



引用格式: 何清芸, 牟凤云, 李秋彦, 等. 重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11955-11962.
He Qingyun, Mu Fengyun, Li Qiuyan, et al. Geography study on spatiotemporal evolution of fractional vegetation coverage and the driving forces in Chongqing[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 11955-11962.

天文学、地球科学

重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究

何清芸¹, 牟凤云^{1*}, 李秋彦¹, 杨 猛²

(1. 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2. 重庆勘测院, 重庆 400020)

摘 要 为了分析 2000 年以来重庆市植被时空变化情况及其驱动力作用性质, 基于 MODIS-NDVI 数据, 采用像元二分模型、差值法、均值法、一元线性回归模型研究重庆市 2000—2015 年遥感影像的植被覆盖度年、季时空演变特征, 并利用地理探测器分析气温、降水量、人口密度、国内生产总值(gross domestic product, GDP)等因子对植被覆盖度的交互影响作用, 及重庆市植被适宜性生长区域。结果表明: 2000—2015 年重庆市植被覆盖度季节均值呈春季到夏季增加, 夏季到冬季减少的趋势; 低覆盖度、中低覆盖度和中等覆盖度呈春季到夏季减少, 夏季到冬季增加的趋势。2000—2015 年重庆市植被覆盖度总体趋于改善, 植被覆盖度提升面积远远大于退化面积。植被覆盖度在空间分布上东部地区高于西部地区。影响因子对植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)影响的强度依次为: 气温 > 降水量 > 人口密度 > GDP。人为因子和气候因子共同作用时, 增强了对植被覆盖度的影响力。重庆市植被生长适宜性区域是年均降水量等级为 1 383.3 ~ 1 567.6 mm、气温分区间为 5 ~ 10.2 °C、人口分区间为 22.7 ~ 211.5 人/km² 及年均 GDP 为 17 万 ~ 2 947.7 万元/km² 的地区。研究结果可为重庆市生态环境治理和保护提供科学依据, 丰富地理探测器模型研究成果。

关键词 遥感; 植被覆盖度; 地理探测器; 时空演变; 驱动力; 重庆市

中图法分类号 P237;

文献标志码 A

Geography Study on Spatiotemporal Evolution of Fractional Vegetation Coverage and the Driving Forces in Chongqing

HE Qing-yun¹, MU Feng-yun^{1*}, LI Qiu-yan¹, YANG Meng²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Survey Institution, Chongqing 400020, China)

[Abstract] In order to analyze the spatiotemporal change of fractional vegetation and its driving forces in Chongqing since 2000, based on the MODIS-NDVI data, pixel dichotomous model, difference method, mean method and unary linear regression model were used to study the spatiotemporal and seasonal evolution characteristics of vegetation coverage of remote sensing images in Chongqing from 2000 to 2015. Geographic detector was used to analyse the interaction of temperature of precipitation, population density, gross domestic product(GDP) and other factors on vegetation coverage, and the suitable vegetation growth area in Chongqing was analyzed too. The results show that from 2000 to 2015, the seasonal mean of vegetation coverage in Chongqing increases from spring to summer, and decreases from summer to winter. The low, medium and low coverage tends to decreases from spring to summer and increases from summer to winter. The vegetation coverage in Chongqing tends to improve from 2000 to 2015, and the increased area of vegetation coverage is much larger than the degraded area. The spatial distribution of vegetation coverage in the eastern region is higher than that in the western region. The intensity of influence factors on fractional vegetation cover(FVC) is as follows: temperature > precipitation > population density > GDP. When human factors and climate factors acted together, the influence on vegetation coverage is enhanced. The area suitable for vegetation growth in Chongqing is the area with the average annual precipitation of 1 383.3 ~ 1 567.6 mm, the temperature of 5 ~ 10.2 °C, the population of 22.7 ~ 211.5 person/km² and the average annual GDP of $1.7 \times 10^5 \sim 2.9477 \times 10^7$ yuan/km². The research results can provide scientific basis for ecological environment management and protection in Chongqing and enrich the research results of geographical detector model.

[Keywords] remote sensing; vegetation coverage; geographic detector; temporal and spatial evolution; drive; Chongqing City

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 国家重点研究计划(2019YFB2102503, 2019YFB2102502); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0626)

第一作者: 何清芸(1998—), 女, 汉族, 重庆涪陵人, 硕士研究生。研究方向: 地理信息系统应用与自然灾害。E-mail: 2683795140@qq.com。

* 通信作者: 牟凤云(1979—), 女, 汉族, 山东潍坊人, 博士, 教授。研究方向: 地理信息系统应用与智慧城市。E-mail: mfydsd@cqjdu.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

