数据,空间分辨率均为 30 m。在 ENVI 5.0 中对这三期遥感影像进行辐射定标、大气校正、去云等预处理,并进行影像拼接,使用湖北省行政边界进行裁剪,得到研究区遥感影像数据。

景观格局分类依据参照《中科院土地利用覆盖分类体系》,根据湖北省的实际情况,分类标准调整如表 1 所示,分有一级类 6 类,二级类 19 类。采用监督分类与人工目视解译相结合的方法,对研究区 2005 年、

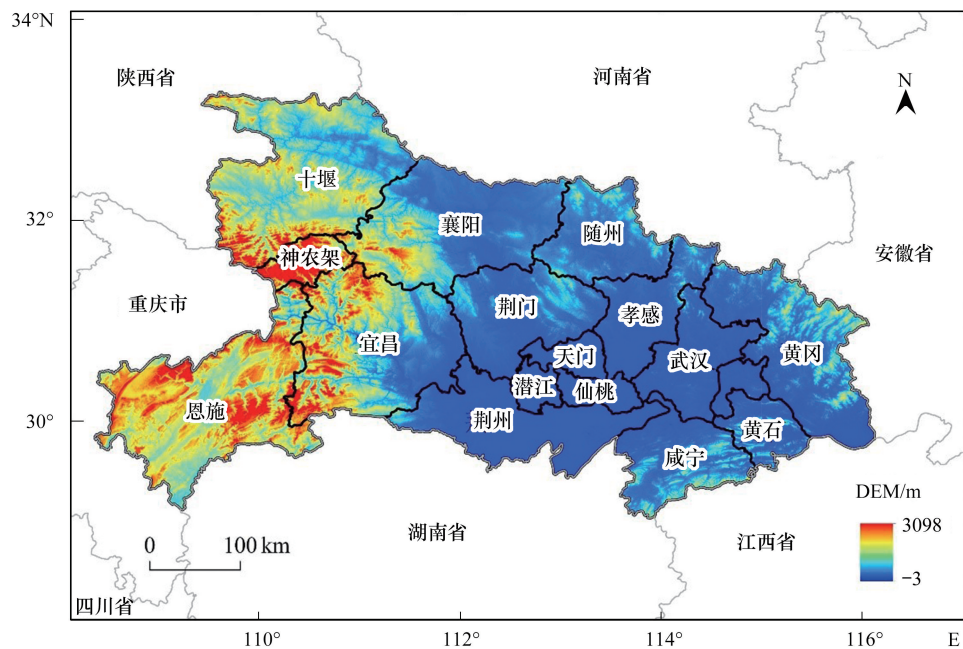


图 1 湖北省地理位置

Fig.1 Geographical location of Hubei Province

2010 年、2015 年三期景观类型与格局信息进行解译提取。经验证,满足研究需要。根据地图代数原理,建立景观类型转移矩阵模型,定量分析各景观类型间相互转变的方向、强度。

表 1 景观格局分类标准

Table 1 Landscape pattern classification standard

一级类 First classification	二级类 Secondary classification	一级类 First classification	二级类 Secondary classification
耕地 Cultivated land	水田	水域 Waters	河渠
	旱地		湖泊
林地 Woodland	有林地		水库坑塘
	灌木林		滩地
	疏木林	建设用地 Construction land	城镇用地
	其它林地		农村居民点
草地 Grassland	高覆盖度草地	未利用地 Unutilized land	其它建设用地
	中覆盖度草地		沼泽地
	低覆盖度草地		裸土地
			裸岩石质地

2.2 MODIS NDVI

NDVI 数据集来源于美国国家航空航天局 2005—2015 年 Terra-MODIS13Q1 16d 合成的产品数据,空间分辨率为 250 m,已完成几何校正、辐射校正、大气校正等处理。使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件将 NDVI 数据由 HDF 格式转换为 Tiff 格式,同时完成区域拼接和投影转换。

基于 TIMESAT 平台对 NDVI 时间序列进行 Savtzyk-Golay(S-G)平滑滤波处理,得到 2005—2015 年每 16 天一幅的 MODIS NDVI 数据。S-G 滤波的表达式如下:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1}}{2m + 1}$$

(1)

式中, Y_j^* 代表滤波后的 NDVI 值, C_i 代表 S-G 滤波器的滤波系数, 即平滑窗口, m 代表平滑窗口的半宽, Y 代表原始的 NDVI 值。

对各年夏季(6—8 月)遥感影像采用 MVC(Most Value Composite, 最大值合成法)进行计算, 并利用湖北省行政区划图进行裁剪, 得到 2005—2015 年湖北省夏季 NDVI 图。

2.3 气象数据

研究选用湖北省及周边地区共计 72 个有效气象测站的气温和降水数据, 统计 2005—2015 年夏季均温和降雨量数据, 该数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)的中国地面气候资料月值数据集。在 ArcGIS 10.5 中分别使用自然邻域法、样条函数法、克里金法以及反距离权重法对试验站点数据进行空间插值处理, 利用交叉验证对几种算法进行比较, 采用误差相对较小的克里金插值方法进行气象数据空间插值, 气温和降水的插值误差分别为 0.6℃ 和 24.6 mm, 满足精度要求, 像元大小设置为 250 m, 通过数据掩膜提取研究区 11 a 间年均气温和年降水量栅格数据。

2.4 夜间灯光数据

Elvidge 等^[27]研究表明通过夜间灯光数据可以较好地估算 GDP 等多项社会经济数据, 夜光遥感影像和人类活动存在较高的相关性, 夜间灯光数据可以反映人类社会经济活动状况。本研究 2005—2013 年所采用的夜间灯光数据 DMSP/OLS 来自 3 个不同的传感器: F15(2000—2007 年)、F16(2004—2009 年)、F18(2010—2012 年), 由于不同传感器之间的固有差异及成像环境等因素的影响, 导致不同年份、不同传感器的长时间序列数据之间不具有连续性和可比性^[28-29], 参照邹进贵等^[30]的校正模型对夜间灯光图像进行校正。

