

DOI: 10.5846/stxb202007251953

易扬, 胡昕利, 史明昌, 康宏樟, 王彬, 张辰, 刘春江. 基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系. 生态学报, 2021, 41(19): 7796-7807.

Yi Y, Hu X L, Shi M C, Kang H Z, Wang B, Zhang C, Liu C J. Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in the middle reaches of the Yangtze River Based on MODIS NDVI. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7796-7807.

基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系

易 扬^{1,2,3,4}, 胡昕利^{2,3}, 史明昌⁴, 康宏樟^{2,3}, 王 彬⁴, 张 辰⁵, 刘春江^{2,3,*}

1 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232

2 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240

3 国家林业和草原局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240

4 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

5 上海础鼎环境科技有限公司, 上海 200433

摘要: 基于 1999—2015 年的 MODIS NDVI 时间序列遥感数据, 应用趋势分析、变异系数、重标极差分析和偏相关分析等方法, 分析了长江中游的植被时空变化特征及其与气象因子的关系。结果表明, 长江中游地区 NDVI 均值总体上呈上升趋势(从 0.72 增加到 0.80)。从空间分布来看, NDVI 低值区域(0.1—0.5)占 1.40%, 高值区域(>0.7)占 87.15%; NDVI 空间格局呈“西高东低、北高南低”的分布特征, 低值区域表现为以三省省会城市为中心向外辐射。Hurst 指数显示, 研究区大部分区域(60.54%)的 NDVI 变化趋势具有不确定性, 持续性改善区域(34.78%)主要分布在西部山地区, 持续性退化区域(3.26%)主要分布在人类活动频繁的较发达城市区域。在年际尺度上, 研究区 NDVI 与各气象因子关系均不显著; 月际尺度上, NDVI 与降水、相对湿度和日照时数显著相关, 降水和日照时数有明显的时滞性。区域内 NDVI 动态趋势以不确定性发展为主, 城市群周边 NDVI 呈现持续退化的区域应该引起关注。

关键词: 长江中游区域; NDVI; 时空变化; 气候; 相关分析

Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in the middle reaches of the Yangtze River Based on MODIS NDVI

YI Yang^{1,2,3,4}, HU Xinli^{2,3}, SHI Mingchang⁴, KANG Hongzhang^{2,3}, WANG Bin⁴, ZHANG Chen⁵, LIU Chunjiang^{2,3,*}

1 Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China

2 School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China

4 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

5 Shanghai Foundation Ding Environmental Technology Company, Shanghai 200433, China

Abstract: The middle reaches of the Yangtze River (including Hubei, Hunan, and Jiangxi Province) and the “Central Triangle City Grop” are located in the center of the Yangtze River Economic Belt and are one of the key national ecological security areas. The dynamic change of vegetation is affected by geographical environment and climate change, which is

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505501); 国家重点研发计划项目(2017YFC0505506); 上海市园林科学规划研究院青年启动项目(201901024)

收稿日期: 2020-07-25; 修订日期: 2021-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chjliu@sjtu.edu.cn

closely related to the future regional sustainable development. Based on MODIS NDVI time series remote sensing data from 1999 to 2015, the paper analyzed the dynamic characteristics of vegetation and its relationship with climatic factors in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015 by applying trend analysis, coefficient of variation, rescaled range analysis, and partial correlation analysis, etc. The results showed that the average value of NDVI in the middle reaches of the Yangtze River showed an overall upward trend (increased from 0.72 to 0.80). From the perspective of spatial distribution, the low-value area of NDVI (0.1—0.5) was 1.40%, and the high-value area (>0.7) accounted for 87.15%, overall pattern of NDVI was high in the west and north region and low in the east and south region. The low-value areas were radiated outward from the capital cities of the three provinces. Based on Hurst index, the changing trend of NDVI was uncertain in most areas (60.54%) of the study area. The continuous improvement area (34.78%) was mainly distributed in the western mountain area, and the continuous degradation area (3.26%) was mainly distributed in the more developed urban areas with frequent human activities. On the interannual scale, no significant relationship between the NDVI and the meteorological factors were observed. From the correlation between vegetation and climate factors, the relationship between NDVI and meteorological factors was not significant on the interannual scale; on the monthly scale, precipitation, relative humidity and sunshine hours were the main factors affecting NDVI change, and precipitation and sunshine hours had obvious time lag; on the spatial correlation, the area of positive correlation between vegetation change and temperature and precipitation was larger than that of negative correlation, and the area of positive correlation with relative humidity was larger than that of negative correlation. The area with negative correlation to humidity and sunshine hours was larger than that with positive correlation. The dynamic trend of NDVI in the middle reaches of the Yangtze River was mainly uncertain, and the regions around the urban agglomerations showing continuous degradation of NDVI should be concerned.

Key Words: Middle reaches of the Yangtze River region; NDVI; spatiotemporal change; climate; correlation analysis

植被可定义为陆地地表上所覆盖的所有植物群落的总称,是陆地生态系统中的主体,其生长受到自然和人为的共同影响,对环境变化和气候变化十分敏感^[1-2]。植被长期处在动态演变之中,并在生物圈的物质循环、能量流动、生态系统稳定性上发挥着重要的作用,气候变化是植被活动的重要影像因素,研究植被的动态变化和气候因子的关系,对区域生态平衡维护有重要的现实意义^[3-4]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是反应和监测植被生长状况和动态变化的重要指示因子,对地表植被的动态变化非常敏感(包括植被覆盖度、生物量和叶面积指数等),在时间序列的植被监测方面有着广泛的运用,已成为全球变化研究的重要方向之一^[5-7]。