随着科学技术的发展,生态环境受人类活动影响增大,植被作为生态系统的“指示器”^[1],其相关研究对生态环境保护具有重要意义。植被可以调节土壤的含水量,保持水土;可以反映和调节一个区域的气候变化;冠层防风、根部固沙,其保护对沙尘暴灾害、泥石流、滑坡及土地荒漠化等环境问题的解决提供了方向。遥感影像的植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)能够量化、直观地表示陆地生态系统情况,是评价和保护生态系统的重要参数。针对重庆市植被覆盖度的研究,可为其生态环境保护、治理和防灾减灾策略制定提供一定的理论依据。

学者们构建了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(synthesized enhanced vegetation index, EVI)等多种植被指数来研究植被相关情况^[2-6]。对于植被覆盖度的演变研究,李曦彤等^[7]、张志强等^[8]基于遥感技术进行了地表水源地和黄河流域的植被覆盖度时空变化研究。何宝忠等^[9]基于MODIS-NDVI数据通过斜率、变异系数等方法来对新疆和不同生态分区的现状和发展趋势稳定度进行分析,并用反向传播(back propagation, BP)人工神经网络来预测新疆2016—2020年的植被覆盖度的时空变化。Renne等^[10]采用(GIMMS)NDVI3g数据结合趋势线、残差计算、相关分析等方法研究了矿区开采前后植被覆盖度时空变化情况。关于植被覆盖度影响因子研究,张世文等^[11]研究了植被覆盖度与矿区建设的相关性。阿多等^[12]将NDVI预测值与真实值做差,用该差值分析人为因素对FVC的影响作用。徐焕^[13]结合主成分分析法(运用SPSS软件)分析各因子影响强度,判断主要影响因子。熊俊楠等^[14]研究了高程、坡度和坡向对植被覆盖度的影响情况。朱富林^[15]采取了更丰富的影响因素进行研究,包括气候、地形和人类活动三方面因素的分析。

综上,现有研究存在的不足有:一是植被演变驱动因子间交互作用探讨较少;二是植被在研究区内的适宜性区域分析不足。为此,基于像元二分模型计算植被覆盖度,结合一元回归模型、差值法和均值法^[16]分析重庆市2000—2015年长时序的植被覆盖度时空演变特征,采用地理探测器分析气温、降水、人口分布和国内生产总值(gross domestic product, GDP)因子对植被覆盖度的交互作用,并分析了研究区内植被生长的适宜性区域。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

重庆位于中国西南地区,105°11'E~110°11'E、

28°10'N~32°13'N,面积 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[17]。市内地形以长江水平面海拔最低,向周围扩散为山地,海拔越向外侧越高。海拔最高为2796.8 m,最低为73.1 m。西南部主城区海拔在168~400 m。市内东南部和东北部地势高,以丘陵和山地为主,西南部和中部地势稍低,且西南部为重庆市主城区的分布地带,城镇化率较其他区域更高。全年平均气温为16~18℃,年降水量达1000 mm以上^[18]。植被资源非常丰富,2019年重庆市森林覆盖率达到50.1%以上。重庆市植物资源丰富,整体绿化率较高,西部植被覆盖情况低于东部地区。

1.2 数据来源及处理

采用分辨率为250 m的2000、2005、2010、2015年每月MODIS-NDVI数据,对应年份的年平均气温数据和年平均降水量数据,以及1 km网格的人口空间分布和GDP空间分布数据。MODIS-NDVI数据来自美国地质调查局地球资源观察局和科学中心的宇航局。所有数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.Resdc.Cn/DataList1.aspx>)。

基于最大值合成法计算2000、2005、2010、2015年的年、季节NDVI,结合像元二分模型计算植被覆盖度。对植被覆盖度重分类,结合一元线性回归模型分析植被覆盖度时空演变特征。利用ArcGIS软件对气候数据和人类活动数据重分类,采样,导入地理探测器进行因子分析。

2 研究方法

2.1 像元二分模型

像元二分模型估算重庆市植被覆盖度基本原理:影像像元信息由全部被植被覆盖的信息和无植被覆盖的信息组成,其中植被所占比例即为该像元的植被覆盖度FVC,非植被比例为1-FVC。

采用MODIS-NDVI数据,结合现有研究,建立基于NDVI的植被覆盖度估算模型为

$$FVC = (NDVI_i - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (1)$$

式(1)中:FVC为植被覆盖度;NDVI_i为各栅格混合像元NDVI值;NDVI_{min}为无植被覆盖时NDVI最小值;NDVI_{max}为全部被植被覆盖NDVI最大值。NDVI_{max}和NDVI_{min}分别采用置信度为95%和5%来选取阈值,然后利用ArcGIS计算研究区的植被覆盖度。

根据《土壤侵蚀分级分类标准》(SL190—2007)对植被覆盖度进行分级,如表1所示。

2.2 均值法

采用4个年份的NDVI数据,以及4个驱动因

表1 植被覆盖度等级分类
Table 1 Vegetation coverage classification

等级	裸地 I	低覆盖度 II	中低覆盖度 III	中等覆盖度 IV	中高覆盖度 V	高覆盖度 VI
植被覆盖度	≤0.1	0.1~0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	0.6~0.75	≥0.75