2014、2015 年使用的 NPP/VIIRS 月合成数据来自美国国家地球物理数据中心(http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_viirs_ntl.html), 是由 Suomi-NPP 卫星利用其可见红外成像辐射仪(VIIRS)在 2014 年 1 月至 2015 年 12 月间拍摄, 距地表大约 824 km, 采用极地轨道, 由多幅无云影像合成得到。由于夜间灯光无云合成产品并未移除火光、气体燃烧、火山和极光等短时瞬间灯光造成的极亮像元以及低辐射检测带来的背景噪声数据, 因此需作相应处理以滤除灯光噪声。选择武汉市内最高灯光亮度值作为最大灯光阈值以滤除极亮像元值; 对于低辐射背景噪声值, 在 Google Earth 影像中, 从湖北省行政区划内选择湖泊、水库等面积较大的水域中的采样点, 在对应 NPP-VIIRS 夜间灯光数据中寻找对应地理坐标并提取该位置像元值, 计算各采样点平均像元值作为最小灯光阈值, 小于最小灯光阈值的像元赋值为 0。

将 DMSP/OLS 夜间灯光数据重采样为 500 m×500 m, 在 ArcGIS 10.5 平台中利用湖北省行政区划裁剪这两种夜间灯光数据。

3 研究方法

3.1 一元线性回归分析

本文采用一元线性回归分析法定量研究 NDVI 的变化趋势, 该方法可以模拟每个栅格的变化趋势, 以单个像元时间变化特征反映整个空间变化规律, 综合反映时空格局演变^[31]。对预处理后的 2005—2015 年夏季 NDVI 数据集, 对于该图像中每个像元(区域), 都相应有 11 a 的时间序列数值, 这些数值的线性趋势系数揭示了该像元(区域)在 11 a 的时空序列中的演变趋势, 趋势斜率用最小二乘法计算, 公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n * \sum_{i=1}^n i * \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n * \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中, Slope 为某栅格 2005—2015 年 NDVI 的变化趋势, n 为年份总数, i 为年序数; Slope>0 说明植被状况趋于正向趋势发展; 反之, Slope<0 则说明植被状况趋于退化^[32]。

3.2 Theil-Sen median 趋势分析

研究采用 Theil-Sen median 趋势分析耦合 Mann-Kendall 检验方法分析研究区 2005—2015 年 NDVI 改善

或退化的趋势的显著性。该方法的优点是不需要数据服从一定的分布,对数据误差具有较强的抵抗能力,对于显著性水平的检验具有较为坚实的统计学理论基础,使得结果较为科学和可信^[33]。其中,Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right) \quad (3)$$

式中, NDVI_i 和 NDVI_j 为样本数据值; β 指计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数;当 $\beta>0$ 时反映了这一时间序列的 NDVI 呈增强趋势;反之,则为减弱趋势。

3.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 属于非参数检验方法,用于判断时间序列数据是否具有上升或下降的趋势,它无需样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰^[34-35]。计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (5)$$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

$$\text{sign}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,本文在置信水平 $\alpha=0.05$ 上判断 NDVI 变化趋势的显著性,将检验结果 Z_c 划分为显著变化($|Z_c|>1.96$)和不显著变化($|Z_c|<1.96$)^[36]。

3.4 相关性分析

对 2005—2015 年湖北省夏季 NDVI 与气候因子(温度和降水量)逐像元进行相关性分析,同时对相关系数进行显著性检验,以反映植被分布在空间上与气候的相关关系^[37]。要分析 NDVI 与气候因子的相关性,就要先计算简单相关系数,再计算偏相关系数。NDVI 与气候因子简单相关系数计算公式如下:

$$r_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^n [(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \quad (8)$$

式中, $r_{a,b}$ 为 a、b 两变量的相关系数; a_i 为第 i 年 NDVI 值; b_i 为第 i 年气候因子; $\bar{a}$ 为 11 a 夏季 NDVI 的平均值; $\bar{b}$ 为 11 a 夏季气候因子的平均值; i 为年数。

基于降水量的 NDVI 与温度的偏相关系数以及基于温度的 NDVI 与降水量的偏相关系数计算公式如下:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac} r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) + (1 - r_{bc}^2)}} \quad (9)$$

式中, $r_{ab,c}$ 为变量 c 固定后变量 a 与 b 的偏相关系数。

4 结果与分析

4.1 景观时空变化分析

以三期景观类型数据(图 2)为基础,获得景观类型转移空间分布图(图 3)。统计结果表明,林地、耕地是湖北省最主要的景观类型,面积之和占全区总面积的 85%以上,其中林地约占 50%。除以上两种景观类型外,以居民地和工业用地为代表的建设用地广泛分布于全区,其中以武汉、襄阳、宜昌等城市最为集中。由图 4 可知,近 10 年间,湖北省耕地、林地、草地、未利用地面积呈下降趋势,其中耕地面积明显减少,2005—2010 年、2010—2015 年分别减少 387.85 km²和 1181.92 km²,在全省总面积的占比从 2005 年的 37.00%下降至 2015 年的 36.16%,后五年的减少量是前五年间的 3 倍;林地面积缓慢下降趋势,前五年减少 55.38 km²,后五年减少 364.85 km²,面积占比从 49.89%下降至 49.66%,后五年的减少量为前五年的 6.6 倍。建设用地、水域面积呈上升趋势,其中建设用地面积由 2005 年的 5417.73 km²增加至 2010 年的 5771.77 km²,再到 2015 年的 7298.25 km²,相应占比则由 2.91%缓慢上升至 3.10%再快速上升至 3.92%,后五年面积增加量为前五年的 4.3 倍,这与近年来湖北省经济建设的需要以及城市扩张的趋势相符合;水域面积缓慢上升,2005—2010 年、2010—2015 年分别增加 96.58 km²和 96.37 km²,在全省面积的占比由 6.18%上升至 6.28%,主要表现为水库面积的增加,这归因于以“长治”工程、“丹治”工程为代表的水土保持工作的大力开展以及对水利设施建设的重视。

