DOI: 10.5846/stxb202105031151
祁鹏卫,张贤.2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素.生态学报,2022,42(13):5427-5436.
Qi P W, Zhang X.Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019.Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5427-5436.

2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素

祁鹏卫[1,*],张 贤[2]

1 四川省林业和草原调查规划院, 成都 610081
2 中国地震局成都青藏高原地震研究所(中国地震科学实验场成都基地), 成都 610041

摘要:基于 MODIS-NDVI 数据、气象数据、地形数据和人类活动数据,采用趋势分析等方法,应用地理探测器模型,全面分析 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征,并探究各地理因子及其交互作用对重庆市植被覆盖的影响程度与作用机制。研究发现:(1)2000—2019 年,重庆市植被覆盖整体呈波动上升趋势,增长率为 4.4%/10a,NDVI 偏差值呈先减小后增加趋势。(2)2000—2019 年,重庆市植被覆盖高值区主要分布于渝东北和渝东南,低值区则主要分布于三峡库区消落带及渝西、主城地区;植被覆盖空间格局在东西方向上由“一字型”向“斜线型”演化,南北方向上由“浅 U 型”向“深 U 型”演化。(3)2000—2019 年,各地理因子对重庆市植被覆盖空间分异性解释力大小依次为:年均温(0.3459)>高程(0.3281)>年均降水量(0.2305)>人类活动强度指数(0.1747)>坡度(0.1008)>总辐射(0.0552)>坡向(0.0034);年均温、坡向、人类活动强度指数解释力总体呈增加趋势,年均降水量、总辐射、高程、坡度解释力总体呈减小趋势。(4)2000—2019 年,各地理因子对重庆市植被覆盖变化存在交互作用,且呈双因子增强和非线性增强两种类型,而不存在相互独立作用或对植被覆盖变化解释力减弱的交互因子。

关键词:植被覆盖;时空变化;驱动因素;地理探测器;重庆市

Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019

QI Pengwei[1,*], ZHANG Xian[2]

1 *Sichuan Forestry and Grassland Inventory and Planning Institute*, *Chengdu* 610081, *China*
2 *Chengdu Institute of the Tibetan Plateau Earthquake Research*, *China Earthquake Administration* (*Chengdu Base of China Seismic Experimental Site*), *Chengdu* 610041, *China*

Abstract: Based on MODIS-NDVI data, meteorological data, terrain data and human activity data, using trend analysis and other methods, the spatial-temporal change characteristics of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019 were comprehensively analyzed by using geographic detector model. The influence degree and mechanism of each geographical factor and its interaction on vegetation cover in Chongqing were explored. The study finds that from 2000 to 2019: (1) The overall vegetation cover in Chongqing showed a fluctuating upward trend, with a growth rate of 4.4%/10A. The deviation value of NDVI first decreased and then increased. The change characteristics of vegetation cover were obvious and showed three stages. In the early stage, the average annual value of NDVI showed a downward trend; In the medium term, the average annual value of NDVI shows a slight growth trend; In the later stage, the average annual value of NDVI showed a rapid growth trend. (2) The vegetation cover in Chongqing is in the spatial distribution pattern of high in the East and low

基金项目:国家社会科学基金项目(19XGL027)
收稿日期:2021-05-03; **网络出版日期**:2022-03-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cqqipengwei@163.com

in the west. The high value areas are mainly distributed in the continuous area of Daba Mountains in Northeast Chongqing and the edge area of Wuling Mountain in Southeast Chongqing; Low value areas are mainly distributed in the fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir area, Western Chongqing and the main urban areas. The spatial pattern of vegetation cover evolves from one-sided to diagonal in the east-west direction and from shallow U to deep U in the north-south direction, but the high-low concentration pattern of vegetation cover is basically stable. (3) The explanatory power of various geographical factors on the spatial differentiation of vegetation cover in Chongqing is as follows: annual average temperature (0.3459)>elevation (0.3281)>annual precipitation (0.2305)>human activity intensity index (0.1747)>slope (0.1008)>total radiation (0.0552)>slope direction (0.0034); the explanatory power of annual average temperature, slope direction and human activity intensity index generally increases, and the explanatory power of annual average precipitation, total radiation, elevation and slope generally decreases. (4) Each geographical factor interacted with vegetation cover change in Chongqing, and showed two types of double factor enhancement and nonlinear enhancement, but there was no interaction factor that interacted independently or weakened the explanatory power of vegetation cover change. The first dominant interactive factor of vegetation cover change in Chongqing is annual mean temperature and human activity intensity index, the second dominant interactive factor is elevation and human activity intensity index, and the third dominant interactive factor is annual mean temperature and total radiation.

