

DOI: 10.5846/stxb201904190790

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.

Tao S, Kuang T T, Peng W F, Wang G J. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5029–5043.

2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力 ——以宜宾市为例

陶 帅^{1,2}, 邝婷婷^{1,2}, 彭文甫^{1,2}, 王广杰^{1,2,*}

1 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610068

2 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068

摘要:选取长江上游地区生态环境相对脆弱的宜宾市为典型案例, 分析其 16 年来 NDVI 所表征的植被生长动态变化。以 MODIS MOD 13Q1 为数据源, 采用 Sen + Manna-Kendall 非参数检验方法和 Hurst 指数模型, 分析 NDVI 时间变化特征、变化趋势与未来可持续特征, 并应用空间转移矩阵和重心迁移模型分析其空间变化特征, 最后应用地理探测器模型探测影响 NDVI 空间分布的主导因素, 进一步揭示 NDVI 分异特征及其驱动力。结果表明: (1) 2000—2015 年宜宾市植被覆盖整体状况良好, 自北向南逐渐优化, 多年平均 NDVI 大于 0.6 的区域占 52.06%。年际 NDVI 以极显著趋势波动增长, 平均年际变化率达到 0.007/a, 极显著增长区域面积达 70.18%。与此同时, NDVI 增长整体持续性不强, 未来可能出现波动的区域占 53.65%。(2) 2000—2015 年间宜宾市植被生长以正向演进为主, 演进过程和已有生态建设工程成效研究结论相符, 生态环境不断优化。(3) 宜宾市 NDVI 主要受一系列地表差异, 包括海拔、年均温、土地利用类型、人口密度所决定, 其因子解释力均超过 25%, 自然环境因素与人类活动共同作用对 NDVI 影响更加显著。

关键词: NDVI; 长江上游; 时空变化; 空间转移矩阵; 地理探测器; 宜宾市

Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City

TAO Shuai^{1,2}, KUANG Tingting^{1,2}, PENG Wenfu^{1,2}, WANG Guangjie^{1,2,*}

1 The Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

2 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

Abstract: In this paper, we chose Yibin City as a typical case, which is the district of relatively fragile eco-environment in the upper reaches of the Yangtze River, to study the dynamic changes of vegetation growth characterized by Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in past 16 years. Based on MODIS MOD 13Q1 data, we analyzed the variation characteristics in time, variation tendency, and future sustainable characteristics of NDVI by using the Sen + Manna-Kendall nonparametric test and the Hurst index. The spatial variation characteristics were analyzed by the transition matrix and gravity migration model. Furthermore, we explored the dominant factors, and analyzed distribution characteristics and driving forces of the NDVI with application of Geodetector model. The results showed as follows. (1) During 2000 to 2015, the fractional vegetation cover in Yibin City was in a good growth state, with the tendency of gradually optimized from north to south. The area with average annual NDVI more than 0.6 accounted for 52.06%. With the average annual variation rate of 0.007/a, the annual NDVI increased significantly in fluctuation, which accounted for 70.18%. With the Hurst index, the

基金项目:国家自然科学基金项目(41371125);教育部人文社科基金项目(17YJA850007)

收稿日期:2019-04-19; **网络出版日期:**2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 183034151@qq.com

variation of NDVI was not wide. The potential fluctuation area accounted for 53.65% in the future. (2) During 2000 to 2015, vegetation growth in Yibin City was dominated by positive evolution. The evolution process was consistent with the results of previous studies on the effect of eco-construction projects. And the ecological environment was constantly optimized. (3) The NDVI in Yibin City was determined by a series of surface differences, including altitude, average annual temperature, land-use type, and population density. The explanatory power of these factors exceeded 25%. The combination of natural factors and human activities had a more significant impact on NDVI.

Key Words: NDVI; the upper reaches of the Yangtze River; spatio-temporal variation; transition matrix; Geodetector-model; Yibin City

植被作为自然生态系统的重要组成部分,通过光合作用、呼吸作用与生物圈的其他自然要素形成紧密联系,从而在生态系统的物质循环、能量流动与信息传输等方面发挥着重要作用^[1-2]。在植被生长过程中,气温、降水、海拔与人类活动等环境因素具有重要影响,植被对环境变化尤其是气候变化也最为敏感^[3]。因此,研究植被动态变化及其与自然环境、人类活动因素的响应机制,可以为全球变化提供重要的理论依据^[4],对评价区域环境质量与维护生态平衡具有重要的现实意义^[5],对人类社会经济建设与生态环境保护也具有相当的借鉴意义。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与植被覆盖度、生物量、叶面积指数以及土地利用等密切相关^[6],能够精准地反映植被绿度、光合作用强度、植被代谢强度及时间变化^[7],在很大程度上展现区域植被覆盖度的高低以及植被生长状态,被认为是监测陆地植被变化的最佳指示因子^[8],已广泛应用于生态、环境和农业等领域^[9-12]。利用 NDVI 时序数据研究植被覆盖变化及对外界干扰响应,对生态系统及其生态效益具有重要意义^[13],已经成为全球变化研究的重要方向之一。

国内外学者基于长时间序列的 NDVI 数据集,在不同时空尺度上对地表植被时空变化规律进行了深入研究,主要集中于区域尺度 NDVI 变化趋势与气候因子之间的相互关系及对气候变化的响应机制^[5,14-16]。部分学者从植物生长机制出发,作了一些新的研究。如李辉霞等^[17]通过残差分析分离气候要素与人类活动对三江源 NDVI 的贡献,定量评估生态保护建设工程成效。邓晨晖等^[18]基于 NDVI 数据探究了秦岭植被变化特征及对气候变化和人类活动的双重响应机制。徐芝英等^[19]应用小波分析研究了浙江省 NDVI 与高程、坡度和土地利用强度等因子之间的多尺度相关关系。Peng 等^[20]从自然环境角度量化了四川省 NDVI 时空变化的自然因子驱动力。目前,鲜有学者对影响植被变化的气候环境因素、非气候环境因素和人类活动因素进行整体驱动机制研究。因此,本文选取长江上游地区喀斯特与丘陵地貌分布广泛,地形条件较为复杂,生态环境相对脆弱的宜宾市为典型案例,利用 2000—2015 年 MODIS MOD 13Q1 数据,采用 Sen 氏趋势分析与 Manna-Kendall 检验、Hurst 指数分析宜宾市 NDVI 在年际尺度、季节尺度上的时间变化特征、变化趋势与未来可持续特征,并应用空间转移矩阵和重心迁移模型分析其空间变化特征,最后通过地理探测器模型探测影响 NDVI 的主导因素,进一步揭示 NDVI 的空间分异特征及其驱动因子,从而全面的分析宜宾市植被动态变化规律,探讨生态建设工程成效,为该地区乃至长江上游地区未来植被保护、水土保持与生态环境建设提供科学依据和决策参考。

1 研究区域概况

宜宾市位于四川省东南部(如图 1),地处云贵川三省结合部,金沙江、岷江、长江在此交汇,川南丘陵与云贵高原过渡地带,地跨 27°50'N—29°16'N、103°36'E—105°20'E,幅员面积 13283 km²。境内地形整体呈东北低、西南高态势,以中低山地和丘陵为主,喀斯特地貌分布广泛。气候以亚热带湿润季风气候为主,雨热充足、光照适宜、气候温润、四季分明。植被覆盖以亚热带次生性常绿阔叶林为主,竹林等其他植被丰富多样。自 2000 年开始实行第一轮退耕还林工程以来,境内森林覆盖率稳步增加,2015 年底全市森林覆盖率达 44.08%。