国内外学者利用 NDVI 数据,从不同的时间和空间尺度上对各个区域的植被动态变化规律进行了研究,探讨了各个不同研究区的 NDVI 变化特征、演变趋势和对气候变化的响应机制^[8-10]。陶帅等通过分析 2000—2015 年长江上游植被变化特征,指出该区 NDVI 未来可能出现波动的区域占一半以上,海拔和年均温是影响 NDVI 变化的主要因素^[11]。袁喆等探讨了 2000—2015 年长江流域 NDVI 与气象因子的关系,结果表明 NDVI 呈逐年增加的趋势,长江流域水量丰沛,热量条件是影响植被生长的限制性因子^[12]。Mao 等和 Stenhman 等研究表明全球的植被变化受人为活动影响较大,特别是一些大型的植树造林活动^[13-14]。John 和 Ichii 等分析全球范围内 NDVI 与气候变量之间的关系,结果显示区域北部中高纬度地区,植被 NDVI 与气温呈显著正相关,而在北部和南部半干旱地区,植被 NDVI 与降水呈显著负相关^[15]。Fensholt 等利用 NDVI 数据分析了半干旱地区植被的季节变化趋势和气候驱动因素,表明全球平均半干旱地区的植被覆盖呈增加趋势,降水是该地区植物生产的主要限制因素^[16]。王桂钢等通过分析天山地区气候参数对草地季节变化影响的滞后性特征,指出当旬降水和前一个月降水累积量对于草地长势的影响最大^[17]。

不同区域尺度上的 NDVI 响应特征存在差别,已有研究对长江流域植被变化进行了相关分析,然而针对长江中游地区植被演变趋势和响应机制还未做充分探讨。本研究选取长江中游地区(湖北省、湖南省和江西

省),基于 1999—2015 年 MODIS NDVI 数据和气象资料,分析长江中游地区 NDVI 的变化特征和演变趋势,辨析了气象因子与 NDVI 在年际尺度和月际尺度上的关系,从而全面揭示了长江中游地区植被动态变化规律,探讨了植被对气候变化的响应机制,以期长江流域应对气候变化影响、区域生态环境建设与保护措施的制定,提供科学参考依据。

1 研究区概况

长江中游区域包含湖北省、湖南省和江西省(24°25'N—33°16'N, 108°24'E—118°23'E),总面积为 56.46 万 km²(图 1)。区域气候类型属于亚热带季风气候,降水量达到 1000—1600 mm/a,年平均气温在 16—18℃^[18]。长江中游区域地形主要以山地丘陵与平原为主,海拔最高处位于鄂西山地一带,最低处位于中部平原地区,其中山地丘陵占 50%以上,地势西高东低,平均海拔约为 1497 m^[19]。2018 年地区总人口为 17438 万人,占全国总人口 12.7%,生产总值为 9.8 万亿元,城市化水平达 50%以上,人类经济活动频繁,对区域扰动较大^[20]。

长江中游地区林木资源丰富,2015 年湖北省、湖南省和江西省的森林覆盖率分别为 39.61%、59.82% 和 64.00%^[21]。主要植被资源有水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、冬青(*Ilex chinensis Sims*)、银杉(*Cathaya argyrophylla*)、珙桐(*Davidia involucrata Baill.*)、银杏(*Ginkgo biloba L.*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、山茶(*Camellia japonica*)、南方铁杉(*Tsuga chinensis var. tchekiangensis*)、竹柏(*Podocarpus nagi*)、江西槭(*Acer kiangsiense*)等。

2 数据和方法

2.1 数据来源与预处理

本研究所用的 NDVI 数据产品为 1999—2015 年 MODIS NDVI 数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 植被指数产品数据 MOD13A2(<https://wist.echo.nasa.gov/ap>)。数据空间分辨率为 1 km × 1 km,时间分辨率为 16d,获取的数据利用 Envi 5.3 对原始数据进行预处理。气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>),研究区附近的 57 个基准气象台站的逐月数据(月平均气温、月降水及月辐射等),时间序列为 1999—2015 年。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen Median 趋势分析计算时间序列数据的所有 $n \times (n-1)/2$ 成对组合之间的斜率的中位数。其计算公式为^[22]:

$$C\beta = \text{Median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right), 1999 \leq i < j \leq 2015 \quad (1)$$

式中, β 是植被变化趋势,NDVI_j 是第 j 年的 NDVI 值,NDVI_i 是第 i 年的 NDVI 值。如果 $\beta > 0$,则 NDVI 有增加的趋势,表明在时间段内植被一直在改善或恢复。如果 $\beta < 0$,则 NDVI 呈下降趋势,表明在时间段内植被呈现退化的趋势。

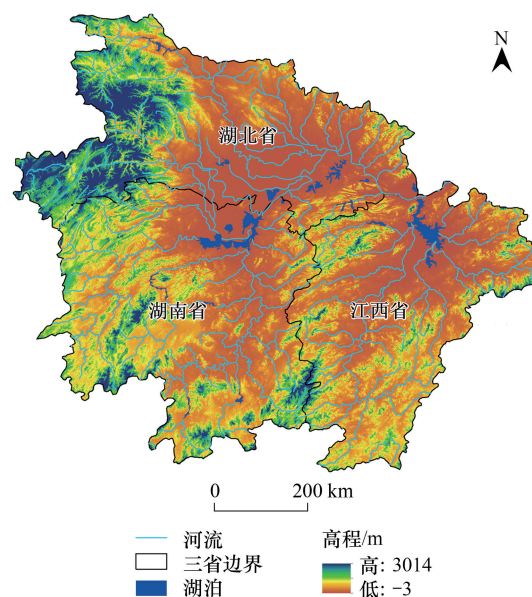


图 1 研究区

Fig.1 Study area

Mann-Kendall 检验可以判断趋势显著性,其样本无特定的分布要求,其结果也更为准确,不受异常值的干扰^[23]。计算公式如下:

设定 $NDVI_j, j=1999, 2000, \dots, 2015$, 定义 Z 统计量为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

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

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(NDVI_j - NDVI_i) = \begin{cases} 1, & NDVI_j - NDVI_i > 0 \\ 0, & NDVI_j - NDVI_i = 0 \\ -1, & NDVI_j - NDVI_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $NDVI_i$ 和 $NDVI_j$ 表示像元 i 年和 j 年的 NDVI 值; n 是时间序列的长度; sgn 是一个符号函数。统计量 Z 的值在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内。在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表示时间序列在 α 水平上存在显著的变化。在本研究中, 取 $\alpha = 0.05$, 判断在 0.05 置信水平上即 $|Z| > 1.96$ 时, 1999—2015 年区域 NDVI 变化趋势的显著性。

2.2.2 变异系数分析

变异系数通过计算标准差与平均值的比值而来, 又称为离散系数, 是量度各观测值与单位均值离散程度的数学指标^[24]。

$$CV = \frac{1}{\overline{NDVI}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2} \quad (6)$$