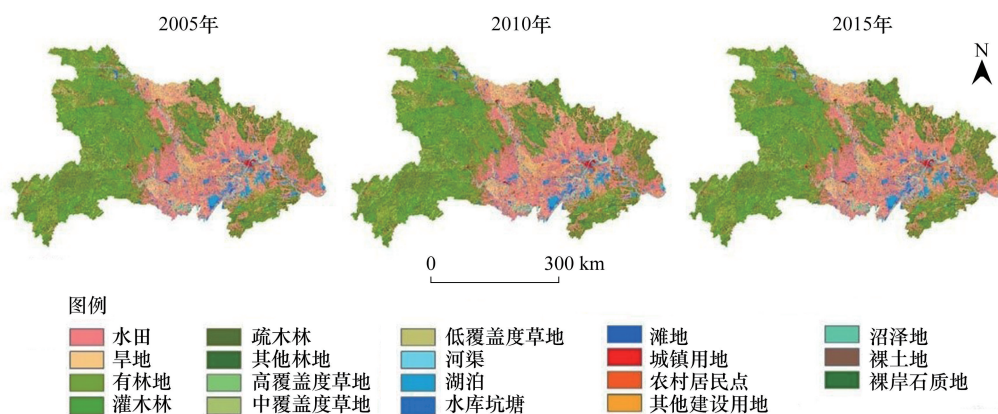


图 2 2005 年,2010 年,2015 年湖北省景观类型

Fig.2 Land use map of Hubei Province 2005,2010 and 2015

对 2005—2015 年的湖北省土地利用面积转移矩阵进行统计排序,结果显示 97.49%的景观类型在 11 a 内没有发生变化(表 2),在整个研究区中,居民地和工业用地变化最为剧烈。面积变化最大的景观类型为水田转为工业用地,占全区面积的 0.62%,其次是旱地转为工业用地和疏林地转为工业用地。统计各景观类型转入转出率(图 5),结合 2005—2010 年、2010—2015 年景观类型数据进行空间分析发现,2005—2010 年,转入率最高的景观类型是建设用地(11.76%),其次是未利用地(3.67%),转出率最高的是未利用地(2.05%)和水域(1.19%);2010—2015 年,景观类型变化规模扩大,建设用地转入率最高(25.54%),其次是水域(2.31%),转出率最高的是未利用地(9.35%)和耕地(1.85%)。结果表明,2005—2015 年,整体上林地、草地的转入率

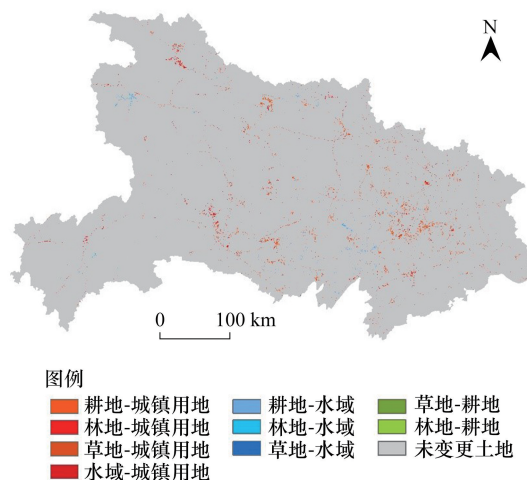


图 3 湖北省 2005—2015 年景观类型转移空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of landscape types in Hubei 2005—2015

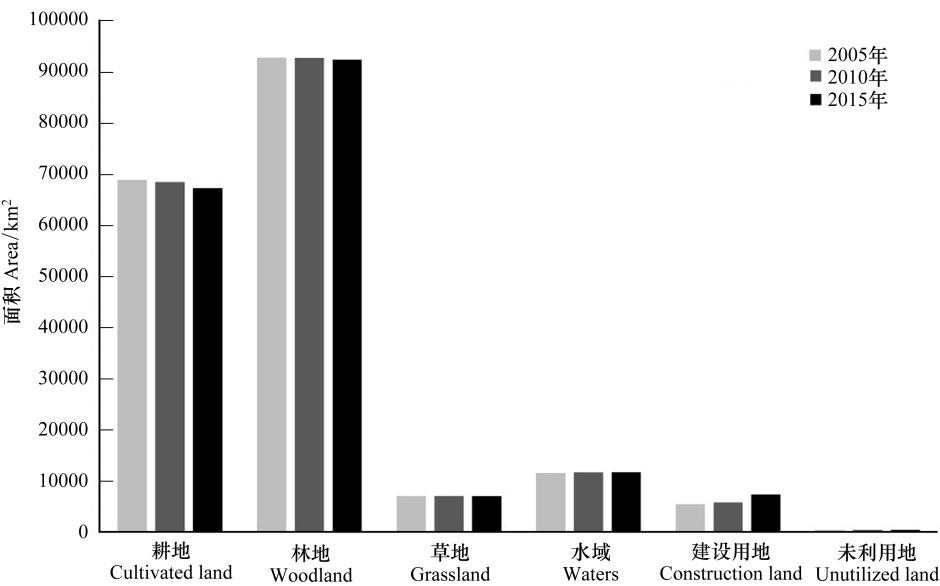


图 4 湖北省近 10 年一级类景观面积及变化

Fig.4 Landscape area and its change of first level in the past decade in Hubei

(0.10%和 0.16%) 远小于其相应转出率 (0.26% 和 1.13%),说明 11 a 间湖北省植被覆盖面积有所降低。耕地、林地急剧减少,均转向建设用地,且后五年变化率高于前五年,主要发生在襄阳、荆州及武汉城市圈,这表明建设用地扩展的主要来源是对耕地、林地的占用,在城市化进程中,耕地、林地的大量流失已成为一个不可忽视的事实。

表 2 2005—2015 年湖北省景观变化的主要类型面积统计

变化类型 Change type	面积 Area/km ²	占比 Percent/%
没有变化 None	101019.27	97.49
水田转为工业用地 Paddy field-Industry area	644.99	0.62
旱地转为工业用地 Dry land-Industry area	417.56	0.40
疏林地转为工业用地 open forest land-Industry area	200.50	0.19
水田转为居民地 Paddy field-Residential area	140.47	0.14
水田转为水库 Paddy field-reservoir	130.42	0.12
旱地转为居民地 Dry land-Residential area	105.86	0.10

4.2 植被 NDVI 的时空变化趋势分析

4.2.1 空间分布特征

对研究区 11 a 的夏季最大 NDVI 值取平均,得到湖北省植被覆盖分布情况(图 6)。整体来看,NDVI 值由东向西逐渐递增,鄂西北、鄂西南地势较高,景观类型主要为林地,为 NDVI 高值区,其中最大值达到 0.9550;而中部、东部地势平坦,河网密集,大小湖泊星罗棋布,景观类型主要为耕地、建设用地,NDVI 值较低。