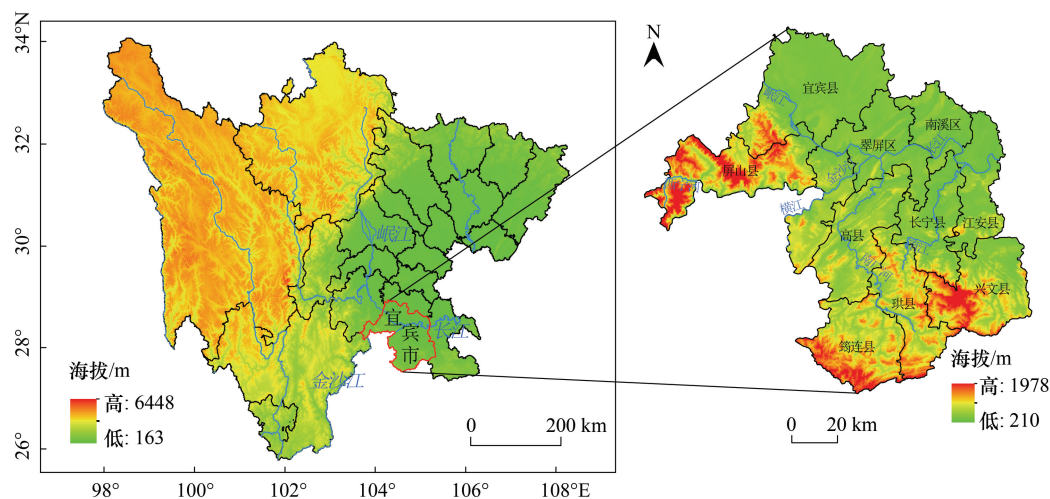


图1 宜宾市地理位置示意图

Fig.1 The geographical position of Yibin City

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

NDVI 数据提取自美国国家航空航天局网站 (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) 发布的 MODIS MOD 13Q1 陆地 3 级标准数据产品,其空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。本文选取了 2000 年 3 月至 2016 年 2 月的 MODIS NDVI 数据共 368 期影像为数据源,利用 MRT、ENVI 和 ArcGIS 等软件进行提取、剪裁和投影转换等批处理,提取 2000—2015 年 NDVI 半月数据,采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)消除云层、大气和太阳高度角的干扰^[12],合成月 NDVI 数据。基于目视解译发现冬季 NDVI 数据存在云层较厚,数据质量较差的情况,应用 Savitzky-Golay 滤波法对其进行滤波处理。为了充分反映 NDVI 变化的年际和年内季节特征,根据宜宾市植被物候特点,进行春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—次年 2 月)的划分,然后提取平均值生成 2000—2015 年各季度和年度 NDVI 数据,以指示各季度和年际变化。

用于精度验证的 3 景 Landsat 8-OLI 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),其轨道号分别为 128/040、128/041、129/040,经过辐射定标、大气校正、镶嵌裁剪等预处理后,进行 NDVI 计算及异常值去除,最终得到宜宾市 30 m 分辨率 NDVI 数据。

气候、土壤、DEM 数据和 2015 年人口密度、土地利用类型、GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),通过 ArcGIS 软件进行裁剪、投影变换、重采样等处理。其中,DEM 数据原始空间分辨率为 90 m,经过重采样处理后,在 250 m 的 DEM 数据基础上提取宜宾市海拔、坡度和坡向数据。

2.2 研究方法

2.2.1 Sen 氏趋势分析与 MK 检验

与传统的最小二乘法进行线性回归趋势分析相比,Sen 氏斜率趋势分析可以有效避免时间序列数据缺失和数据分布形态的影响,并且可以消除异常值对时间序列的干扰^[21]。Sen 氏斜率计算公式如下:

$$Q = \text{median} \frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}$$

式中, $1 < i < j < n$, i, j 为时间序列数, NDVI_i 、 NDVI_j 分别为 i, j 时间序列的 NDVI 数值。当斜率 Q 大于 0 时则表示存在上升趋势,小于 0 表示存在下降趋势。

Manna-Kendall 检验(MK 检验)不需要样本数据遵从特定的分布,能够有效的剔除异常值,适用于非正态

分布的数据^[22]。所以,本文采用 Sen 氏趋势分析与 MK 检验相结合,分析 NDVI 在像元尺度上的变化趋势及显著性;在区域尺度上则采用线性回归分析 NDVI 变化的总体趋势。

2.2.2 Hurst 指数

自然界中普遍存在具有长程依赖性的时间序列,如水文、地质和气候等,估计 Hurst 指数是定量描述长程依赖性的主要方法之一^[23-24]。关于 Hurst 指数 H 的获取可以选用多种方法,常用的是 R/S 分析法^[25]。其基本原理如下^[26]:

对于给定的时间序列 $\{NDVI_{(t)}\}$, $t=1,2,\dots,n$, 定义均值序列:

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

累积离差为:

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

极差为:

$$R_{(T)} = \max X_{(t,T)} - \min X_{(t,T)} \quad T=1,2,\dots,n$$

标准差为:

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

则根据以上公式,求比值 $R_{(T)}/S_{(T)} \cong R/S$, 若 $R/S \propto T^H$, 说明在分析的时间序列内存在 Hurst 现象, Hurst 指数 H 通过 $\log(R/S)_n = a + H \times \log(n)$ 利用最小二乘法拟合得到^[2]。如果 $0.5 < H < 1$, 表明时间序列内 NDVI 具有长程正相关性, H 越接近 1, 持续性越强; 如果 $H = 0.5$, 表明 NDVI 变化趋势在时间序列内是随机序列, 不存在变化持续性; 如果 $0 < H < 0.5$, 表明 NDVI 趋势在时间序列内具有反持续性, 即未来趋势与过去趋势相反, H 越接近于 0, 反持续性越强^[26]。

2.2.3 空间转移矩阵与重心迁移模型

空间转移矩阵来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述^[27], 可以定量识别某一要素不同等级在某一时间间隔的空间格局变化, 除了反映其不同等级面积变化, 还能直观反映各等级面积转入转出情况^[28], 因而广泛应用于土地利用、植被覆盖等方面。

重心迁移模型可以反映某一要素在空间演变过程中的时空聚集和迁移特征。NDVI 所表征的植被覆盖空间变化可以通过不同植被覆盖类型重心迁移过程来描述其总体变化趋势和空间变化特征^[29]。计算第 t 年植被覆盖的重心公式为:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{it} \times X_{it})}{\sum_{i=1}^n C_{it}} \quad Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{it} \times Y_{it})}{\sum_{i=1}^n C_{it}}$$

式中, X_t 、 Y_t 分别表示不同类型植被覆盖分布重心的经纬度坐标; C_{it} 表示第 i 个植被覆盖斑块第 t 年的面积; X_{it} 、 Y_{it} 分别表示第 i 个植被覆盖斑块第 t 年重心的经纬度坐标。

2.2.4 地理探测器

地理探测器是基于“因子力”度量指标, 结合 GIS 空间叠加技术和集合论提出的, 用于探测空间分异及分异机制背后驱动力的计量模型^[30], 包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 部分。传统的植被覆盖变化驱动力研究一般采用相关分析方法, 计算和检验影响因子与植被覆盖之间的相关关系。当面临多个影响因子时, 其计算较为繁琐, 而地理探测器能够较好的克服这一问题^[31]。其因子探测模型如下:

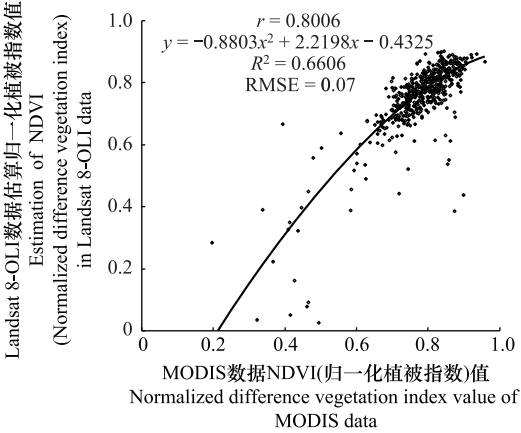
$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中, L 为因变量 NDVI 或影响因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 σ_h^2 分别为层 h 的单元数和方差; N 和 σ^2 分别为研究区域整体单元数和方差。 q 的值域为 $[0, 1]$,值越大表示因子 X 对 NDVI 空间分异的解释力越强,反之则越弱^[32]。