式中, CV 是指 NDVI 值的变异系数, $NDVI_i$ 是第 i 年的 NDVI, $\overline{NDVI}$ 是区域 1999 年至 2015 年的年际平均 NDVI。当 CV 值较大时, 数据更加分散且植被年际变化较大; 当 CV 值很小时, 表明数据更紧凑植被更稳定。

2.2.3 未来变化趋势分析

基于重标极差法 (R/S) 的 Hurst 指数是定量描述时间序列长期依赖性的有效方法^[25], 其计算公式是:

定义时间序列 $NDVI_{(t)}, t=1, 2, \dots, n$, 对于任意正整数 τ , 定义其均值序列:

$$\overline{NDVI}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} NDVI_{(t)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

计算累积离差:

$$X_{(t, \tau)} = \sum_{t=1}^{\tau} (NDVI_{(t)} - \overline{NDVI}_{(\tau)}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (8)$$

计算极差:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

计算标准差:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (NDVI_{(t)} - \overline{NDVI}_{(\tau)})^2 \right]^{1/2} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

计算 Hurst 指数:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (11)$$

式中,通过使用最小二乘法拟合等式 $\log(R/S)_n = a + H \times \log(n)$ 获得 H 值,其中 H 为赫斯特指数。根据 Hurst^[25] 和 Mandelbrot^[26] 的观点,Hurst 指数值的范围为 $(0,1)$,有 3 种类型:当 $H=0.5$ 时,表明 NDVI 时间序列是随机的序列,没有可持续性,表明了此变化趋势未来的时间序列与研究的时间序列无关;当 $H>0.5$ 时,反映 NDVI 时间序列具有可持续性,表明未来趋势变化与当前 NDVI 时间序列趋势相同;当 $H<0.5$ 时,此类未来变化趋势有可能保持基本稳定或者发生逆转,本研究在空间变化上将其归为变化趋势不确定^[26]。

2.2.4 气象因子数据插值

利用 1999—2015 年研究区及周边 57 个国家级气象站逐日记录的气象数据(气温、降水、相对湿度、日照时数)进行最大值合成计算出月最大值,基于月最大值求取年均值,形成站点逐年数据集,利用 ArcGIS 软件的克里金插值法得出气象因子空间分布。

2.2.5 偏相关分析

地球系统是由多要素所构成的复杂系统,系统中任何一个要素的变化都会引起其它要素也产生变化,偏相关分析便可有效解决上述问题,单独研究两要素之间的相关性时,偏相关将其它要素的影响视为常数^[27]。计算公式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

式中, r_{xy} 为变量 x 与 y 之间的相关系数, i 为样本数, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为 NDVI 多年均值和各气象因子均值。

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (13)$$

式中, r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别为要素 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的相关系数; $r_{xy \cdot z}$ 为将要素 z 固定后要素 x 与 y 的偏相关系数,通常采用 t 检验法对偏相关系数进行显著性检验。

3 结果

3.1 NDVI 的时间变化及空间分布特征

3.1.1 NDVI 的时间变化特征

1999—2015 年 NDVI 数据的年平均变化成体呈现增加的趋势,最低值为 2001 年的 0.72,最高值为 2015 年的 0.80,整个研究时段内的平均值为 0.76。研究区植被覆盖向好的趋势发展,可大致分为 3 个阶段:第一阶段为缓慢下降期(1999—2001 年)、第二阶段为波动上升期(2002—2011 年)、第三阶段为平稳上升期(2011—2015 年)。区域 NDVI 在 2000—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年的增长率分别为 4.86%、2.23%、4.81%。在 2000—2005 年与 2011—2015 年时间段内,研究区植被得到了显著的改善(图 2)。

3.1.2 NDVI 的空间分布特征

利用 1999—2015 年的年平均 NDVI 数据,计算 16 年间平均值得到长江中游地区 NDVI 空间分布图(图 3)。研究区植被覆盖格局整体呈现“西高东低、北高南低”的分布特征,西部地区海拔较高,以山区为主,天然

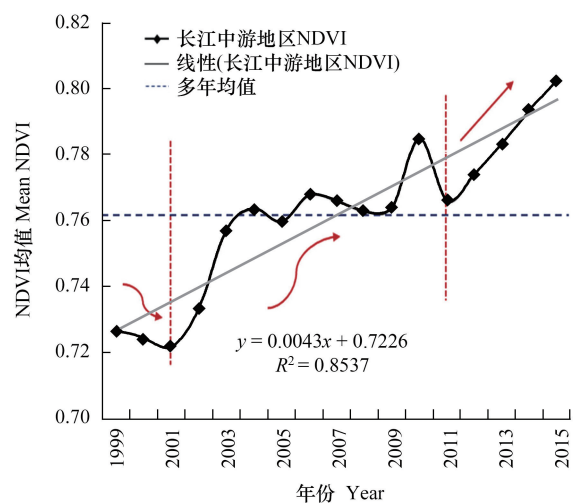


图 2 长江中游地区 NDVI 平均值年际变化

Fig. 2 Interannual variation of average NDVI in the middle reaches of the Yangtze River

NDVI: 表示归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

林、灌木和草地等分布广泛,植被生长良好,NDVI 值较高。北部地区以平原为主,是中国重要的商品粮基地,NDVI 值同样较高。NDVI 低值区主要分布在三生省会城市(湖南省长沙市、湖北省武汉市和江西省南昌市)及其附近城市地区,此部分区域多数经济发展迅速,人工扰动较大。16 年间,NDVI 值在 0.1—0.5 段占比 1.40%,NDVI 值在 0.5—0.7 段的区域分别占 11.45%,NDVI 值从 0.7—0.8 的区域占 55.06%,NDVI 值大于 0.8 的区域占 32.09%。