由各级 NDVI 值的面积比例看,NDVI 值小于 0.30 的区域占总面积的 1.39%,NDVI 值大于 0.50 且小于 0.80 的面积最大,占研究区总面积的 48.47%,表明湖北省植被覆盖情况良好,荒漠化土地较少,林地、草地等景观类型覆盖面积大。NDVI 值大于 0.80 说明植被生长状况良好,NDVI 在这一范围的区域面积占 47.86%,景观类型以林地为主,主要分布在鄂西北以及鄂西南的森林区,植被类型以常绿、落叶阔叶混交林为主。

4.2.2 空间分布格局的时间变化特征

(1) 时空变化趋势

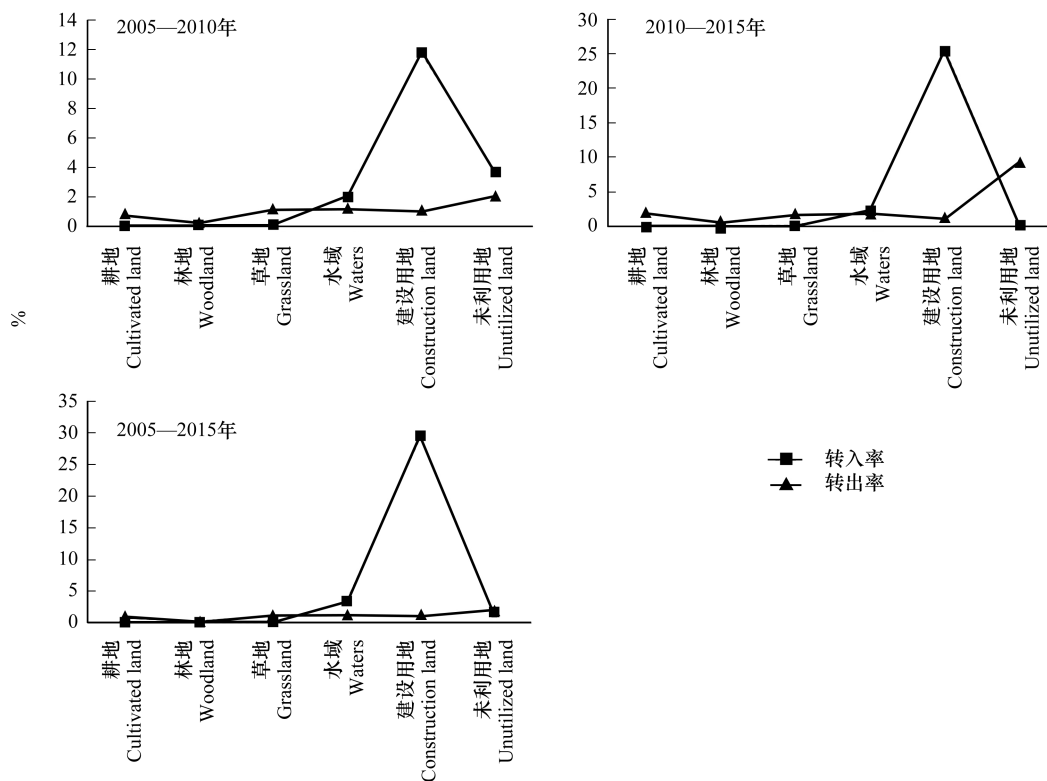


图 5 湖北省近 10 年景观类型转入转出率

Fig.5 Conversion rate of landscape types in the past decade in Hubei

研究采用 Slope 趋势分析法,基于 Arcgis10.5 平台对 2005—2015 年夏季 NDVI 数据进行处理,得到夏季 NDVI 线性变化趋势图(图 7)。NDVI 变化斜率为正,表示随时间推移植被指数呈现增加趋势;反之,表示随时间推移植被指数呈现减少趋势。

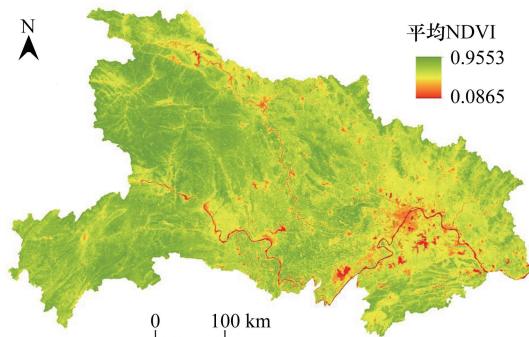


图 6 湖北省 2005—2015 年夏季平均 NDVI 空间分布图

Fig.6 Distribution of average NDVI in summer in Hubei from 2005 to 2015

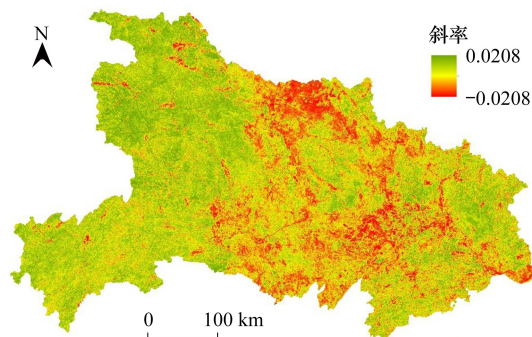


图 7 湖北省 2005—2015 年夏季 NDVI 线性变化趋势

Fig.7 Linear trend of NDVI in summer in Hubei from 2005 to 2015

由图可以看出湖北省 2005—2015 年夏季 NDVI 变化斜率范围在 -0.0208 与 0.0208 之间,平均值为 0.0026 ,夏季 NDVI 总体上保持相对稳定。NDVI 减小的面积为 70753.13 km^2 ,占研究区总面积的 38.04% ; NDVI 增加的面积为 115264.94 km^2 ,占总面积的 61.96% 。

统计结果可知,NDVI 增加率在 $0-0.01/\text{a}$ 的区域面积最大,占总面积的 35.21% ;有些区域植被增加率达到了 $0.02/\text{a}$ 以上,零星分布在鄂西北秦岭大巴山地与鄂东北大别山地,最大值达到 $0.0208/\text{a}$;植被指数减小

的区域在整个湖北省范围均有分布,主要集中于武汉城市圈、宜荆荆城市带以及襄十随城市带,最小值为 $-0.0208/a$ 。

(2) 显著性分析

植被变化的显著性选用 Theil-Sen 中值趋势分析耦合 Mann-Kendall 检验方法度量,得到研究区 NDVI 变化趋势及其显著性图像(图 8)。以 $|Z|$ 等于 1.96 为临界阈值, $|Z|$ 大于 1.96 表示置信水平小于 0.05,即变化趋势显著;统计量绝对值小于 1.96 表示置信水平大于 0.05,即变化趋势不显著。由此将研究区植被变化趋势划分为 5 种类型:显著退化、轻微退化、基本不变、轻微改善、显著改善,其中植被基本不变时统计量为 0。