子数据,基于均值法研究重庆市空间分布情况。利用均值法使分析过程更简单,其原理:利用多年数据综合求取平均值来代替多年植被覆盖度^[19]。

2.3 差值法

为更好地探究研究区植被覆盖度时空演变特征,将差值法公式代入 ArcGIS 栅格计算器工具,分析植被覆盖度在空间上的退化、保持和改善情况。差值法原理:利用后年数据减去前面年份数据,其差值代表每个栅格在相应时间段变化的数据^[20]。

2.4 一元线性回归模型

一元线性回归模型表示根据自变量时间与因变量植被覆盖度之间相关关系,建立方程,根据方程进行趋势分析及预测,其计算公式为

$$F = \frac{n \sum (if_i) - \left(\sum i\right) \left(\sum f_i\right)}{n \sum i^2 - \left(\sum i\right)^2} \quad (2)$$

式(2)中: F 为斜率; n 为总监测年数; f_i 为第*i*年植被覆盖度。斜率 F 反映重庆市多年植被覆盖度变化趋势,斜率为正,表明植被覆盖度随时间增加;斜率为负则相反,斜率绝对值越大变化越明显。

2.5 地理探测器

王劲峰等^[20]对地理探测器模型原理进行详细阐述。地理探测器可同时分析多因子对植被覆盖度影响力间交互关系。包括因子探测器探测 FVC 空间分异性以及因子解释力;风险探测器探测因子与植被覆盖度是否具有风险性,计算因子在子区域的植被覆盖度的平均值,并且进行统计显著性检验,根据均值和统计性检测两者结合分析植被覆盖适宜性区域;生态探测器用来比较不同因子对子区域植被覆盖度分布的影响力大小;交互作用探测器根据单因子作用时因子交互作用强度数值(PD 值)和双因子共同作用时 PD 值的大小,若前者大于后者则减弱影响力,反之则增强^[21]。

3 结果分析

3.1 植被覆盖度时间演变特征

3.1.1 年际变化特征

基于像元二分模型计算 FVC 值,并在 ArcGIS 中重分类。采用均值法分别计算重庆市 2000—

2015 年植被覆盖度平均值,结果如图 1 所示;统计各等级植被覆盖度面积百分比结果如图 2 所示;结合一元线性回归模型,计算各等级植被覆盖度随年份变化方程,结果如表 2 表示。

结合图 1、图 2 分析,重庆市 2005 年后植被覆盖度均值增加;2000—2015 年中高植被覆盖度面积占比最大,占比第 2 为高覆盖度,第 3 为中等覆盖度,中低覆盖度第 4,低覆盖度第 5,裸地最低。结合一元线性回归模型分析,各等级植被覆盖度

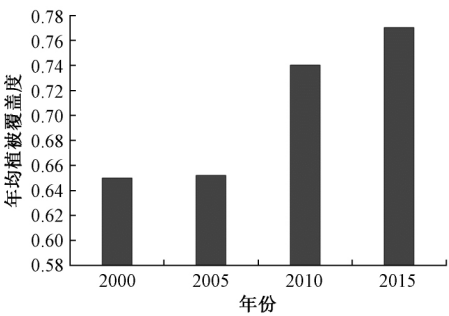


图1 2000—2015 年重庆植被覆盖度年平均占比
Fig. 1 The annual value of FVC in Chongqing from 2000 to 2015

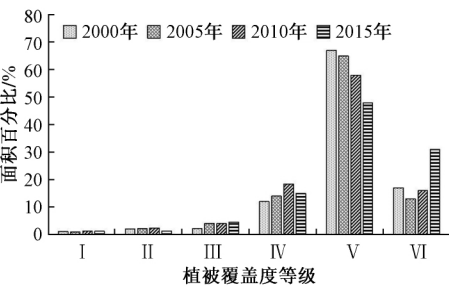


图2 2000—2015 年重庆市各级植被覆盖面积占比
Fig. 2 The proportion of vegetation coverage at all levels in Chongqing from 2000 to 2015

表2 2000—2015 年重庆市植被覆盖度变化趋势方程
Table 2 Change trend equation of vegetation coverage in Chongqing from 2000 to 2015

等级	趋势线方程	R^2
裸地	$y = 0.0004x - 0.7727$	0.01
低覆盖度	$y = 0.0015x - 2.7195$	0.01
中低覆盖度	$y = 0.1068x - 212.85$	0.88
中等覆盖度	$y = 0.3017x - 590.8$	0.93
中高覆盖度	$y = -2.1174x + 4310.9$	0.77
高覆盖度	$y = 1.7069x - 3403.8$	0.57