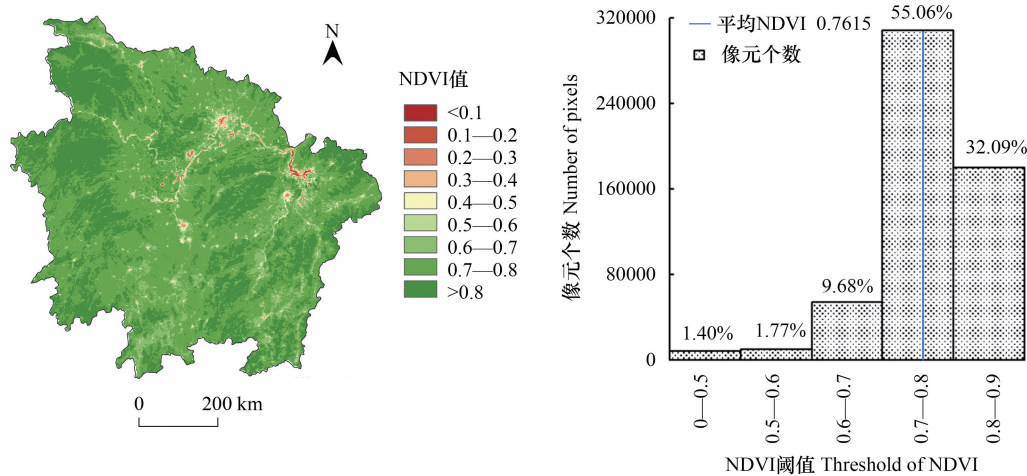


图 3 1999—2015 年长江中游地区平均 NDVI 空间分布及像元特征

Fig.3 Spatial distribution of average NDVI and pixel distribution in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

3.2 NDVI 趋势变化特征

3.2.1 NDVI 动态趋势分析

长江中游地区 1999—2015 年 NDVI 空间格局变化特征表现为,植被明显改善区域占最大比例(67.39%),主要分布在研究区西部及东南部;稳定不变及轻微改善区域占区域面积的四分之一(25.79%),主要以江汉平原、洞庭湖平原、鄱阳湖平原为中心分布;退化区域占区域面积的 6.82%,零星散布在各大城市的中心区位置,并以中心区向外扩散分布;严重退化位置以三省省会武汉市、长沙市和南昌市为中心向外辐射,表明城市规模的扩大对 NDVI 带来显著影响(表 1 和图 4)。

表 1 长江中游地区 NDVI 变化趋势

Table 1 Trends of NDVI in the Middle Reaches of the Yangtze River

NDVI 趋势变化 NDVI trend change	β	Z	面积百分比 Area percentage/%
明显改善 Significant improvement		<1.96	67.39
轻微改善 Slight improvement	>0.0005	-1.96—1.96	22.59
稳定不变 No change	-0.0005—0.0005	-1.96—1.96	3.20
轻微退化 Slight degradation	<-0.0005	-1.96—1.96	5.27
严重退化 Serious degradation	<-0.0005	<-1.96	1.55

NDVI:表示归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

3.2.2 NDVI 动态稳定性分析

长江中游区域 1999—2015 年 NDVI 稳定性整体表现为“高低波动并存,低波动占比高,区域性明显”。空间格局变化特征表现为:低波动区($0.014 < CV_{NDVI} < 0.047$)与较低波动区($0.047 < CV_{NDVI} < 0.054$)占全区面积的 59.32%,植被变化较小;中度波动区($0.054 < CV_{NDVI} < 0.087$)占全区 32.59%,环簇于较高波动区边界并向外延伸;较高波动区($0.087 < CV_{NDVI} < 0.250$)占 7.00%,在区域中部形成连接三省省会的带状分布,其余呈斑块状分

布在各城市中心,较高波动区 NDVI 表现为轻微退化及严重退化(表 2 和图 5);高波动区($CV_{NDVI} < 0.250$)占比仅为 1.09%。

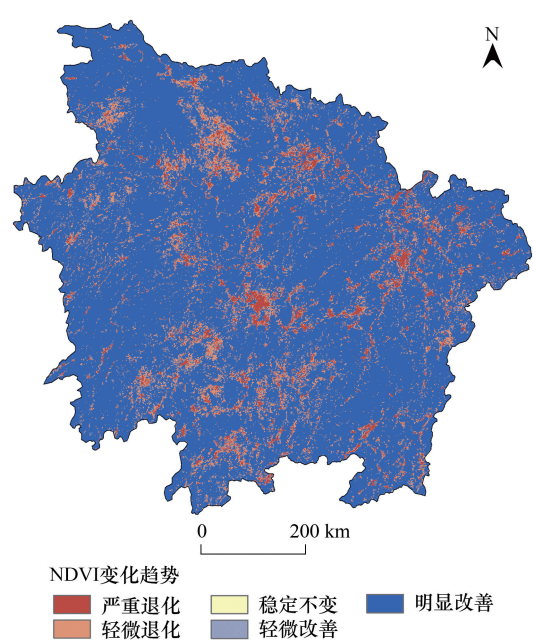


图 4 1999—2015 年长江中游地区 NDVI 变化趋势
Fig.4 Trends of NDVI in the Middle Reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

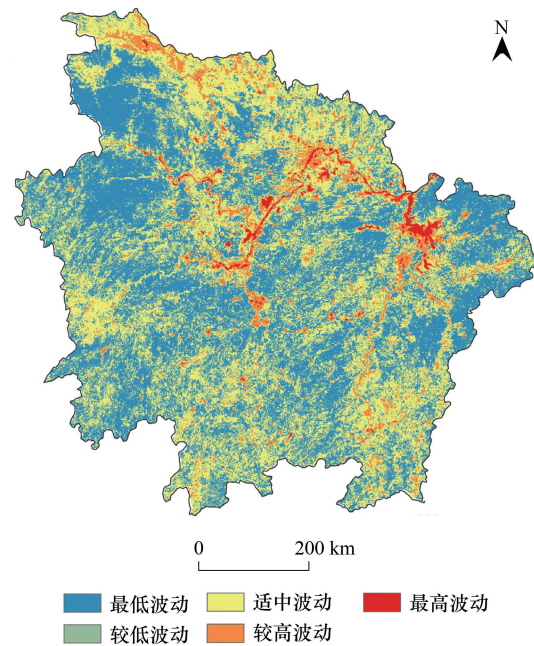


图 5 1999—2015 年长江中游地区植被年均 NDVI 变异程度
Fig. 5 Annual average NDVI variation of vegetation in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