统计结果显示,湖北省从 2005—2015 年间,夏季 NDVI 整体上保持相对稳定,各个变化趋势面积所占的比例从大到小依次是:轻微改善 (44.94%) > 轻微退化 (28.63%) > 显著改善 (14.33%) > 基本不变 (6.52%) > 显著退化 (5.58%)。

NDVI 变化具有明显的区域差异,从空间分布上看具有如下特点:①显著退化的区域分布在武汉市、襄阳市及其周边地区,退化面积为 10371.38 km^2 , 占总面积的 5.58%,主要是由于近年来城市化进程加快、城市扩张加速,建筑用地、居民用地等侵占了耕地、林地、草地,导致 NDVI 显著降低;②轻微退化的区域主要分布在鄂中部、东部,行政范围包括武汉市、仙桃市、荆州市,退化面积为 53263.44 km^2 , 占总面积的 28.63%;③基本不变的区域范围较广,零散分布于整个研究区,面积为 12133.31 km^2 , 占总面积的 6.52%;④轻微改善的面积最大,主要分布在鄂西北、鄂西南以及鄂东部的黄冈市、咸宁市,改善面积为 83593.06 km^2 , 占总面积的 44.94%。这是由于建立了鄂西北山地常绿、落叶阔叶混交林生态屏障建设区,鄂西南山地常绿阔叶林生态屏障建设区,鄂东北低山丘陵森林生态屏障建设区以及丹江口水库水源涵养区,加强了退耕还林及封山育林力度,提高了区域水源涵养功能,控制水土流失,注重水利设施建设,导致植被恢复情况较好,NDVI 有所提升;⑤显著改善的区域分布在鄂西北(十堰)、鄂西南(恩施)以及鄂东北(黄冈)小部分地区,改善面积为 26657.00 km^2 , 占总面积的 14.33%。

4.3 植被长势与区域气候波动的相关性

4.3.1 气候波动特征

图 9 为研究区近 11 年来夏季气温、降水量变化及其线性趋势。图中显示湖北省夏季降水量多年均值约为 165.37 mm , 各年份以此为基础上下波动;2005 年处于峰值 (232.22 mm), 2006 降至谷底 (119.47 mm), 2007—2009 年呈下降趋势, 2010 年略有回升, 2011—2014 年降水量相对平稳, 2015 年反弹回峰值 (220.53 mm)。整体来看湖北省近 11 年的夏季降水量变化并不显著 ($P > 0.05$), 略有下降趋势。

由图可以看出,近 11 年湖北省夏季气温多年均值约为 25.86°C , 其中 2007—2008 年, 2009—2011 年气温较稳定, 2011—2013 年气温呈现上升趋势, 在 2013 年达到峰值 (27.45°C), 2013—2015 年气温下降且幅度较大, 在 2015 年下降至谷底 (23.73°C)。总的来说,湖北省夏季气温变化幅度稍大于降水量,但波动仍然不显著 ($P > 0.05$)。

4.3.2 NDVI 与气候因子的相关关系

为进一步研究 NDVI 对降雨和温度的响应,本研究以年为时间单位,分别计算各像元 2005—2015 年夏季 NDVI 与降水量、平均气温的偏相关关系。统计表明研究区内夏季 NDVI 与降水量、均温的平均偏相关系数为 -0.0160 和 -0.0390 , 和夏季降水量呈负相关的区域面积占总面积的 52.33%, 而和夏季均温呈负相关的区域面

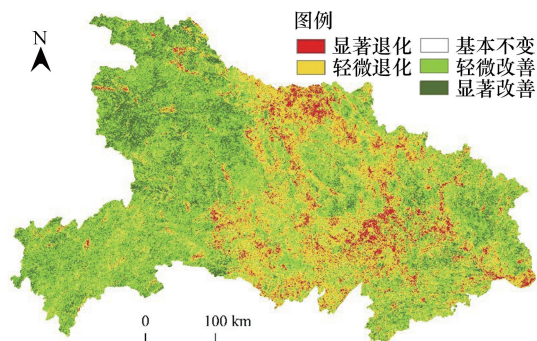


图 8 湖北省 2005—2015 年夏季平均 NDVI 变化趋势及显著性图
Fig.8 Summer NDVI change trends and significant figures in Hubei from 2005 to 2015

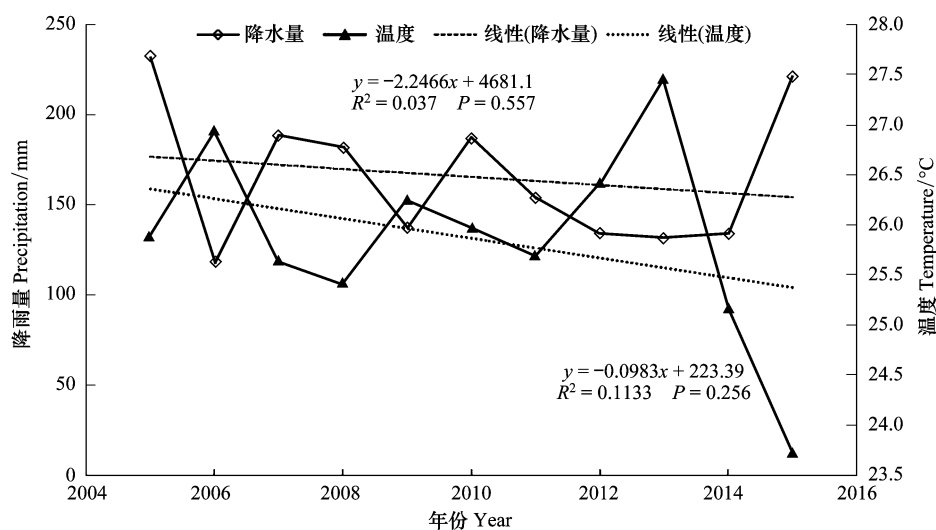


图 9 湖北省 2005—2015 年夏季气温、降水量变化趋势

Fig.9 Variation trend of temperature and precipitation in summer in Hubei from 2005 to 2015