注: y 为植被覆盖度值; x 为植被覆盖度具体年份; R^2 为植被覆盖度值,可反映趋势明显程度。

2000—2015 年植被覆盖度年际变化特征,如表 2 所示。根据表 2 分析可知,裸地和低覆盖度回归方程系数为正,但小于 0.001,裸地和低覆盖度略有增加的趋势但不明显;中低覆盖度、中等覆盖度和高覆盖度回归方程系数都为正,2000—2015 年重庆市中低覆盖度、中等覆盖度和高覆盖度面呈增加趋势;中高覆盖度回归方程系数为负,面积呈减少趋势。

3.1.2 季节变化特征

采用均值法分别计算重庆市 2000—2015 年四季植被覆盖度平均值,结果如图 3 所示;分别对四季 FVC 均值进行重分类,统计四季各等级植被覆盖度面积百分比,结果如图 4 所示。根据图 3 分析可知,重庆市植被覆盖度春季为 0.69、夏季为 0.82、秋季为 0.57、冬季为 0.51。随着季节的更替,研究区内落叶植被春季新生冬季凋零,春季新生到夏季最旺盛,秋季开始落叶,植被覆盖度到冬季最低。研究区植被覆盖度从春季到夏季增加,夏季到冬季呈减少趋势。分析图 4 可知,研究区树木春季到夏季越来越繁茂,夏季到秋季再到冬季,树木凋零,低覆盖度、中低覆盖度和中等覆盖度都呈先减少后增加的趋势,中高覆盖度春季到夏季减少,夏季到秋季增多,秋季到冬季再减少,高覆盖度随季节演变趋势为先增加后减少的趋势。

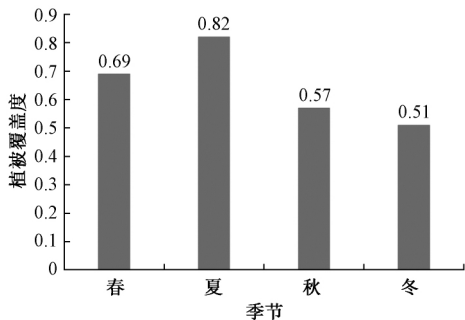


图 3 2000—2015 年重庆市植被覆盖度各个季节均值
Fig. 3 The mean value of FVC in each season in Chongqing from 2000 to 2015

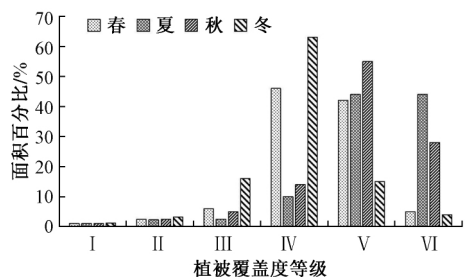


图 4 2000—2015 年重庆市各级植被覆盖度季节分布
Fig. 4 Seasonal distribution of vegetation coverage at all levels in Chongqing from 2000 to 2015

3.2 植被覆盖度空间演变特征

3.2.1 植被覆盖度空间分布

在 ArcGIS 中采用均值法计算 2000—2015 年植被覆盖度平均值结果如图 5 所示。可以看出,植被覆盖度在重庆市不同空间位置具有不同的特征:重庆市植被覆盖度在整体空间分布上具有东部地区植被覆盖度高于西部地区的特点;重庆市主城区分布的西南部地区,植被覆盖度最低。

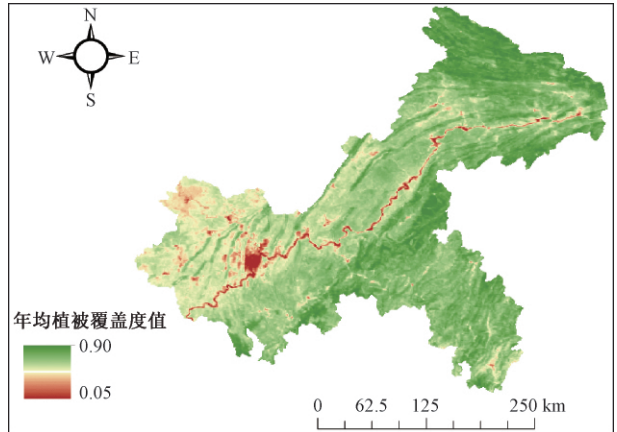


图 5 2000—2015 年重庆市年平均植被覆盖度空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of annual average vegetation coverage in Chongqing from 2000 to 2015

3.2.2 空间变化特征

结合重庆市植被覆盖度栅格数据,差值运算提取重庆市在 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2000—2015 年 4 个时间段的植被覆盖度变化情况。根据差值运算结果,将变化程度分为 5 级,结果小于 -0.3 为中度退化,轻度退化为 -0.3 ~ -0.1,保持不变为 -0.1 ~ 0.1,轻度改善为 0.1 ~ 0.3,中度改善为大于 0.3^[22-23]。对各等级变化面积百分比进行统计,结果如表 3 所示,植被变化空间分布如图 6 所示。

结合表 3 和图 6 分析可知,2000—2005 年重庆市退化面积占比 2.73%,改善面积占比 8.01%,植被覆盖度趋于改善,退化主要分布在合川、璧山、丰都、忠县、主城区等地区,改善主要分布于秀山、江