表 2 长江中游地区 NDVI 变异系数分类表

Table 2 Classification of NDVI coefficient of variation in the middle reaches of the Yangtze River			
波动等级 Fluctuation level	CV 值 CV value	像元个数 Number of pixels	面积百分比/% Area percentage
最低波动 Minimum fluctuation		221589	39.57
较低波动 Low volatility	0.047—0.054	110605	19.75
适中波动 Moderate fluctuation	0.054—0.087	182505	32.59
较高波动 High volatility	0.087—0.250	39189	7.00
最高波动 Maximum fluctuation	0.250—1.100	6130	1.09

3.2.3 NDVI 动态持续性分析

长江中游地区 1999 年至 2015 年间,植被 Hurst 小于 0.5 的区域占总面积的 60.54%,大于 0.5 的区域占 39.46%。将 NDVI 变化趋势与 Hurst 指数结果耦合叠加,得到研究区 NDVI 变化趋势与持续性的耦合空间图(图 6),将结果分为 6 类(表 3):持续性严重退化和持续性轻微退化,其比例为 0.79%和 2.47%,主要以大斑块分布在长沙、南昌、武汉省会发达城市及其周边;持续性稳定不变,其比例达 1.42%;持续性轻微改善和持续性明显改善,其比例为 9.78%和 25%,主要分布在低山丘陵区;未来变化趋势不确定,此类占比高达 60.54%,均匀分布在各个省市。

3.3 NDVI 与气候变化的关系

3.3.1 NDVI 与气候因子的时间相关性分析

对长江中游地区 1999—2015 年 NDVI 与各气象因子在年际变化尺度上,分别做了相关、偏相关分析(表 4)。结果表明,区域整体 NDVI 与气温、降水呈正相关,偏相关系数分别为 0.488、0.277,与相对湿度、日照时数呈负相关,偏相关系数分别为-0.646、-0.532。NDVI 与气温的相关性大于与降水的相关性。NDVI 与相对

湿度的相关性大于日照时数的相关性,NDVI与各气候因子的相关系数及偏相关系数均未达到显著水平($P>0.05$)。表明在年际变化尺度上,长江中游地区整体区域NDVI对同期气候变化的响应不是特别强烈。

表3 长江中游地区NDVI变化趋势及Hurst指数分类
Table 3 NDVI change trend and hurst index classification in the Middle Reaches of the Yangtze River

NDVI变化类型 Types of NDVI changes	β 值 β value	Z 值 Z value	H 值 H value	占总面积百分比/% Percentage of total area
持续性明显改善 Continuous improvement	>0.0005	>1.96	>0.5	25.0
持续性轻微改善 Continuous slight improvement	>0.0005	$-1.96-1.96$	>0.5	9.78
持续性稳定不变 Sustainability remains constant	$-0.0005-0.0005$	$-1.96-1.96$	>0.5	1.42
持续性轻微退化 Sustained slight degradation	<0.0005	$-1.96-1.96$	>0.5	2.47
持续性严重退化 Continuous severe degradation	<0.0005	<-1.96	>0.5	0.79
未来变化趋势不确定 Uncertain future trends	—	—	<0.5	60.54

表4 1999—2015年长江中游地区NDVI与气候因子的相关系数
Table 4 Correlation coefficient between NDVI and climatic factors in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

	相关系数 Correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient
NDVI—温度 NDVI—Temperature	0.286	0.488
NDVI—降水 NDVI—Precipitation	0.07	0.277
NDVI—相对湿度 NDVI—Relative humidity	-0.348	-0.646
NDVI—日照时数 NDVI—Sunshine hours	-0.06	-0.532

分析每月气候因子与NDVI之间的相关性,可以更好地揭示气候因子是如何在月际尺度上影响NDVI变化的。对1999—2015年12个月各月份的NDVI年际变化与当月及前1—3月的气温、降水、相对湿度、日照时数进行双变量相关性分析,得出对应的相关系数表(表5)。结果显示,1—4月份NDVI生长受降水和日照影响较为显著,并且具有明显的滞后性;6月NDVI与当月相对湿度具有显著的相关性;7月NDVI受5月降水的滞后性影响;8月与当月的气温、相对湿度、日照时数均存在显著的相关性,受气候因子的影响最大;9月受当月降水和相对湿度的共同影响;10月受9月的降水、相对湿度和日照的影响;11月与各个气象因子均无显著相关关系;12月受当月相对湿度与日照时数的影响。降水、相对湿度和日照时数是影响长江中游区域NDVI季节变化的主要气候因子,降水和日照时数的时滞性较为明显。

3.3.2 NDVI与气候因子的空间相关性分析

从空间相关性来看,研究区绝大部分地区NDVI年际变化与气候因子的相关性并不显著,NDVI与气温、降水呈正相关的面积比例大于负相关的面积比例(表6和图7)。NDVI与气温和降水呈正相关的面积比例占71.82%和61.56%,其中,在 $P<0.01$ (气温:1.85%;降水:0.63%)和 $P<0.05$ (气温:5.39%;降水:2.82%)水平上达到显著。NDVI与相对湿度和日照时数呈负相关的面

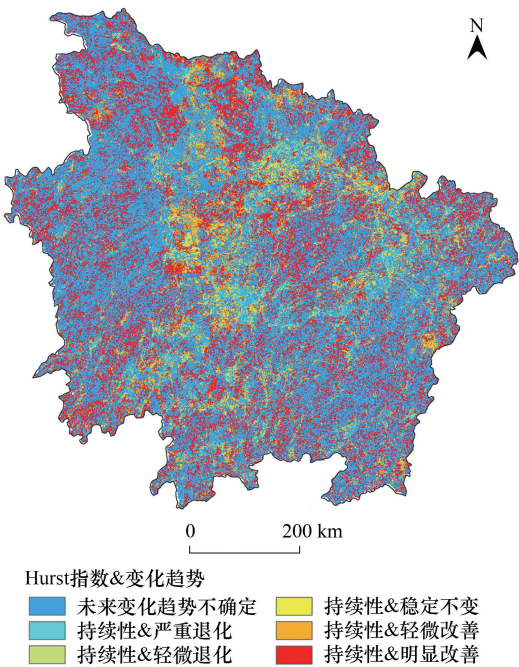


图6 长江中游地区NDVI未来变化趋势
Fig. 6 Future trends of NDVI in the middle reaches of the Yangtze River