积占总面积的 62.64%,表明湖北省植被生长与气候因子相关性均较弱。

如图 10 所示,夏季 NDVI 与降水量变化之间呈不显著负相关关系的面积最大,占总面积的 52.85%,主要分布于鄂西北与鄂东南地区,其中鄂西北属于北亚热带秦巴山地气候区,景观类型主要为林地,而鄂东南为武汉城市圈,景观类型以建设用地、耕地为主;呈不显著正相关的面积次之,占总面积的 47.00%,在研究区全区都有离散分布,其中襄阳市附近较为集中。整体来看,近 11 年来湖北省夏季降水量与 NDVI 之间是正负相关并存的,呈负相关的区域较正相关的区域面积稍大,但 99.85%的地区内 NDVI 与降水量的空间相关没有达到 0.05 显著性水平,可见湖北省 NDVI 受降水量影响较小。

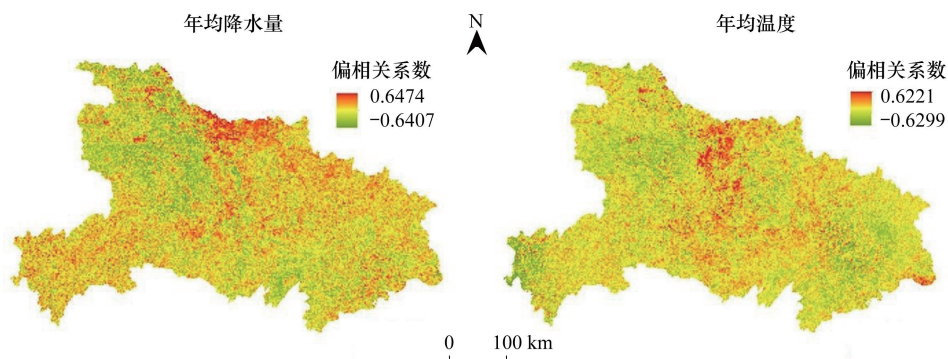


图 10 湖北省 2005—2015 年夏季 NDVI 与夏季年均降水量和夏季年均温度偏相关系数空间分布图

Fig.10 Partial correlation between NDVI and climatic factors in summer in Hubei from 2005 to 2015

研究区夏季 NDVI 与气温呈正相关的地区主要分布于襄阳市及其周边地区以及鄂东部小部分地区,同 NDVI 与降水量呈正相关区域的分布情况基本一致,这部分地区面积占研究区总面积的 37.96%;呈不显著负相关的地区仍然占比最大(62.01%),集中分布于鄂西北、鄂西南以及鄂东南地区。整体来看,研究区内夏季 NDVI 与气温呈不显著相关关系的区域占比高达 99.97%(未达到 0.05 显著性水平),表明湖北省夏季植被变化同气温的关系并不密切。

4.4 植被长势与人为因子的关系

对研究区 11 a 的夜间灯光亮度值取平均,得到湖北省平均夜间灯光分布图(图 11)。整体来看,DN 值由东向西逐渐递减,鄂西北、鄂西南为 NDVI 低值区,其中最小值为 1.5554;而以武汉市为代表的鄂东部、中部地

区夜间灯光亮度均值较高,最高可达 60.7947。

为进一步研究湖北省 NDVI 与人类社会经济活动的关系,本文将 11 a 平均夜间灯光亮度值分为 0—10, 10—20, …, 50—63 共 6 层,采取分层采样的方法,每层随机选取 50 个采样点并提取采样点对应的 11 a 平均 NDVI,分析平均夜间灯光 DN 值与平均 NDVI 的相关关系。若相关系数为负,表示夜间灯光亮度对研究区 NDVI 具有削减作用;反之,则表示有增强作用。

由图 12 可知,多年平均 NDVI 与夜间灯光亮度平均值呈负相关关系,相关系数为 -0.8030 (通过 0.05 的显著性检验)。结果显示随着夜间灯光亮度值的增大,对应的 NDVI 值呈减小趋势,即人类社会经济活动对 NDVI 起抑制作用。夜间灯光亮度值大于 40 的区域主要分布在湖北省区域发展“A 型点轴结构”的交点处,这些城市圈人口众多,社会经济活动频繁,根据 NDVI 与夜间灯光亮度的负相关关系可知这些区域的归一化植被指数较低,与夏季平均 NDVI 空间分布情况基本吻合。

对 2005—2015 年 NDVI 与夜间灯光亮度值逐像元进行相关性分析(图 13),并利用研究区市级行政区划对其进行裁剪,结果表明呈负相关关系的区域主要集中在武汉、襄阳、荆州,景观类型以建设用地、耕地为主;呈正相关关系的区域主要集中在恩施、十堰、黄冈,景观类型以林地、草地为主。

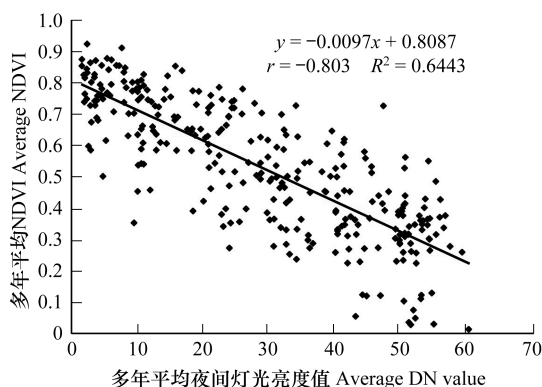


图 12 近 11 年平均 NDVI 与夜间灯光亮度值散点图

Fig. 12 The scatter diagram of average NDVI and nightlight value for 11 years

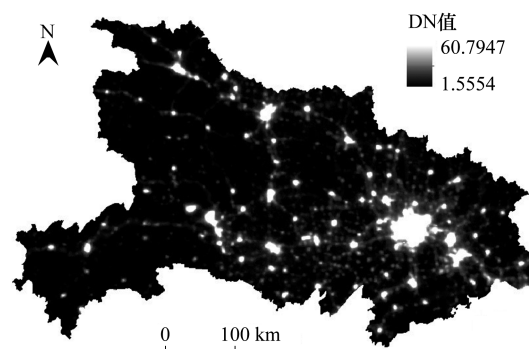


图 11 湖北省 2005—2015 年平均夜间灯光分布图

Fig. 11 The distribution of average nightlight value in Hubei Province from 2005 to 2015