交互探测用于识别不同影响因子 X_s 之间的交互作用,即对因子 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 NDVI 解释力的影响进行评估。这是地理探测器区别于其他统计方法的最大优势之一^[33]。生态探测利用 F 统计量,分析两影响因子 X_1 与 X_2 对因变量 NDVI 空间分异的影响是否存在显著差异。如果存在显著差异,记为“Y”,否则记为“N”,据此可以判断哪一因子对 NDVI 更具影响力。风险探测是用于判断两个子区域间的属性均值是否存在显著差异,均值显著性越大的区域,其因变量值越大,据此可以搜寻影响因变量 NDVI 的因子适宜区域。

2.3 精度验证

基于遥感数据不确定性,本文通过同期高分辨率影像计算 NDVI,与研究所用的 MODIS NDVI 数据进行对比,以验证其精确性。选择研究区域云量较少且植被茂盛,符合验证需求的 2015 年 7 月 3 景 Landsat 8-OLI 遥感数据,应用 ArcGIS 生成 500 个随机点,提取 2015 年 7 月 MODIS NDVI 数据与 Landsat 8-OLI 数据估算的 NDVI 数据进行相关分析和曲线拟合。结果如图 2 所示,两组数据相关系数 $r=0.8006$,在 $P<0.001$ 水平上显著强相关。说明 MODIS NDVI 数据具有较高精度,符合本文研究要求。



3 结果与分析

3.1 植被覆盖空间格局

通过 NDVI 表征植被覆盖度,参考相关研究^[34-35]并结合宜宾市多年平均 NDVI 实际情况,利用等间距法将植被状况划分为如表 1 的 5 种类型,最终得到宜宾市植被覆盖空间格局如图 3。总体上看,宜宾市植被覆盖整体较好,受地形与土地利用方式影响呈自南向北逐渐减少的趋势。与土地利用类型图对比可以发现,在西部、南部达到高植被覆盖的区域也是主要的林地,占全市面积 52.06%;较高植被覆盖度则与耕地、草地相对应,占全市面积 45.83%;较低植被覆盖度主要分布在沿江地带和建成区等以水生植被和人工绿化植被为主的植被稀少区域,仅占全市面积 0.64%;低植被覆盖度主要沿长江干流分布,水面开阔而反射率高,NDVI 值极低。总之,整体植被覆盖状况与土地利用方式高度相关。

图 2 宜宾市 2015 年 7 月 MODIS 数据与 Landsat 8-OLI 数据 NDVI 相关性分析

Fig.2 The correlation analysis of the NDVI of MODIS data and Landsat 8-OLI data in July 2015 in Yibin City

表 1 植被覆盖类型
Table 1 The types of vegetation cover

植被类型 Vegetation types	NDVI	面积比例 Area scale/%	分类特征 Classification feature
低植被覆盖度 I Very low vegetation coverage	<0.15	0.23	水域、裸土、裸岩等
较低植被覆盖度 II Lower vegetation coverage	0.15—0.3	0.64	水域、建成区、稀疏草地
中植被覆盖度 III Medium vegetation coverage	0.3—0.45	1.24	中产草地、低郁闭林地、建成区绿地、耕地
较高植被覆盖度 IV Higher vegetation coverage	0.45—0.6	45.83	中高产草地、灌木林地、耕地
高植被覆盖度 V Very high vegetation coverage	>0.6	52.06	高产草地、密林地、耕地

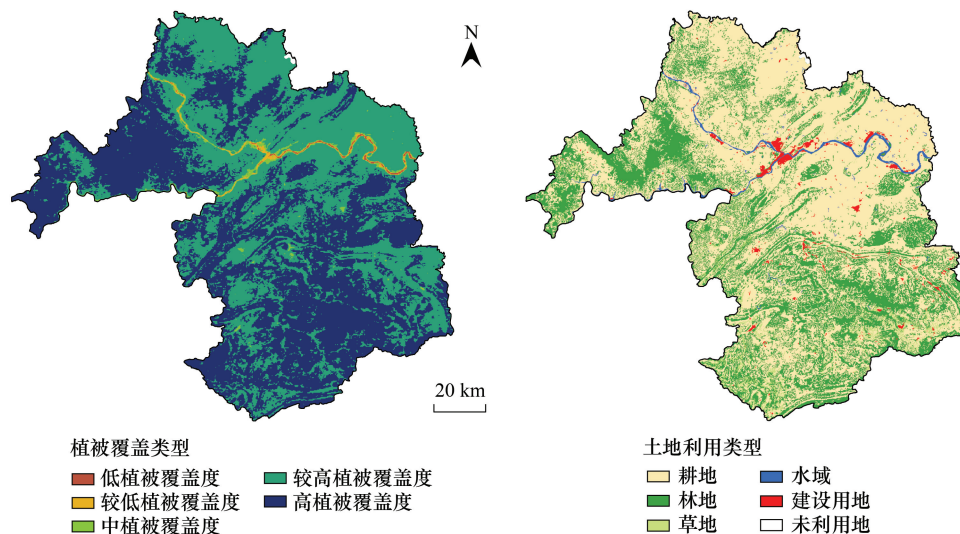


图3 2000—2015 年植被覆盖空间格局及 2015 年土地利用类型

Fig.3 The spatial pattern of vegetation cover in 2000 to 2015 and the land use classification in 2015

3.2 NDVI 时间变化趋势

3.2.1 区域尺度 NDVI 动态变化

图4是基于线性回归的宜宾市区域尺度全年NDVI均值逐年变化情况。总体上看,NDVI处于较高的水平,多年平均值为0.598,且在2000—2015年间呈波动趋势上升。平均年际变化率达到0.007/a, R^2 为0.7736,标准误为0.0186,表明数据离散度较低,拟合预测效果较好;全年NDVI标准差为0.0378,变异系数为0.0632,表明波动趋势明显。

图5是区域尺度四季NDVI均值逐年变化情况。具体来看四个季节中,NDVI均值整体较高,夏季最高为0.751,秋季、春季次之为0.624、0.577,冬季最低为0.443。NDVI年际波动均明显,冬季尤为剧烈,其标准误、标准差和变异系数最大,分别为0.0454、0.0571和0.1291,线性拟合较差,春季、秋季年际波动相对次之,夏季年际波动相对稳定。最后,各季节中平均年际变化率最高的是春季和秋季,均到达0.0083/a,冬季次之为0.0073/a,夏季最低为0.0039/a。其中,夏季NDVI年际波动比较平稳但增长率较低,可能是宜宾市植被以亚热带常绿阔叶林为主,夏季草木繁盛,增长相对其他季节不够明显;此外,NDVI饱和效应对夏季也存在很大影响。总的来说,宜宾市NDVI在2000—2015年间逐渐波动增长,但各季节增长速率与年际波动状况各有不同。

3.2.2 像元尺度 NDVI 动态变化

如图6和图7、8所示,分别显示了宜宾市2000—2015年在全年及季节尺度上NDVI变化趋势与变化显著性。根据Sen氏趋势分析结果将变化趋势分为5级,根据MK检验在 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 两个显著性水平上的结果将变化显著性分为6级。