表 3 植被覆盖度各变化等级面积占比统计
Table 3 Statistics of the proportion of each change grade of vegetation coverage

年份	I 中度退化面积 / %	II 轻度退化面积 / %	III 保持不变面积 / %	IV 轻度改善面积 / %	V 中度改善面积 / %
2000—2005	0.01	2.72	89.27	7.96	0.03
2005—2010	0.01	3.35	81.12	15.50	0.03
2010—2015	0.10	6.19	53.47	40.04	0.21
2000—2015	0.89	2.79	41.96	53.86	0.37

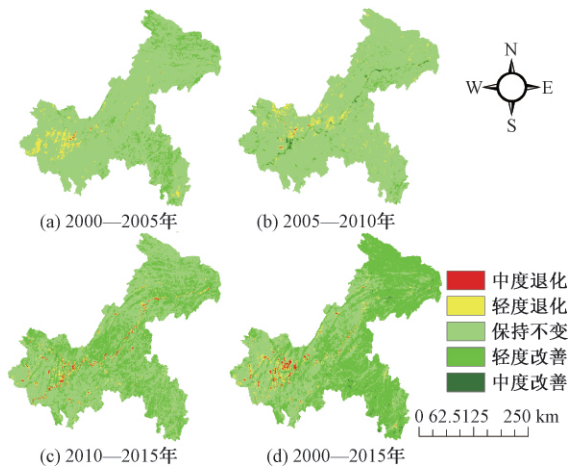


图6 2000—2015年重庆市植被覆盖度变化空间分布
Fig.6 Spacial distribution of vegetation in Chongqing from 2000 to 2015

津、荣昌、石柱、黔江等地区; 2005—2010 年研究区退化面积占比 3.36%, 改善的为 15.53%, 退化发生在垫江、涪陵、江津、永川、荣昌、大足、主城区等研究区西南部地区, 改善主要发生在重庆市东部地区以及东南部南川、渝北、北碚等地区; 2010—2015 年研究区退化面积占比 6.28%, 改善面积占比 40.25%, 退化发生在重庆西南部地区、长江沿岸地区以及中部垫江、长寿、涪陵等地区, 改善主要发生在重庆市东南部和中部偏北。

研究区内, 对比 4 个时间段, 植被整体上有明显变化。时间段 2000—2015 年为整个研究时间段, 植被退化面积占比约为 3.68%, 保持不变的约为 41.96%, 植被改善的面积占比约为 54.23%。退化发生在主城区、黔江、酉阳等地区, 改善区域均匀分布于整个主城区。植被总变化情况为: 改善的面积比退化的面积大。植被退化原因主要是重庆 2000—2015 年城镇化发展加速以及各种自然灾害的发生, 改善原因是 1999 年重庆开始实施退耕还林政策, 总体分析, 重庆市在 2000—2015 年植被覆盖趋于改善。

3.3 植被覆盖度影响因子分析

利用 ArcGIS 软件, 结合自然断点法对降雨量、气温、人口和 GDP 因子划分为 6 个等级分区, 用整数 1~6 表示。GDP 划分为 5 个分区, 用整数 1~5 表示, 数字越大降水量越多、气温越高、人口密度和越大, 划分结果如表 4 所示。

3.3.1 因子作用强度

根据因子探测器计算所得的影响力评价系数 q (表 5) 来分析作用与否, 根据 q 值的相对大小来进行驱动因子对植被覆盖度影响力的排序; 用精度检验系数 P (表 5) 检测精度。生态探测器计算结果如表 6 所示。

表 4 因子等级分区

Table 4 Factors level partition

等级	降水量/ mm	气温/ ℃	人口/ (人·km ⁻²)	GDP/ (万元·km ⁻²)
1	1 019.1 ~	5.0 ~	22.7 ~	17.0 ~
	1 130.5	10.2	211.5	2 947.7
2	1 130.5 ~	10.2 ~	211.5 ~	2 947.7 ~
	1 188.4	12.6	1 155.7	9 785.7
3	1 188.4 ~	12.6 ~	1 155.7 ~	9 785.7 ~
	1 246.2	14.3	2 855.0	18 577.4
4	1 246.2 ~	14.3 ~	2 855.0 ~	18 577.4 ~
	1 306.2	15.9	5 309.7	206 134.0
5	1 306.2 ~	15.9 ~	5 309.7 ~	206 134.0 ~
	1 383.3	17.4	15 505.9	250 092.6
6	1 383.3 ~	17.4 ~	15 505.9 ~	—
	1 567.6	19.7	48 360.3	