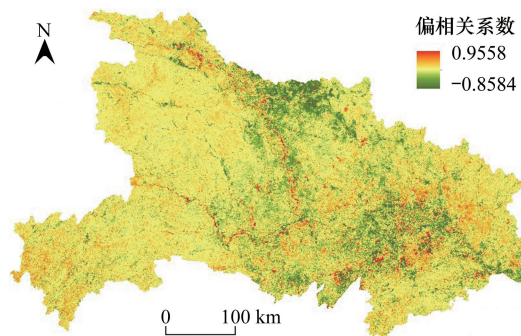


图 13 湖北省 2005—2015 年夏季平均 NDVI 与平均夜间灯光亮度值偏相关系数空间分布图

Fig. 13 Partial correlation between average NDVI in summer and average nightlight value in Hubei from 2005 to 2015

为进一步探究研究区人类社会经济活动与 NDVI 的关系,在 2005—2015 年的平均夜间灯光亮度值的基础上,以武汉市核心区为交点,沿东—西(E—W)、北—南(N—S)、东北—西南(NE—SW)和东南—西北(SE—NW)四个方向绘制直线,分析其夜间灯光亮度值变化趋势。结果表明(图 14),武汉市中心处达到最高值,在武汉周边较发达的市、县达到次高值,远离城市则表现为低值。沿 E—W 剖线,依次穿过武汉、天门、宜昌、恩施形成 4 个波峰,峰值分别为 60、13、18、22,剖线穿过的区域景观类型均属于建设用地,且峰值大小与植被指数成反比,即峰值越大,NDVI 越小,与上文中夏季 NDVI 空间分布情况基本吻合,说明夜间灯光亮度值与 NDVI 值成负相关关系,社会经济活动对 NDVI 起到抑制作用。

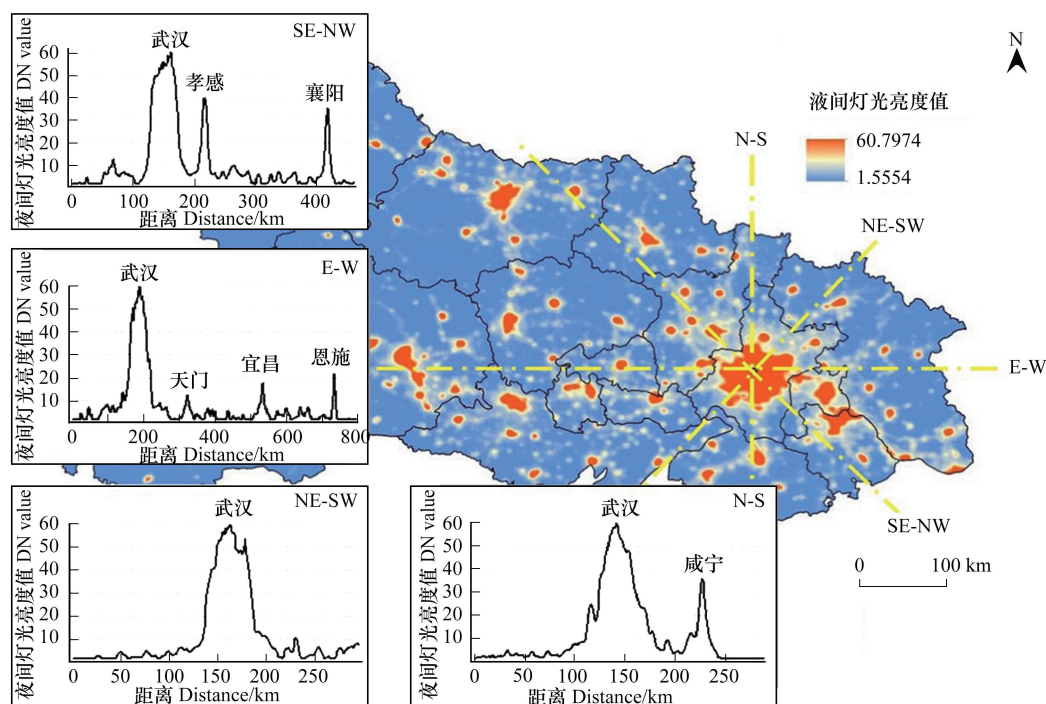


图 14 2005—2015 年湖北省夜间灯光亮度值分布及其剖面线

Fig.14 The distribution of nightlight value and their profile lines in Hubei province from 2005 to 2015

5 结论

本文基于湖北省 2005—2015 年夏季 MODIS/NDVI 数据,结合景观类型数据、气象观测资料以及夜间灯光数据,深入分析了研究区 NDVI 变化趋势特征以及植被变化对气候因子的响应程度,通过分离气候因子和人为因子对 NDVI 的影响,对人类活动与植被变化的相关关系进行了初步探讨。

(1) 林地、耕地是湖北省最主要的景观类型,林地面积占研究区总面积的 50%。11 年以来湖北省景观类型变化以建设用地和耕地为主。耕地面积明显下降,主要转化为建设用地;建设用地面积呈上升趋势,主要由耕地、林地转化而来。

(2) 11 年来,湖北省夏季平均 NDVI 的变化趋势在空间分布上存在显著差异,NDVI 增加的地区主要分布在鄂西北、鄂西南(十堰、恩施)地区,占研究区总面积的 61.96%;下降的地区主要集中在襄阳市及武汉城市圈,占总面积的 38.04%。总体上,NDVI 呈轻微改善的面积最大,占研究区总面积的 44.94%。

(3) 在年际尺度上,湖北省 11 a 夏季平均气温、降水量与 NDVI 分别为-0.016 和-0.039,呈不显著负相关关系,总体上 NDVI 与气候因子相关性不强。

(4) 人为因子对 NDVI 起负干扰作用的区域占总面积的 57.78%,人为因子对 NDVI 起正干扰作用的区域占总面积的 42.22%,总体上人类社会经济活动对植被生长起到抑制作用。NDVI 与夜间灯光亮度值呈显著负相关关系,相关系数达-0.8030,说明人类社会经济活动对 NDVI 起抑制作用。

6 讨论

湖北省植被生态结构较为复杂,植被生长受自然因素和人为因素共同影响。研究发现,近 11 年湖北省 NDVI 变化趋势具有区域分异性。一方面,湖北省先后设立多个生态功能区、建立生物多样性保护区以保育土壤、涵养水源,促进了恩施、十堰等地区植被指数的增加;另一方面,伴随着经济的快速发展,各级中心城市及其周边地区的人类活动加剧,造成了武汉、襄阳等地区植被指数的下降。经分析,2005—2015 年建设用地