全年NDVI变化趋势。总体上看,全年NDVI在近16年中以极显著增长趋势为主,极显著增长区域分布

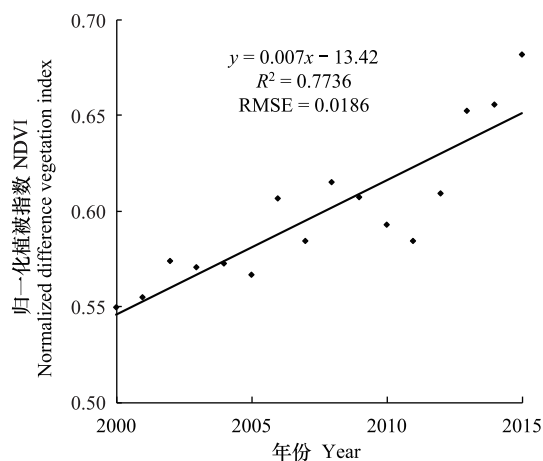


图4 2000—2015 年区域尺度 NDVI 全年变化趋势

Fig.4 The variation tendency of NDVI for annual based on regional scale in 2000 to 2015

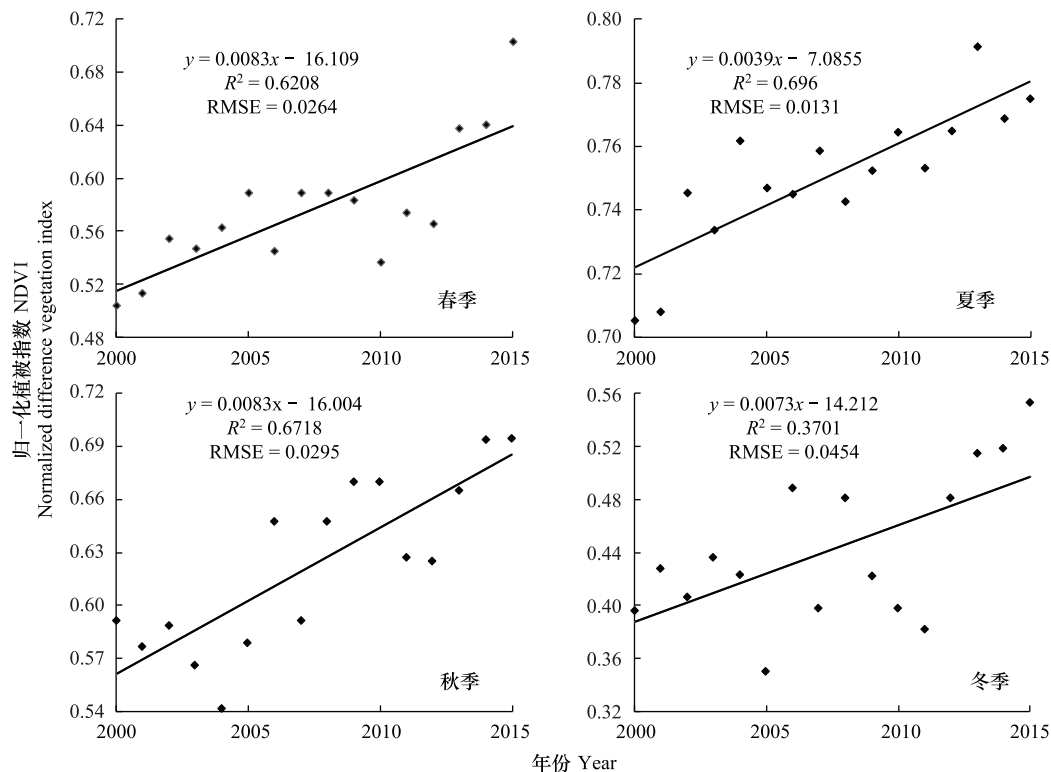


图5 2000—2015 年区域尺度 NDVI 季节变化趋势

Fig.5 The variation tendency of NDVI for four seasons based on regional scale in 2000 to 2015

广泛,达全市面积 70.18%,其中,出现显著增长的区域又存在增长速率差异。快速增长区域占 5.61%,主要分布在宜宾县、翠屏区、高县、兴文县和筠连县山地区域;缓慢增长占据绝对地位为 80.99%,这与实施生态建设工程以来在原有耕地基础上人工造林、封山育林存在很大关系。同时,随着宜宾市城市化与工业化的发展,城市面积快速扩张,人类活动干扰对植被造成了剧烈影响,在沿江区域和建设用地区域等小部分区域也出现 NDVI 显著退化,占全市面积 0.22%。最后,不存在显著变化趋势区域占全市面积 14.92%,主要分布在屏山县、江安县北部及沿江水域,其 NDVI 基本保持稳定。屏山县境内变化不显著区域主要是大凉山余绪,作为主要林区,其植被茂密,年际变化不大;此外,NDVI 夏季饱和效应对此也存在很大影响。江安县北部是川南丘陵区,作为宜宾市主要商品粮种植区,天然植被较少,耕地耕种收获所造成的植被年际变化也不大。造成以上区域 NDVI 发生微弱变化的影响因素包括自然与人为等多方原因综合,难以用线性模型进行准确刻画^[36]。

各季节 NDVI 变化趋势。从整体变化显著性来看,春季、秋季都以极显著增长趋势为主,分布区域分别占全市面积 48.82%、43.98%;夏季、冬季则以不显著增长趋势为主,分布区域分别为 46.29%、51.79%。从变化速率上看,春季、秋季与冬季均以缓慢增长为主,其分布区域分别达 66.39%、64.65%与 68.02%;夏季则是缓慢增长与保持稳定两种状态占据绝对地位,分别达 49.49%、48.20%。从空间分布上看,春季、秋季大部分区域 NDVI 均出现极显著增长,广泛分布于西部、南部地势较高区域。冬季 NDVI 出现极显著增长主要分布在西部、南部等生态建设一线区域,常绿植被出现明显增长,不显著增长则主要是东北部地势较低的丘陵区域。夏季则呈破碎化分布,在东南部原本植被覆盖相对较低的喀斯特地貌区出现明显增长。此外,夏季高植被覆盖的西北部屏山县、西南部山区变化往往不够显著,这与 NDVI 饱和效应关系密切。各季节变化速率的空间分布也与变化显著性大体一致。与全年 NDVI 均值变化趋势相类似,出现显著退化的区域也主要分布在沿江区域与县城等建成区。NDVI 总体上都呈现海拔地势越高,林地分布越多,变化越明显且出现明显增长;海拔地势越低,耕地分布越多,变化越不显著且变化相对稳定趋势。