表 5 因子探测器输出结果

Table 5 Factor detector output results

指标	降水量 X_1	气温 X_2	人口 X_3	GDP X_4
q	0.42	0.54	0.39	0.11
P	0	0	0	0

表 6 生态探测器输出结果

Table 6 Eco detector output results

指标	降水量	气温	人口	GDP
降水量				
气温	Y			
人口分布	N	N		
GDP	N	N	N	

注: Y 表示行列之间有显著性差异; N 表示无显著性差异。

据表 5、表 6 分析, 各因子对植被覆盖度影响程度排序为: 气温 > 降水量 > 人口密度 > GDP。气温 q 值最大, 高于 50%。降水量影响力大于 40%, 人口密度的影响力高于 35%, 由此可见, 气温、降水量和人口密度等因素对植被覆盖度的影响较大。GDP 影响力只达到了 10% 左右, 该因子对植被覆盖度的影响力相对较小。气候因子中气温因子和降水量因子间有显著性影响。人类活动因子中人口密度和 GDP 之间无显著性影响。而气候因子与人类活动因子间也没有显著性影响。进一步说明, 气温和降水量对植被生长影响作用大, 可将气温和降水量作为指示因子。

3.3.2 植被覆盖度适宜性区域分析

风险探测器输出结果如表 7 所示。根据植被覆盖度均值对降水量分区进行排序, $6 > 5 > 4 > 3 > 2 > 1$, 植被覆盖度与降水量变化呈正相关。年均降水量等级 6 (1 383.3 ~ 1 567.6 mm) 区域内植被覆盖度最高, 植被生长情况最好。植被覆盖度与气温、人口密度和 GDP 在研究区内呈负相关, 均在 1 等级分区内 5.0 ~ 10.2 ℃、22.7 ~ 211.5 人 / km² 和 17.0 万 ~ 2 947.7 万元 / km² 植被覆盖度最高。

表7 植被覆盖度在各因子各分区的值
Table 7 The value of vegetation coverage in each zone of each factor

	1	2	3	4	5	6
降水量分区	0.54	0.62	0.66	0.69	0.73	0.78
气温分区	0.79	0.78	0.74	0.70	0.65	0.57
人口密度分区	0.71	0.61	0.45	0.23	0.11	0.56
GDP分区	0.65	0.46	0.27	0.12	0.56	

3.3.3 因子之间的交互作用

植被覆盖度往往是受多种因素共同作用而发生变化,不同的因素对其产生不同程度的影响,用交互探测器来探究两两因素共同作用对植被覆盖度的影响力变化以及影响方向的变化,探测结果如表8所示。

由表8分析可知,气温、降水量、人口和GDP因子两两共同作用时的PD值大于它们分别独自作用时PD值。因此,人口密度和GDP因子增强了气温对植被覆盖度的影响力,也增强了降水量对植被覆盖度的影响力,气温和降水共同作用时、人口和GDP共同作用时影响力增强,进一步说明,气候因子与人类活动因子共同作用下,植被覆盖度受到的影响力度更大。

表8 因子探测器输出结果

Table 8 Factor detector output results

$x \cap y$	PD(x)	PD(y)	PD($x \cap y$)	交互作用
气温 $\cap$ 降水	0.54	0.42	0.59	双协同作用
气温 $\cap$ 人口	0.54	0.38	0.63	双协同作用
气温 $\cap$ GDP	0.54	0.11	0.59	双协同作用
降水量 $\cap$ 人口	0.42	0.38	0.56	双协同作用
降水量 $\cap$ GDP	0.42	0.11	0.47	双协同作用
人口 $\cap$ GDP	0.38	0.11	0.39	双协同作用

注: x 表示“ $\cap$ ”符号左侧的因子单独作用强度; y 表示“ $\cap$ ”符号右侧的因子单独作用强度; $x \cap y$ 表示“ $\cap$ ”两侧因子交互作用强度。

4 讨论

利用MODIS-NDVI数据估算重庆市2000—2015年、季植被覆盖度,并对结果进行分级。结合一元线性回归模型、均值法,分析重庆市植被覆盖度年际、季节时空演变特征。研究发现,重庆市西南地区植被覆盖度较其他地区低,且由于2000—2015年主城区城镇化发展迅速,其植被覆盖度最低。以上特征与张艳军等^[23]、叶勤玉等^[24]、李益敏等^[25]的研究结果相同。基于此,结合差值法,以5年为间隔用植被覆盖度栅格数据作差,差值正负分别对应改善和退化。根据差值结果分析,重庆市植被覆盖度主要退化区域发生在西南地区,这也进一步证明了西南部地区由于城镇化发展而植被覆