积比例占 66.38%和 60.51%,其中,在 $P<0.01$ (相对湿度:1.90%;日照:0.32%) 和 $P<0.05$ (相对湿度:4.66%;日照:2.28%) 水平上达到显著。总体来看,长江中游地区 NDVI 与各气候因子达到显著的相关性比例分别为(图 7 和图 8):7.53%(气温)、7.31%(相对湿度)、4.12%(降水)、3.76%(日照时数)。表明在研究区大面积范围内气温升高、降水增多有利于植被的动态生长。

表 5 长江中游地区当月 NDVI 与前 0—3 月各气候因子的相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between NDVI in each month and climatic factors in current and previous one, two and three months, respectively

气候因子 Climate factor	与 NDVI 的相关系数 Coefficient of correlation with NDVI											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
T0	0.437	0.127	0.385	0.327	0.056	0.335	-0.060	0.561 *	-0.093	-0.062	-0.099	0.003
P0	-0.730 **	-0.111	0.391	-0.265	0.221	-0.375	0.140	-0.294	0.587 *	0.025	0.144	-0.140
H0	-0.447	0.212	-0.033	-0.344	0.023	-0.533 *	0.006	-0.757 **	0.653 **	-0.251	-0.032	-0.517 *
S0	0.717 **	-0.009	0.125	0.086	-0.286	0.406	-0.061	0.748 **	-0.474	0.451	-0.134	0.588 *
T1	0.254	0.419	-0.064	-0.226	-0.218	0.263	-0.494	-0.142	0.115	0.003	0.465	0.345
P1	-0.048	-0.638 **	-0.037	0.288	-0.045	0.181	0.483	0.182	0.114	0.567 *	-0.129	0.417
H1	-0.219	-0.438	0.306	0.312	-0.202	0.064	0.055	-0.130	-0.210	0.536 *	-0.268	0.396
S1	0.096	0.624 **	-0.133	-0.695 **	-0.142	0.004	-0.141	-0.035	0.143	-0.535 *	0.297	-0.387
T2	0.060	0.175	0.299	0.188	-0.039	0.255	0.103	-0.091	-0.217	0.080	-0.063	0.103
P2	0.182	0.357	-0.621 *	0.334	0.343	0.025	0.534 *	0.334	0.244	0.000	0.240	-0.100
H2	0.090	0.000	-0.431	-0.301	-0.041	-0.259	0.329	-0.074	0.079	-0.289	0.225	-0.200
S2	-0.234	0.055	0.548 *	0.085	-0.045	0.238	-0.335	-0.025	-0.060	0.355	-0.387	0.338
T3	0.397	-0.100	0.091	-0.003	0.184	0.048	0.178	0.034	-0.051	-0.341	0.310	0.070
P3	-0.360	-0.090	0.180	-0.532 *	0.001	-0.038	-0.036	0.327	-0.054	0.196	-0.101	0.378
H3	-0.519 *	-0.059	-0.285	-0.376	0.043	-0.063	0.046	-0.011	0.119	0.169	-0.331	0.344
S3	0.419	0.139	0.238	0.122	-0.137	-0.002	-0.040	-0.095	-0.220	0.106	0.375	-0.365

T:气温 Temperature;P:降水 Precipitation;H:相对湿度 Relative humidity;S:日照时数 Sunshine hours;0:当月;1:前 1 月;2:前 2 月;3:前 3 月;*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$

表 6 长江中游地区 NDVI 年际变化与气候因子的相关性面积分布/%

Table 6 Regional distribution of NDVI interannual variability and climatic factors in the middle reaches of the Yangtze River

相关性水平 Level of correlation	相关系数 Correlation coefficient	气温 Temperature	降水 Precipitation	相对湿度 Relative humidity	日照时数 Sunshine Hours
显著负相关** Significant negative correlation **		0.04	0.10	1.90	0.32
较显著负相关* Significant negative correlation *	-0.606—0.482	0.25	0.57	4.66	2.28
不显著负相关 No significant negative correlation	-0.482—0	27.89	37.77	59.82	57.91
不显著正相关 No significant positive correlation	0—0.482	64.58	58.11	32.88	38.33
显著正相关* Significant positive correlation *	0.482—0.606	5.39	2.82	0.65	0.95
显著正相关** Significant positive correlation **	0.606—0.990	1.85	0.63	0.10	0.21