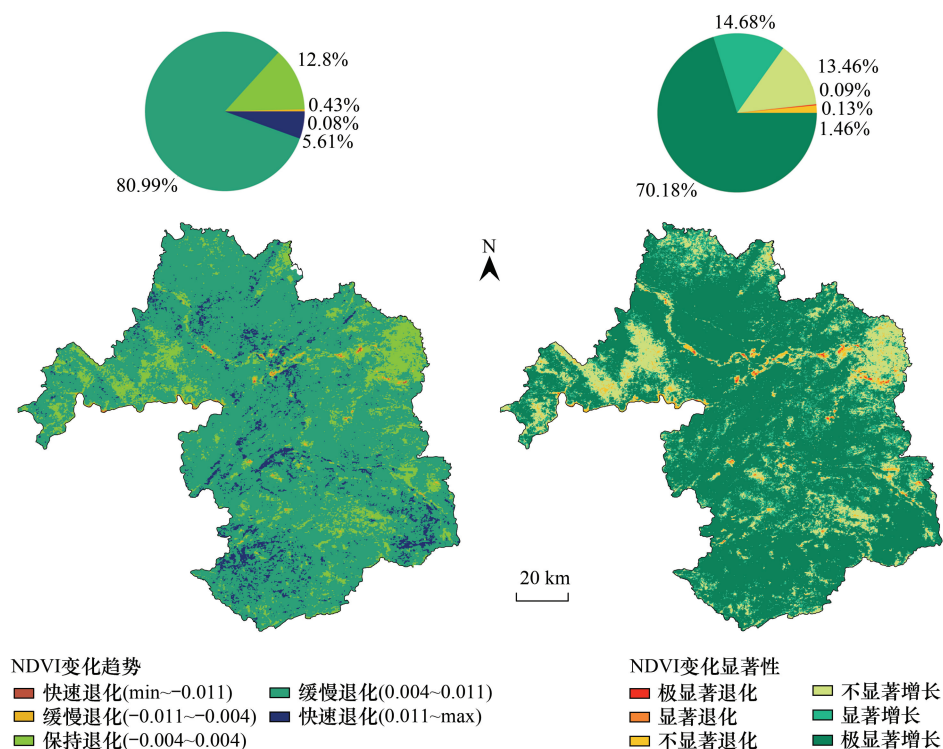


图 6 2000—2015 年全年 NDVI 变化趋势及变化显著性

Fig.6 The variation tendency and the significance of variation tendency of annual NDVI in 2000 to 2015

总的来说,通过全年和季节 NDVI 变化均可发现,自 2000 年实施生态建设工程以来,执行退耕还林、封山育林的主要区域植被覆盖稳步增加,生态环境不断优化,生态建设成效明显。

3.3 基于 Hurst 指数的 NDVI 变化可持续性

通过逐像元计算 Hurst 指数如图 9,可以看出, H 值高于 0.7 的区域较少且分布比较破碎,其面积仅占全市面积 3%; H 值高于 0.6 的区域分布相对集中于中部、西南部,占 13.76%。 H 值低于 0.5 的区域分布广泛,占 53.62%,其中低于 0.4 的区域占 20.37%,主要是东南部、南部与西北部等山地区域出现了明显的反持续性特征。这表明宜宾市 NDVI 变化受自然与人为等难以量化的原因影响,尤其是人类活动的影响,其植被生长持续性不强,需进一步加强生态保护工作,特别是出现反持续性特征的山地区域。

根据 H 值是否大于 0.5 的正反持续性,将 Hurst 指数与全年 NDVI 均值变化趋势通过栅格计算进行叠加后重分类,得到如图 9 的 NDVI 未来变化趋势分布图。据图可知,继续保持快速增长的区域较少,仅占 2.56%,继续保持缓慢增长的区域分布广泛占 37.68%,与 Hurst 指数高于 0.6 的分布区域较为一致,主要分布在中部南溪区、翠屏区、宜宾县南部与西南部高县等区域。同时,出现波动的区域占 53.65%。主要是原本保持稳定的地区出现波动,占 46.42%,分布在屏山县境内大凉山余绪、兴文县喀斯特地貌区以及江安县北部川南丘陵区。继续出现退化的区域分布极少,仅占 0.43%,也主要分布在相关建成区。未来生态建设需要精准施策,对波动、退化区域加强生态保护力度。

3.4 NDVI 空间分布变化

3.4.1 植被覆盖空间转移矩阵

根据前文植被覆盖分级,将各级植被通过 ArcGIS 空间叠加分析,得到 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年 3 个时段植被覆盖空间转移矩阵如表 2,可以发现:

2000—2005 年这一时间段较高植被覆盖与高植被覆盖面积占比大幅增加,较低植被覆盖面积占比略有

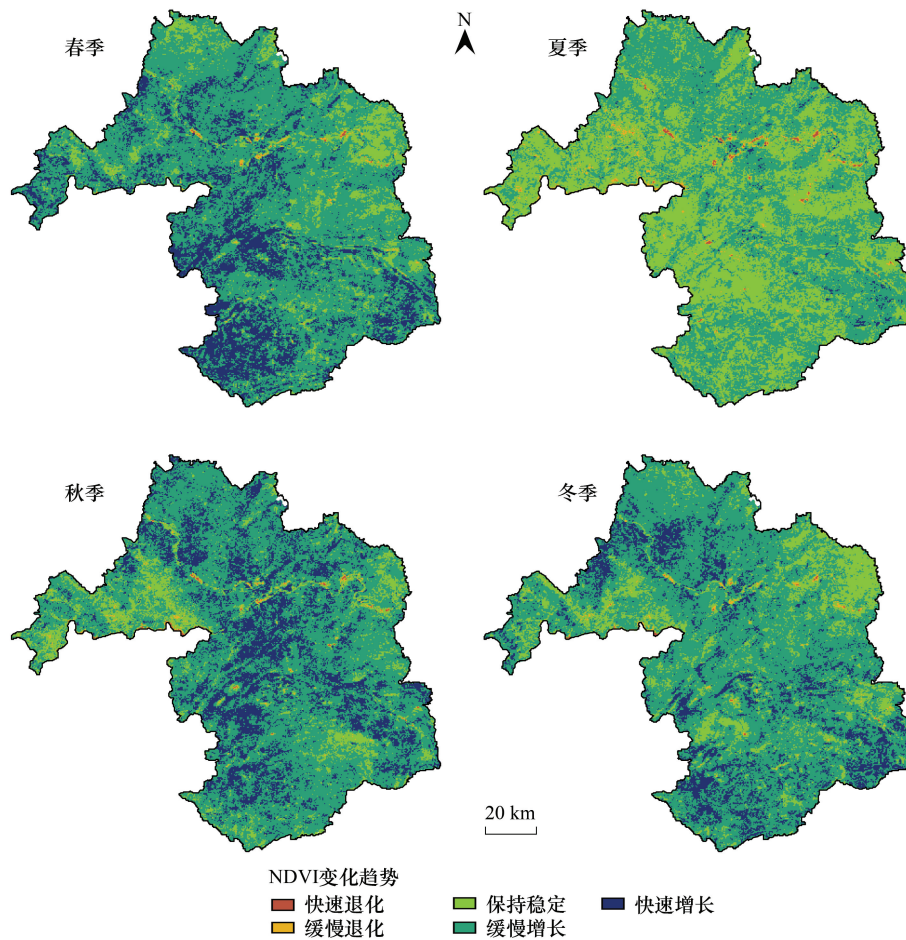


图 7 2000—2015 年各季节 NDVI 变化趋势

Fig.7 The variation tendency of NDVI during four seasons in 2000 to 2015

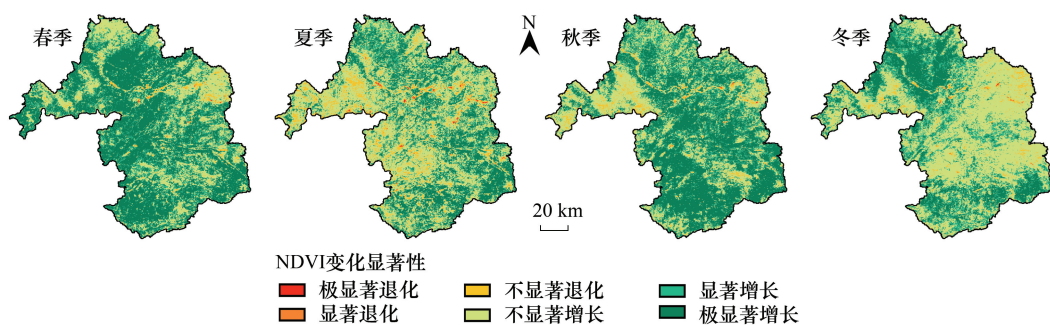


图 8 2000—2015 年各季节 NDVI 变化趋势显著性

Fig.8 The significance of variation tendency of NDVI during four seasons in 2000 to 2015