的转入率高达 29.44%, 远远高于其他景观类型的变化, 侧面反映了人为因子对景观类型变化的重要影响; 相关研究表明湖北省 NDVI 与气候因子相关性较弱^[2], 与本文研究结果相一致, 印证了人为因子的主导作用。此外, 本文对 11 年来湖北省植被指数的时空变化特征及其驱动力进行了分析, 但仍存在一定的局限性:

(1) 在进行植被指数的时空变化研究中, 精确的空间分辨率和时间分辨率是必要的。本文所采用的 MODIS 影像空间分辨率为 250 m×250 m, 而实际很少有地物面积能连续超过影像的像元大小, 故大部分像元都是由各种不同地物组成的混合像元^[38-40], 对区域细节的解释能力有限。

(2) NDVI 值受多种因素共同影响, 本文对于研究区植被变化对气候变化的响应机制只进行了初步研究, 未考虑气候因子对植被影响的季节性、滞后性问题^[41-43], 在今后的研究中将考虑 NDVI 与气候因子的季节性与滞后性, 使结果更加客观、严谨。

(3) 本文利用夜间灯光数据进行了人为因子与 NDVI 相关性的研究, 由于所采用的 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 数据分别来自不同的传感器, 具备的空间分辨率不同, 由传感器参数引起的误差^[44-45]并未考虑, 在此仅作讨论。

参考文献 (References):

- [1] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.
- [2] 袁沫汐. 湖北省植被动态变化与物候对气候变化的响应[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [3] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 林昕. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 407-410, 427-427.
- [4] 彭道黎, 滑永春. 几种植被指数探测低盖度植被能力的研究. 福建林学院学报, 2009, 29(1): 11-16.
- [5] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效——基于遥感数据和物候资料的分析. 生态学杂志, 2005, 24(2): 123-130.
- [6] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D14): D14101.
- [8] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite - derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [9] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981-2006): Impacts of climate changes and human activities. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(1): 67-78.
- [10] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.
- [11] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, Pan Y Z, Liu Y X, Zhang D H, Lin Z H. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 288-302.
- [12] 孙艳玲, 郭鹏. 1982-2006 年华北植被指数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(02): 187-193.
- [13] 蒙古军, 王钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应. 地理研究, 2007, 26(5): 857-865.
- [14] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. 生态学杂志, 2006, 25(5): 477-481.
- [15] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 夏朝宗. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [16] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 2000-2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 87-91.
- [17] 褚琳, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生. 2000-2010 年黄河源玛曲高寒湿地生态格局变化. 地理科学进展, 2014, 33(3): 326-335.
- [18] 张嘉琪, 任志远, 张翀. 水热条件和人类活动对山西省植被覆盖变化的影响. 水土保持通报, 2014, 34(4): 128-133.
- [19] 韦振锋, 王德光, 张翀, 刘宪锋, 张晗. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1665-1670.
- [20] 胡稳. 贵州省灯光强度与 NDVI 变化分析. 环境保护前沿, 2018, 8(2): 112-121.
- [21] 程志刚, 杨欣悦, 董思言, 孙晨, 吴洋. 利用城市夜间灯光资料和 NDVI 研究成都地区植被覆盖度变化. 气象科技进展, 2016, 6(1): 14-20.
- [22] 董晨炜, 曹宇, 谭永忠. 基于夜间灯光数据的环杭州湾城市扩张及植被变化. 应用生态学报, 2017, 28(1): 231-238.
- [23] 李景刚, 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 基于 DMSP/OLS 灯光数据的快速城市化过程的生态效应评价研究——以环渤海城市群地区为

- 例. 遥感学报, 2007, 11(1): 115-126.
- [24] 袁沫汐, 邹玲, 林爱文, 朱弘纪. 湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(17): 5315-5323.
- [25] 杨啸. 基于时序 NDVI 的湖北省植被覆盖动态变化监测分析. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 226-231.
- [26] 郭慧, 王兵, 牛香. 基于 GIS 的湖北省森林生态系统定位观测研究网络规划. 生态学报, 2015, 35(20): 6829-6837.
- [27] Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, Kroehl H W, Davis E R, Davis C W. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [28] Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, Tuttle B T, Ghosh T, Pack D W, Erwin E H, Zhizhin M. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2009, 2(3): 595-622.
- [29] 范俊甫, 马廷, 周成虎, 周玉科. 1992-2010 年基于 DMSP-OLS 图像的环渤海城市群空间格局变化分析. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 280-288.
- [30] 邹进贵, 陈艳华, 田径, 王涛. 基于 ArcGIS 的 DMSP/OLS 夜间灯光影像校正模型的构建. 测绘地理信息, 2014, 39(4): 33-37.
- [31] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.
- [32] 何彬方, 冯妍, 吴文玉, 范伟. 安徽省近十年植被指数时空变化特征. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1912-1918.
- [33] Cai B F, Yu R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170-1186.
- [34] Kendall M G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1970.
- [35] Tošić I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77(1/2): 47-56.
- [36] 邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化. 干旱区研究, 2017, 34(1): 10-19.
- [37] 张韵婕, 桂朝, 刘庆生, 刘高焕. 基于遥感和气象数据的蒙古高原 1982—2013 年植被动态变化分析. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 1022-1030.
- [38] 高云, 谢苗苗, 付梅臣, 曹翊坤. 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例. 生态学报, 2014, 34(5): 1094-1104.
- [39] 汪明冲, 王兮之, 梁钊雄, 魏兴晓, 李辉霞. 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析——以广西壮族自治区河池市为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3435-3443.
- [40] 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志, 吴志伟. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素的响应. 生态学报, 2016, 36(12): 3723-3733.
- [41] 郭军, 李明财, 刘德义. 天津地区归一化植被指数时间动态及其与气候因子的关系. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1055-1059.
- [42] 李娜. 1999—2006 年石羊河流域植被对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [43] 郭梦媚. 江西省植被 NDVI 变化特征及其对气候因子的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [44] 高义, 王辉, 王培涛, 孙晓宇, 吕婷婷. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析. 资源科学, 2013, 35(12): 2517-2523.
- [45] 胡云锋, 赵冠华, 张千力. 基于夜间灯光与 LUC 数据的川渝地区人口空间化研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 68-78.