盖度较其他区域低的结论。

从2000—2015年总体上分析,1999年国家大力推行退耕还林政策^[26]以来,研究区内植被改善面积明显多于退化面积,重庆市植被覆盖情况总体趋于改善。此前,已有许多学者对重庆市植被覆盖度影响因子的影响机制进行了探究,现有研究具有一定的因子多样性,但是大多基于相关分析法分析FVC与因子之间的相关关系,对因子的交互作用探究较少。考虑到在一个生态系统中,植被覆盖度的变化不止受单因子的影响,而相关分析法在分析因子交互作用上具有一定的局限性和复杂性,采用新手段地理探测器对植被覆盖度的影响因子进行探究。为在一定程度上弥补当前研究的不足,不仅利用地理探测器分析植被覆盖度与各因子间的相关性,还估算了植被在重庆市的适宜性区域,以及探究了多因子共同作用对植被覆盖度的影响机制。对于泥石流、滑坡等自然灾害频发的重庆,研究结论可为生态环境的治理和改善提供一定的理论依据,具有一定的研究意义。但从数据本身以及影响因子的种类层面考虑,尚有进一步改善之处:一是采用了MODIS-NDVI数据来进行植被覆盖度的研究,由于NDVI对于高植被覆盖度地区的敏感性低于EVI,所以对于其他遥感数据的利用有待加强;二是植被的生长受多种自然因素和人为因素的影响,只对气温、降水量、人口分布和GDP这4个影响因子进行了研究,今后的研究可以考虑探究更多可能的影响因子。

5 结论

对重庆市2000—2015年植被覆盖度的时空演变特征进行研究,并利用地理探测器模型研究了气候因子(气温、降水量)和人为因子(人口分布、GDP)对植被覆盖度的影响情况,得出如下结论。

(1)在2000—2015年间,重庆市裸地、低植被覆盖度、中低植被覆盖度面积呈增加趋势;中等植被覆盖度和高植被覆盖度面积增大。重庆市属于亚热带常绿落叶阔叶林区,包含落叶阔叶林区,随着四季气候的变化,植被覆盖度从春季到夏季增加,夏季到冬季呈减少趋势;春季以中等植被覆盖度为主,夏季以高等植被覆盖度为主,秋季植被覆盖度以中高植被覆盖度为主,冬季则以中等植被覆盖度为主。

(2)结合植被覆盖度空间分布图分析,植被覆盖度在整体空间分布上具有东部地区植被覆盖度高于西部地区的特点。重庆市植被覆盖度改善面积远远大于退化面积,植被覆盖度情况总体趋于

改善。

(3) 根据因子探测器结果分析,研究区气温、降水量、人口分布、GDP 因子对植被覆盖度影响的影响力强度排序为:气温>降水量>人口密度>GDP。研究区气温因子和降水量因子之间有显著性影响,人类活动因子中人口密度和 GDP 之间无显著性影响,而气候因子与人类活动因子间也没有显著性影响,进一步表明气温、降水量和人口密度对研究区植被覆盖度的解释力大,而 GDP 对研究区植被覆盖度的解释力小。利用风险探测器研究重庆市植被覆盖度适宜性区域,在年均降水量等级为 1 383.3 ~ 1 567.6 mm、气温分区为 5.0 ~ 10.2 °C、人口分区为 22.7 ~ 211.5 人/km²和年均 GDP 为 17 万 ~ 2 947.7 万元/km²时值最大,植被覆盖最好,即植被覆盖适宜性区域在上述地区。因子交互探测器研究结果表明,影响因子(人口密度、GDP、气温和降水量)之间共同作用,均对植被覆盖度影响力起到了增强的作用。