增加,主要是由低一级植被类型转化而来。其中,中植被覆盖与较高植被覆盖之间的相互转化占比较大,植被覆盖保持稳定不变的区域占 88.47%,植被覆盖有所改善区域占 8.79%,植被覆盖发生退化区域占 2.74%。总的来说转化趋势以正向演进为主,生态建设成效初显,生态环境发生良好变化。

2005—2010 年这一时间段较高植被覆盖与高植被覆盖面积占比有所增加,也主要是由低一级植被类型转化而来,同时低植被覆盖面积占比存在微弱增加,是由较低植被覆盖发生反复退化所致。其中,植被覆盖保

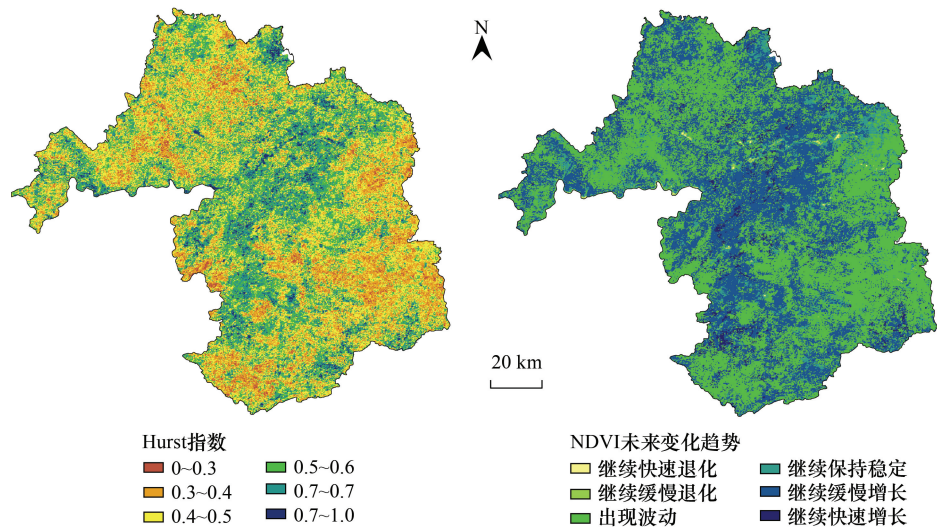


图 9 2000—2015 年植被变化 Hurst 指数及未来植被变化趋势

Fig.9 The Hurst index of vegetation variation in 2000 to 2015 and the variation tendency of vegetation in future

持稳定不变的区域占 91.02%,植被覆盖有所改善区域占 6.88%,发生退化区域占 2.1%。其转化趋势也以正向演进为主,发生在“中植被覆盖→较高植被覆盖→高植被覆盖”这一路径,生态环境持续优化。

表 2 宜宾市植被覆盖空间转移矩阵/%

Table 2 The transfer matrix of vegetations cover in Yibin City

时段 Period of time	初始类型 Initial types	转换类型 Transform types					合计 Gross
		低植被 覆盖/I	较低植被 覆盖/II	中植被 覆盖/III	较高植被 覆盖/IV	高植被 覆盖/V	
2000—2005	低植被覆盖/I	0.24	0.1	0	0	0	0.34
	较低植被覆盖/II	0.03	0.55	0.13	0	0	0.71
	中植被覆盖/III	0	0.11	6.1	7.23	0	13.44
	较高植被覆盖/IV	0	0	2.13	81.31	1.33	84.77
	高植被覆盖/V	0	0	0	0.47	0.27	0.74
	合计 Gross	0.27	0.76	8.36	89.01	1.6	100
2005—2010	低植被覆盖/I	0.24	0.03	0	0	0	0.27
	较低植被覆盖/II	0.09	0.52	0.15	0	0	0.76
	中植被覆盖/III	0	0.11	3.53	4.73	0	8.36
	较高植被覆盖/IV	0	0	0.97	86.06	1.97	89.01
	高植被覆盖/V	0	0	0	0.93	0.67	1.6
	合计 Gross	0.33	0.66	4.65	91.72	2.64	100
2010—2015	低植被覆盖/I	0.14	0.18	0.01	0	0	0.33
	较低植被覆盖/II	0.04	0.23	0.38	0.01	0	0.66
	中植被覆盖/III	0.02	0.08	0.97	3.57	0.02	4.65
	较高植被覆盖/IV	0.01	0.02	0.25	50.61	40.83	91.72
	高植被覆盖/V	0	0	0	0.38	2.26	2.64
	合计 Gross	0.2	0.51	1.61	54.56	43.11	100

2010—2015 年这一时间段高植被覆盖的面积占比大幅增加,主要是由低一级植被类型转化而来。第一轮退耕还林工程实施十余年,原本是坡耕地的区域通过植树育苗,部分树种成熟,林地立体结构初显,植被覆盖率大幅增长。在这五年间,植被覆盖保持稳定不变的区域占 54.2%,植被覆盖有所改善区域占 45%,发生退

化区域占 0.8%。其转化趋势也以正向演进为主,显著发生于“较高植被覆盖→高植被覆盖”这一路径,经过长期生态建设,生态环境显著优化。

3.4.2 植被覆盖重心迁移过程

如图 10 以 3 年为一个刻度计算不同植被覆盖类型重心迁移过程。总体上看,不同植被覆盖类型的重心分布与植被覆盖空间分布格局具有较高一致性,说明不同植被覆盖类型重心迁移过程能够很好的反映植被空间变化特征^[29]。低植被覆盖、较低植被覆盖重心主要稳定在宜宾市中北部沿江区域,存在东西向曲折迁移过程,这与两种植被类型空间分布严格一致。较高植被覆盖、高植被覆盖重心主要稳定在中部翠屏区、高县区域,由南向北迁移,与两种植被类型空间分布一致,且与实施退耕还林后北部地区植被覆盖增加这一实际情况相吻合。

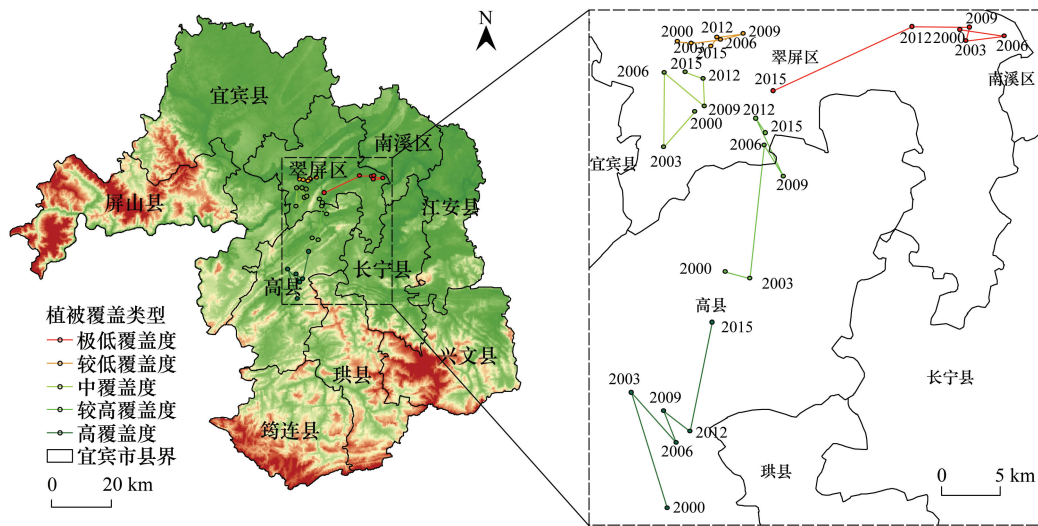


图 10 2000—2015 年植被覆盖斑块重心迁移变化

Fig.10 The migration and variation of center of vegetation cover patches in 2000—2015