*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$

4 讨论

1999—2015 年,长江中游地区 NDVI 呈总体上升趋势,这与湖北省^[28]、湖南省^[29]、江西省^[30]、长江流

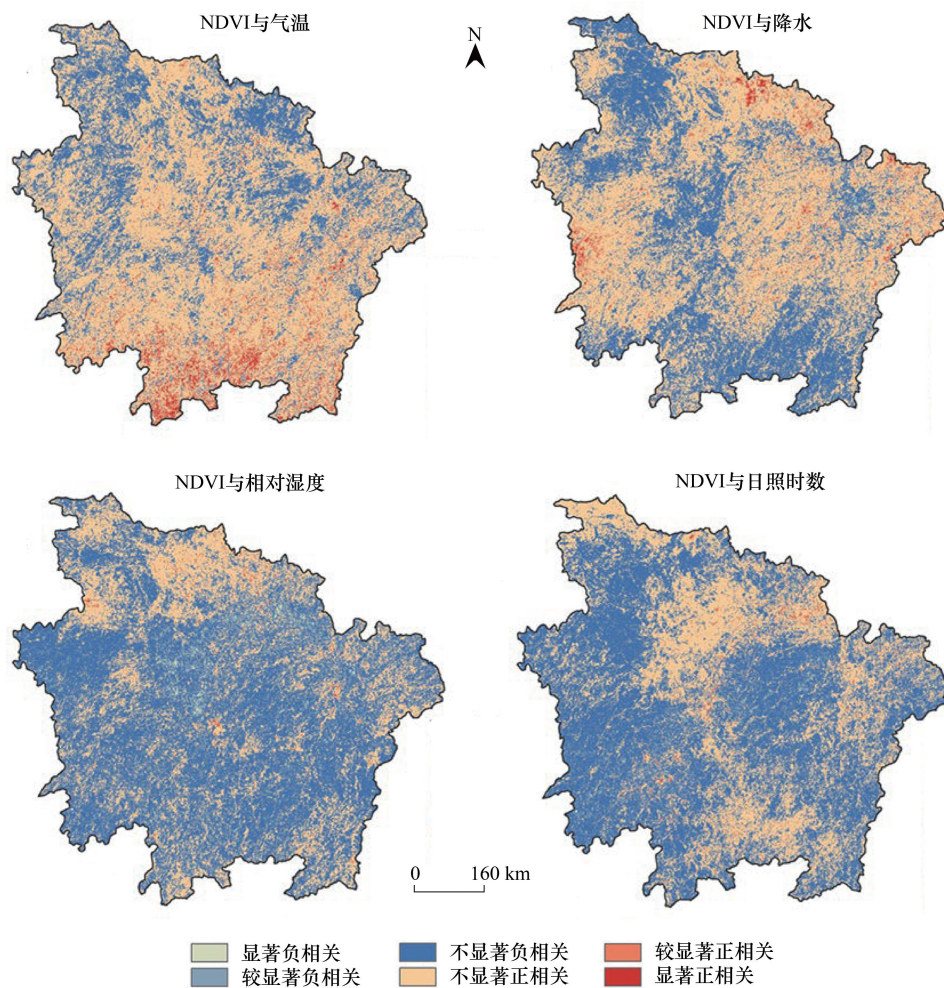


图 7 1999—2015 年长江中游地区 NDVI 与气候因子空间相关性分类

Fig.7 Spatial correlation of NDVI and climatic factors in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

域^[12]等区域的研究果相一致。长三角、珠三角等沿海城市群的 NDVI 年均值多在 0.3—0.5 之间,与之相比,长江中游地区 NDVI 相对较高,多年均值为 0.76。从 NDVI 的变化趋势来看,NDVI 稳定不变及轻微改善区域占区域面积的四分之一(25.79%),主要以江汉平原、洞庭湖平原、鄱阳湖平原为中心展布,这三大平原是我国主要商品粮基地,符合农作物轻微变化特征。退化区域占区域面积的 6.82%,以三省省会武汉市、长沙市、南昌市为中心向外辐射,表明城市规模的扩大对植被覆盖带来显著影响。

从 NDVI 的波动性来看,NDVI 较高和高波动区占 7.00%,在区域中部形成连接三省省会的带状分布(长沙市-岳阳市-咸宁市-武汉市-黄冈市-九江市-上饶市-南昌市),其余呈斑块状分布在各城市中心,对应轻微退化及严重退化区域。中度波动区占全区 32.59%,环簇于较高波动区边界并向外延伸,低波动区与较低波动区占全区面积的 59.32%,植被变化较小,与 NDVI 稳定不变及轻微改善相吻合。从 NDVI 的未来变化趋势来看,未来变化趋势不确定的区域占研究区一半以上,这与前人在长江流域的结果一致^[11]。持续性明显改善区域占研究区四分之一,其斑块分布在各个省市内,主要分布在区域西部山地区,十堰市、神农架林区等地。持续性严重退化区域(0.79%)则主要以大斑块分布在长沙、南昌、武汉省会发达城市,在襄樊市、宜昌市、常德市等人类活动频繁的较发达城市呈小斑块分布。

Nemani 等和 Liu 等认为水热气候条件是影响陆地植被覆盖空间格局的驱动因素^[31-32]。本文研究表明,在年际变化上气温是影响研究区植被生长的主要气候因素,这与崔林丽等^[33]、李本纲等^[34]和陈云浩等^[35]对

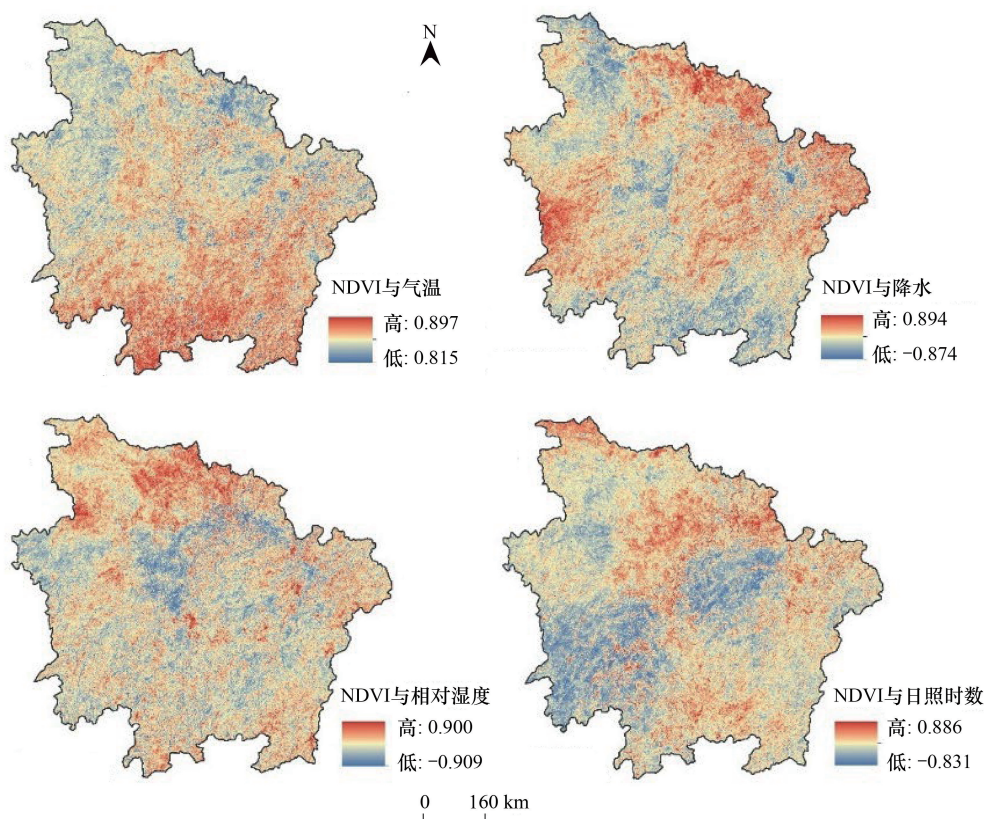


图 8 1999—2015 年长江中游地区 NDVI 与气候因子空间相关性系数分布

Fig.8 Spatial correlation of NDVI and climatic factors in the middle reaches of the Yangtze River from 1999 to 2015