参 考 文 献

- [1] 杜 刚. 基于 EOS/MODIS 的植被指数监测模型研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
Du Gang. Study and application of vegetation index monitoring model based on EOS/MODIS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [2] 洪 艳, 赵银兵, 王运生, 等. 基于 MODIS-NDVI 汶川震中区域十年后植被恢复的时空变化特征分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 64-74.
Hong Yan, Zhao Yinbing, Wang Yunsheng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation restoration based on MODIS-NDVI Wenchuan earthquake region in ten years [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 64-74.
- [3] 贾博中, 白燕英, 魏占民, 等. 基于 MODIS-EVI 的内蒙古沿黄平原区作物种植结构分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 114-120.
Jia Bozhong, Bai Yanying, Wei Zhanmin, et al. Analysis of crop planting structure along the Yellow Plain in Inner Mongolia based on MODIS-EVI [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 114-120.
- [4] 陈 亮, 王学雷, 杨 超, 等. 2000—2018 年鄂西山区植被 EVI 时空变化特征及其地形效应[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 419-426.
Chen Liang, Wang Xuelei, Yang Chao, et al. Spatiotemporal variation of EVI and its topographical effects in the mountainous region of western Hubei 2000—2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(2): 419-426.
- [5] 罗琳玲, 易桂花, 张廷斌, 等. 内蒙古植被长势变化及其对气候变化的响应[J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 126-134.
Luo Linling, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Changes of vegetation growth and its response to climate change in inner mongolia [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(5): 126-134.
- [6] 白燕英, 高聚林, 张宝林. 基于 NDVI 与 EVI 的作物长势监测研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 373-384.
Bai Yanying, Gao Julin, Zhang Baolin. Study on crop growth monitoring based on NDVI and EVI [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 373-384.
- [7] 李曦彤, 苗正红, 何龙涛, 等. 基于遥感技术的地表水源地植被覆盖度的动态变化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2155-2160.
Li Xitong, Miao Zhenghong, He Longtao, et al. Dynamic change of vegetation coverage of surface water source based on remote sensing technology [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2155-2160.
- [8] 张志强, 刘 欢, 左其亭, 等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849-858.
Zhang Zhiqiang, Liu Huan, Zuo Qiting, et al. Spatio-temporal variation of vegetation coverage in the Yellow River Basin from 2000 to 2019 [J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849-858.
- [9] 何宝忠, 丁建丽, 张 喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1984-1966.
He Baozhong, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1984-1966.
- [10] Renne R R, Schlaepfer D R, Palmquist K A, et al. Soil and stand structure explain shrub mortality patterns following global change-type drought and extreme precipitation [J]. Ecology, 2019, 22(12): 82-89.
- [11] 张世文, 宁汇荣, 许大亮, 等. 草原区露天煤矿植被覆盖度时空演变与驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 233-241.
Zhang Shiwen, Ning Huirong, Xu Daliang, et al. Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of vegetation fraction for opencast coal mine in grassland area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 233-241.
- [12] 阿 多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
A Duo, Zhao Wenji, Gong Zhaoning, et al. Spatio-temporal change of climate and its effect on vegetation coverage in north China Plain, 1981—2013 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 576-592.
- [13] 徐 焕. 黄土高原植被覆盖时空变化的遥感监测及其驱动力分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
Xu Huan. Remote sensing monitoring of spatial and temporal variations of some random place somewhere vegetation cover and analysis of its driving forces [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [14] 熊俊楠, 彭 超, 程维明, 等. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1830-1840.
Xiong Junnan, Peng Chao, Cheng Weiming, et al. Change analysis of vegetation coverage in Yunnan Province based on MODIS-NDVI [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1830-1840.
- [15] 朱林富. 基于 MODIS 数据的植被覆盖度时空变化及石漠化监测研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
Zhu Linfu. Spatio-temporal change of vegetation coverage and mo-

- monitoring of rocky desertification based on MODIS data[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [16] 朱林富, 谢世友, 杨 华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.
- Zhu Linfu, Xie Shiyu, Yang Hua, et al. Topographic effect of vegetation cover change in Chongqing based on MODIS-EVI[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 2023-2033.
- [17] 刘兴钰. 近 20 年重庆气候变化及 NDVI 的响应研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2019.
- Liu Xingyu. Study on climate change and NDVI response in Chongqing in recent 20 years[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2019.
- [18] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 等. 沁河流域植被覆盖时空分异特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1093-1103.
- Yuan Lijuan, Bi Rutian, Xu Lishuai, et al. Spatio-temporal variability of vegetation cover in the Qin River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 1093-1103.
- [19] 程 杰, 杨亮彦, 黎雅楠. 2000—2018 年陕北地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 111-119.
- Cheng Jie, Yang Liangyan, Li Yanan. Spatiotemporal variation in NDVI and its response to hydrothermal change from 2000 to 2018 in northern Shaanxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 111-119.
- [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.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and perspective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [21] 王泽辉. 九江市植被覆盖时空动态变化及其驱动因子分析[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- Wang Zehui. Spatio-temporal dynamics of vegetation cover in Jiujiang and its driving forces[D]. Chengdu: Sichuan Normal College, 2017.
- [22] 庞 静. 基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- Pang Jing. Effects of natural and man-made factors on vegetation change based on a geo-probe model[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.
- [23] 张艳军, 李振亮. 重庆市 2000—2015 年植被覆盖度时空变化特征[J]. 环境影响评价, 2016, 38(4): 57-60.
- Zhang Yanjun, Li Zhenliang. Spatio-temporal variation characteristics of Fractional vegetation coverage in Chongqing from 2000 to 2015[J]. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(4): 57-60.
- [24] 叶勤玉, 高阳华, 杨世琦, 等. 基于 MODIS 数据的重庆市植被覆盖度时空变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 32(2): 53-58.
- Ye Qinyu, Gao Yanghua, Yang Shiqi, et al. Spatial and temporal fractional vegetation coverage variations in Chongqing based on MODIS data[J]. Plateau Mountain Meteorology Research, 2016, 32(2): 53-58.
- [25] 李益敏, 王东驰, 袁 静, 等. 退耕还林背景下泸州市生态环境质量遥感动态变化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 266-274.
- Li Yimin, Wang Dongchi, Yuan Jing, et al. Remote sensing evaluation of ecological environment quality in Lushui City under the influence of the conversion of cropland to forest project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 266-274.
- [26] 朱林富, 谢世友, 杨 华, 等. 基于 MODIS-EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6992-7002.
- Zhu Linfu, Xie Shiyu, Yang Hua, et al. Study on the spatial-temporal variability of vegetation coverage based on MODIS-EVI in Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): 6992-7002.