具体来看,低植被覆盖重心在 2000—2015 年总体上向西南方向迁移,迁移距离为 16.76 km,其原因主要是建设用地快速增加,城市建成区尤其是宜宾市市区的快速扩张。较低植被覆盖重心主要在东西方向上迁移,迁移距离为 2.89 km;中植被覆盖重心主要在南北方向上呈 S 线型迁移,迁移距离为 3.44 km,变化均不明显。较高植被覆盖重心主要向东北方向迁移,迁移距离为 12.29 km。高植被覆盖重心主要是向南北方向上呈折线型迁移,迁移距离为 16.25 km。在这 16 年间较高植被覆盖与高植被覆盖存在由南向北大规模扩张的趋势,其重心迁移方向、迁移距离亦说明实施生态建设工程以来,生态环境不断优化。

3.5 NDVI 空间分布的地理探测

一般来说,影响植被覆盖空间分布的因素主要包括气候因素、地表因素与人类活动因素^[37]。因此,本文从以上三方面出发,选取相应的代理变量,形成如表 3 的宜宾市 NDVI 影响因子。在 ArcGIS 中设置 2 km 规则渔网划分研究区,再将 NDVI 及各影响因子分区提取到点,最后纳入地理探测器模型计算。

表 3 宜宾市 NDVI 影响因子

Table 3 The influence factors of NDVI

气候因素 Climatic factors	地表因素 Surface factors	人类活动要素 Human activities factors
年均温 Annual mean temperature (X_1)	海拔 Altitude (X_5)	GDP (X_9)
降水 Precipitation (X_2)	坡度 Slope (X_6)	人口密度 Population density (X_{10})
日照时数 Sunshine duration (X_3)	坡向 Aspect (X_7)	土地利用类型 Land-use type (X_{11})
相对湿度 Relative humidity (X_4)	土壤类型 Agrotype (X_8)	

3.5.1 探测因子对 NDVI 的影响力分析

根据因子探测,计算各因子对 NDVI 的影响力大小,结果如表 4。各因子对 NDVI 影响程度的排序为:海拔(X_5)>年均温(X_1)>土地利用类型(X_{11})>人口密度(X_{10})>日照时数(X_3)>坡度(X_6)>土壤类型(X_8)>GDP(X_9)>降水(X_2)>相对湿度(X_4)>坡向(X_7)。从各因子对 NDVI 的解释力来看,海拔、年均温、土地利用类型和人口密度对 NDVI 的解释力都超过 25%,分别为 39.9%、31.0%、28.1%和 25.4%,是主要影响因子;日照时数、坡度、土壤类型与 GDP 对 NDVI 的解释力都超过 20%,分别为 24.7%、23.9%、23.2%与 22.7%,是次要影响因子。其余因子解释力相对微弱,没有超过 20%,且相对湿度与坡向 P 值过大,影响不显著。

表 4 因子探测结果

Table 4 The result of factor detection

因子 Factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
q	0.310	0.155	0.247	0.025	0.399	0.239	0.003	0.232	0.227	0.254	0.281
P value	0.000	0.000	0.000	0.931	0.000	0.000	0.623	0.000	0.000	0.000	0.000

q 值表示因子解释力,值域为[0,1],值越大,解释力越强

表 5 为生态探测结果。根据统计检验,海拔与各气候因素对 NDVI 空间分布的影响具有显著性差异,与其他因子无显著性差异;年均温与除海拔外的其他因子无显著差异;土地利用类型与年均温、日照时数、海拔、人口密度之间无显著差异;人口密度与解释力较强的因子之间均无显著差异。这进一步表明,海拔、年均温对 NDVI 影响最大;土地利用类型、人口密度对 NDVI 影响极大,但这种作用同时受到其他因子影响;日照时数、坡度、土壤类型与 GDP 对 NDVI 影响较大,其他因子影响较小。

表 5 探测因子对 NDVI 影响差异的统计显著性

Table 5 Statistical significance of the detection factors for NDVI distribution

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1											
X_2	N										
X_3	N	Y									
X_4	N	N	N								
X_5	Y	Y	Y	Y							
X_6	N	Y	N	Y	N						
X_7	N	N	N	N	N	N					
X_8	N	Y	N	Y	N	N	Y				
X_9	N	Y	N	Y	N	N	Y	N			
X_{10}	N	Y	N	Y	N	N	Y	N	N		
X_{11}	N	Y	N	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	

采用显著性水平为 0.05 的 F 检验,Y 表示两种因子在 NDVI 空间分布影响上存在显著差异;N 表示无显著性差异

综合各因子可以发现,以海拔、年均温为主的部分自然环境因子是影响宜宾市 NDVI 空间分布的主要基础因子。人类活动对 NDVI 空间分布影响很大,但这种影响作用存在区域差异,且与海拔、年均温的影响作用之间无显著差异。究其原因,宜宾市土地利用存在明显的高低指向性,建设用地、耕地等主要分布在地势低平的沿江及川南丘陵地带,而地势较高的山地则以林地、草地为主,是开展退耕还林等生态建设工程的重点区域,人类活动相对较少。同时,降水、相对湿度等影响植物生长的重要因素在宜宾市空间差异较小,因而对 NDVI 空间分布影响微弱。因此,可以确定海拔、年均温、土地利用类型与人口密度为影响宜宾市 NDVI 空间分布的主导因子。

3.5.2 主导因子交互作用分析

根据交互探测,对 NDVI 影响因子进行交互作用分析,选取主导因子交互作用结果如表 6。可以发现,所

有主导因子之间都存在显著的双协同增强作用,即两个因子叠加大大增强了二者对 NDVI 空间分布的影响。这进一步佐证了以上因子对 NDVI 的主导作用,并且主导作用的发挥通常是呈双协同增强状态。值得注意的是,所有因子与海拔进行交互探测后,都存在及其明显的增强效应,特别是人类活动因素。这表明,自然环境因素与人类活动因素共同作用下对 NDVI 空间分布影响更大。

表 6 主导因子交互作用分析及交互关系
Table 6 The analyze of interaction between the dominant factors

$X \cap Y$	$q(X)$	$q(Y)$	$q(X \cap Y)$	交互关系 Interactive relationship
$X_5 \cap X_{11}$	0.399	0.281	0.525	双协同增强作用
$X_5 \cap X_{10}$	0.399	0.254	0.465	双协同增强作用
$X_1 \cap X_{11}$	0.310	0.281	0.463	双协同增强作用
$X_{10} \cap X_{11}$	0.254	0.281	0.451	双协同增强作用
$X_1 \cap X_9$	0.310	0.399	0.414	双协同增强作用
$X_1 \cap X_{10}$	0.310	0.254	0.410	双协同增强作用

3.5.3 影响因子的适宜范围或类型

根据风险探测,计算分析各因子对 NDVI 分布变化的适宜范围或类型。考虑到人类活动因素受自然环境因素影响较大,故对四个主导因子及次要自然环境因子的适宜范围或类型进行探讨,其结果如表 7。不考虑人类活动影响,在宜宾市仅有的中低山与丘陵地形,当海拔高于 1390 m,坡度大于 31.8°时,NDVI 值较高,这些区域山高坡陡,不太适宜生产生活,因而植被覆盖度较高。同时,在年均温为 14.8—15.6℃,年日照时数为 1196—1273 h 时,具有较好的光温条件,植被覆盖度也比较高。此外,暗黄棕壤作为广泛分布于亚热带中山上部区域,对该地区植被生长也具有积极作用,侧面反应了海拔对 NDVI 的主导作用。