我国华东及周边地区植被 NDVI 对气候响应的研究结果基本一致,其原因可能是研究区降水较丰富,降水足够满足植被生长需求,而热量的差异便是造成 NDVI 差异的主要驱动因素。本文研究表明,降水对该区植被生长的影响为滞后 2—3 个月,日照时数为滞后 2 个月,相对湿度为滞后 3 个月,表明植被 NDVI 变化也受土壤水分和养分有效性的影响。这与 Bao 等^[36]从全球、区域等多尺度研究证实结果一致,植被覆盖对气候变化的反馈存在一定的滞后效应。从空间相关性来看,研究区与各气候因子达到显著相关的比例为:气温>相对湿度>降水>日照时数。

5 结论

(1)在年际尺度上,研究区近 16 年 NDVI 呈上升趋势平均值为 0.76,植被状况较好。在空间尺度上,分布呈现“西高东低、北高南低”的分布特征。

(2)从变化趋势来看,研究区 NDVI 改善区域占比一半以上,稳定性表现为“高低波动并存,低波动占比高,区域性明显”。区域 NDVI 未来变化趋势不确定的区域占比 60.54%,需要引起持续关注和重视。

(3)从植被与气候因子的相关性来看,年际尺度上,研究区 NDVI 与各气象因子关系均不显著;月际尺度上,降水、相对湿度和日照时数是影响 NDVI 变化的主要因子,降水和日照时数有明显的时滞性;空间相关性上,植被变化与气温、降水呈正相关的面积大于负相关,与相对湿度、日照时数呈负相关的面积大于正相关。

参考文献 (References):

- [1] Dou A, Zhao W J, Qu X Y, Jing R, Xiong K. Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33 years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 53: 103-107.

- [2] Lin X N, Niu J Z, Berndtsson R, Yu X X, Zhang L, Chen X W. NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in northern China. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4138.
- [3] 盛任, 万鲁河. 乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应. *生态学报*, 2019, 39(9): 3243-3256.
- [4] Yang L Q, Guan Q Y, Lin J K, Tian J, Tan Z, Li H C. Evolution of NDVI secular trends and responses to climate change; a perspective from nonlinearity and nonstationarity characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 254: 112247.
- [5] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [6] 古尼齐木·阿不迪热西提, 阿里木江·卡斯木, 买尔孜亚·吾买尔, 高鹏文. 基于 MODIS 的中国天山中部北麓植被动态变化. *西南农业学报*, 2020, 33(4): 875-883.
- [7] Dhewantara P W, Zhang W Y, Al Mamun A, Yin W W, Ding F, Guo D H, Hu W B, Magalhães B J S. Spatial distribution of leptospirosis incidence in the Upper Yangtze and Pearl River Basin, China: tools to support intervention and elimination. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138251.
- [8] 殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于 MODIS NDVI 数据(2001—2018)的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响分析. *生态学报*, 2021, 41(4): 1-12.
- [9] Yu W T, Li J, Liu Q H, Zhao J, Dong Y D, Zhu X R, Lin S R, Zhang H, Zhang Z X. Gap filling for historical landsat NDVI time series by integrating climate data. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 484.
- [10] Qiu B W, Yan X F, Chen C C, Tang Z H, Wu W B, Xu W B, Zhao Z Y, Yqan C, Berry J, Huang W Q, Chen F X. The impact of indicator selection on assessment of global greening. *GIScience & Remote Sensing*, 2021: 1-14, doi: 10.1080/15481603.2021.1879494.
- [11] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 王广杰. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例. *生态学报*, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [12] 袁喆, 喻志强, 冯兆洋, 许继军, 尹军, 鄢波, 雷恒. 长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应. *长江科学院院报*, 2019, 36(11): 7-15.
- [13] Mao J F, Ribes A, Yan B Y, Shi X Y, Thornton P E, Séférian R, Ciais P, Myneni R B, Douville H, Piao S L, Zhu Z C, Dickinson R E, Dai Y J, Ricciuto D M, Jin M Z, Hoffman R M, Wang B, Huang M T, Lian X. Human-induced greening of the northern extratropical Land surface. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 959-963.
- [14] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.
- [15] Bower J R, Ichii T. The red flying squid (*Ommastrephes bartramii*): a review of recent research and the fishery in Japan. *Fisheries Research*, 2005, 76(1): 39-55.
- [16] Fensholt R, Sandholt I, Stisen S, Tucker C. Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteorological second generation SEVIRI sensor. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2): 212-229.
- [17] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 李雪梅, 秦艳芳. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 317-324.
- [18] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 王彬, 史明昌, 刘春江. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.
- [19] 史云扬, 李牧, 付野, 王立威, 孙敏轩, 郝晋珉. 基于灰色-BP 神经网络模型的多情景交通用地需求预测——以长江中游城市群为例. *中国农业大学学报*, 2020, 25(06): 142-153.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2019. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2016. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [22] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [23] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbaw C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 144-158.
- [24] Kalisa W, Igbawua T, Henchiri M, Ali S, Zhang S, Bai Y, Zhang J H. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16865.
- [25] Hurst F B. Climates prevailing in the yellow-gray earth and yellow-brown earth zones in New Zealand. *Soil Science*, 1951, 72(1): 1-20.
- [26] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resources Research*, 1969, 5(5): 967-988.
- [27] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应. *地理研究*, 2020, 39(5): 1200-1214.
- [28] 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.
- [29] 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. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 80-87.
- [30] 殷守敬, 陈晓玲, 吴传庆, 姚延娟, 王雪蕾. 基于时序 NDVI 的江西省植被覆盖时空变化分析. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 47(1): 129-135.
- [31] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Steven W R. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [32] Liu Q, Yang Z P, Han F, Wang Z G, Wang C R. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: a case study in the Tianshan Mountains, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(16): 1189.
- [33] 崔林丽, 史军. 中国华东及其周边地区 NDVI 对气温和降水的季节响应. *资源科学*, 2012, 34(1): 81-90.
- [34] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. *生态学报*, 2000, 20(5): 898-902.
- [35] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 716-720.