表 7 不同因子的适宜范围或类型
Table 7 The suitable range or type of different factors

因子 Factors	适宜类型或范围 Comfort type or range	NDVI
海拔 Altitude(X_5)	>1390 m	0.667
年均温 Annual mean temperature (X_1)	14.8—15.6℃	0.649
土地利用类型 Land-use type (X_{11})	林地	0.628
人口密度 Population density (X_{10})	<185 人/km ²	0.654
日照时数 Sunshine duration (X_3)	1196—1273 h	0.631
坡度 Slope (X_6)	>31.8°	0.655
土壤类型 Agrotype (X_8)	暗黄棕壤	0.658

总的来说,通过地理探测器发现,宜宾市气候要素空间差异较小,NDVI 空间分布主要由海拔导致的地表差异,包括海拔、年均温、土地利用类型、人口密度等构成的影响因素分异所决定。

4 结论与讨论

4.1 讨论

长江上游地区地形复杂破碎,水土流失严重,人类活动对植被的影响也极为剧烈。宜宾市作为三江交汇、高原盆地过渡区域,其地理环境在长江上游流域极具代表性。本文从不同尺度对 2000—2015 年宜宾市 NDVI 时空变化进行了分析,并在中小尺度上探究植被生长与自然环境、人类活动之间的响应机制。与以往关于植被变化和气候要素响应的研究结论有所不同,研究发现影响植被空间分布的主要是海拔导致的地表差异。植被生长受到自然环境和人类活动的共同影响,但人类活动也存在明显的环境导向。

通过区域与像元尺度的 NDVI 时空变化分析,发现长江上游实施退耕还林、天保工程以来,宜宾市植被覆盖稳步增加,生态环境得到优化。这是人类活动对自然环境的正反馈,说明生态建设成效明显。但是,由于 NDVI 存在饱和效应,尤其是夏季,使得其生态建设成效评估仅局限于研究区域整体,不能深入到更小尺度。在湿润环境下以常绿阔叶林为主的地区,可以考虑使用 EVI 进行生长季变化研究,较之 NDVI 具有更好的表现^[38]。本文主要对植被年际变化进行探讨,受饱和效应影响相对较小,故基于 NDVI 展开研究。此外,不论是使用 NDVI 或是 EVI 进行植被变化研究,都需注意植被指数对植被覆盖度真实值的偏离。本文使用同期高分辨率影像和 MODIS 数据验证证明,MODIS NDVI 对研究区植被覆盖度具有较好的表征效果,但 MODIS 遥感影像仍具有不确定性,需要进一步检验^[39]。

地理探测器能够精准识别多因子之间的关系及其交互作用,在驱动力机制分析方面应用广泛^[30]。目前应用地理探测器探究长时间序列 NDVI 空间分异机制的研究相对较少,本文用其探究 NDVI 空间分异与影响因子之间的关系,得出的主导因子符合长江上游地区植被生长自然规律,与同类型研究结论也相对一致^[20,31],地理探测器在这一领域的应用具有科学性。但是,地理探测器在应用过程中对影响因子的空间分区没有明确的划分依据,同时因子选取可能不够完备,其因子解释力存在微弱的主观性。

4.2 结论

(1)2000—2015 年宜宾市的植被生长状态良好,整体植被覆盖度较高,受地形主要是海拔影响呈自南向北逐渐减少趋势。其中,高植被覆盖在西部、南部山区分布广泛,占全市面积 52.06%。

(2)从 NDVI 变化趋势来看,2000—2015 年宜宾市 NDVI 呈波动趋势上升,平均年际变化率达到 0.007/a,全年 NDVI 标准误为 0.0186,标准差为 0.0378,变异系数为 0.0632,波动较为明显。同时,极显著增长区域面积达 70.18%,广泛分布于各区县,增长速率上以缓慢增长为主,说明生态建设成效明显。

(3)从 NDVI 变化可持续性来看,宜宾市植被覆盖总体持续性不强,许多区域出现波动,主要是东南部、南部与西北部等山区出现了明显的反持续性特征。在未来可能出现波动的区域占 53.65%,主要分布在西北部、东南部及东北部,需进一步加强退耕还林、封山育林等生态建设工作。

(4)从 NDVI 空间变化来看,2000—2015 年宜宾市植被生长以正向演进为主,主要是发生在“中植被覆盖→较高植被覆盖→高植被覆盖”这一路径,生态环境不断得到优化;不同时段存在不同的演进效率和迁移路径,演进过程与已有关于长江上游地区生态建设工程成效监测的研究结论相互佐证^[34,40-41]。

(5)地理探测器探究结果表明,宜宾市气候因素空间差异较小,NDVI 空间分布主要由一系列地表差异,包括海拔、年均温、土地利用类型、人口密度所决定,其因子解释力均超过 25%,自然环境因素与人类活动共同作用对 NDVI 影响更加显著。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张远东, 张笑鹤, 刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 323-330.
- [4] 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.
- [5] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [6] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987.
- [7] 刘灿, 高阳华, 李月臣, 杨世琦, 倪波顺. 基于 NDVI 的重庆市植被覆盖变化及其对气候因子的响应. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1514-1520.
- [8] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 398-409.
- [9] 冯露, 岳德鹏, 郭祥. 植被指数的应用研究综述. *林业调查规划*, 2009, 34(2): 48-52.
- [10] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to

- environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [11] Wardlaw B D, Egbert S L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U.S. central great plains. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1096-1116.
- [12] 汤旭光, 李恒鹏, 聂小飞, 李鹏程. 应用 MODIS 数据监测千岛湖流域植被覆盖动态(2001-2013 年). *湖泊科学*, 2015, 27(3): 511-518.
- [13] 刘鹏举, 袁卓慧, 胡业翠. 山水林田湖草生态保护修复工程第一批试点区 NDVI 时空分布与影响因素分析. *生态经济*, 2019, 35(7): 196-202.
- [14] 朴世龙, 方精云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.
- [15] 宋怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 89-93, 173-173.
- [16] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 张宏斌, 欧阳华. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.
- [17] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [18] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- [19] 徐芝英, 胡云锋, 甄霖, 庄大方. 基于小波的浙江省 NDVI 与自然-人文因子多尺度空间关联分析. *地理研究*, 2015, 34(3): 567-577.
- [20] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [21] 刘亚龙, 王庆, 毕景芝, 张明明, 邢前国, 施平. 基于 Mann-Kendall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析. *海洋学报*, 2010, 32(3): 79-87.
- [22] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [23] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- [24] 侯西勇, 应兰兰, 高猛, 毕晓丽, 路晓, 朱明明. 1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征. *地理科学*, 2010, 30(5): 735-741.
- [25] 冯新灵, 冯自立, 罗隆诚, 邱丽丽, 刘鹏. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究. *干旱区地理*, 2008, 31(2): 175-181.
- [26] 温晓金, 刘焱序, 杨新军. 恢复力视角下生态型城市植被恢复空间分异及其影响因素——以陕南商洛市为例. *生态学报*, 2015, 35(13): 4377-4389.
- [27] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [28] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 朱洪芬. 沁河流域植被覆盖时空分异特征. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1093-1103.
- [29] 段翰晨, 王涛, 薛焜, 孙家欢, 杨林海. 基于 RS 与 GIS 的科尔沁沙地沙漠化时空演变. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 470-477.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006-2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [32] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [33] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因. *地理学报*, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [34] 胡晓曦, 第宝锋, 袁媛, 黄靖, 张梦. 长江上游生态建设工程与植被覆盖时空变化的响应特征研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(8): 1264-1272.
- [35] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. *地理学报*, 2001, 56(6): 667-672.
- [36] 尤南山, 蒙古军, 孙慕天. 2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(1): 171-181.
- [37] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 庞国伟, 杨力华. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 546-555.
- [38] 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.
- [39] 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 徐新良, 罗怀良, 赵景峰, 杨存建. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测. *生态学报*, 2016, 36(7): 1975-1988.
- [40] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 牛香. 长江中上游地区退耕还林成效监测与评价. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2463-2469.
- [41] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2084-2097.