Key Words: vegetation coverage; spatiotemporal variation; driving factors; Geodetector; Chongqing municipality

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,具有维持区域生态平衡,促进全球物质循环和能量流动等作用,其覆盖变化对区域生态环境状况具有重要指示意义[1—3]。而归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index,NDVI)作为监测区域植被和生态环境变化的最佳指示因子[4—5],其数值可定量反映植被生长状况、植被生物量等信息,因此在植被覆盖变化研究中得到广泛应用[6—7]。重庆市地处我国西南山地,具有差异明显的环境梯度和高度异质化的自然生境[8],是植被对环境变化极为敏感的区域。同时,重庆市大部位于三峡库区腹心地带,覆盖三峡库区 85.6%的区域,是长江上游重要的生态屏障。因此,全面评价重庆市植被覆盖时空变化特征,研究其与气候、地形、人类活动等因素各因子之间的作用机制,对掌握近年来重庆市乃至整个西南山地植被生长状况,认识区域生态环境变化,进而揭示陆地生态系统演变规律等具有重要意义。

目前,已有学者基于不同区域数据,采用不同方法对植被覆盖变化及其驱动因素进行了大量研究。其中,国外学者 Park 等[9]对 1997—2006 年北纬 50°以南的东亚地区植被覆盖进行了研究,认为降水是影响植被覆盖变化的主要因子;Tucker 等[10]通过对 1982—1999 年北半球中纬度地区植被覆盖的研究,指出植被覆盖变化与气温密切相关;Piao 等[2]通过对整个欧亚大陆长时间序列植被覆盖变化的研究,发现气温和降水对植被覆盖变化具有交叉作用。国内学者栾金凯等[11]利用多元回归方法分析了陕西榆林地区植被覆盖变化,认为气象因素对植被生长与演化具有较强促进作用;张亮等[12]基于偏相关分析法研究了长江流域植被覆盖与气象因子的相关性,发现长江流域植被覆盖与气温的相关性较高;王建邦[7]等运用趋势分析法研究了人为因素对中国植被覆盖的影响,认为中国植被覆盖与人类活动整体呈负相关性。具体到重庆地区,李学梅[13]、朱林富[14]、李惠敏[15]等同国内其他学者类似,主要通过回归分析、趋势分析和相关分析等方法,探讨了气温、降水、地形等因素对重庆植被覆盖变化的影响。

综上,目前研究植被覆盖变化及其驱动因素的成果已较为丰富[16—18],但主要集中在分析气候、地形等自然因子对植被覆盖变化的影响上,探讨人类活动强度等人为因子对植被覆盖变化影响的则较少,而综合研究气候、地形、人类活动等因素对植被覆盖变化驱动机制的则更少。鉴于此,本研究基于 MODIS-NDVI 数据、气候数据、地形数据和人类活动数据,采用趋势分析等方法,应用地理探测器模型[19—20],全面分析 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征,并探究各地理因子及其交互作用对重庆市植被覆盖的影响程度与作用机制,以期为重庆市及西南山地区域植被恢复、生态系统保护、生态文明建设等提供一定参考。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

重庆市地处青藏高原与长江中下游平原的过渡地带,地理范围为 105°11′—110°11′E、28°10′—32°13′N,幅员面积 8.24×10^{4}km^2(图 1)。地形复杂多样,以丘陵、山地为主,地势起伏大,有大巴山、巫山、武陵山、大娄山等山脉绵延境内。气候地域差异较大,且立体气候明显,年均温 13—19℃,年降水量 914—1844mm,年日照时数 1000—1400h,年均相对湿度高达 70%,具有冬暖春早,夏热秋迟,无霜期长等特点。境内江河纵横,地表水资源丰富,主要有长江、嘉陵江、乌江等,其中长江干流自西向东横贯全境,流程长达 665km。土壤类型多样,以紫色土、冲积土和水稻土为主。植被资源丰富,类型多样,2019 年全市森林覆盖率达 50.1%。

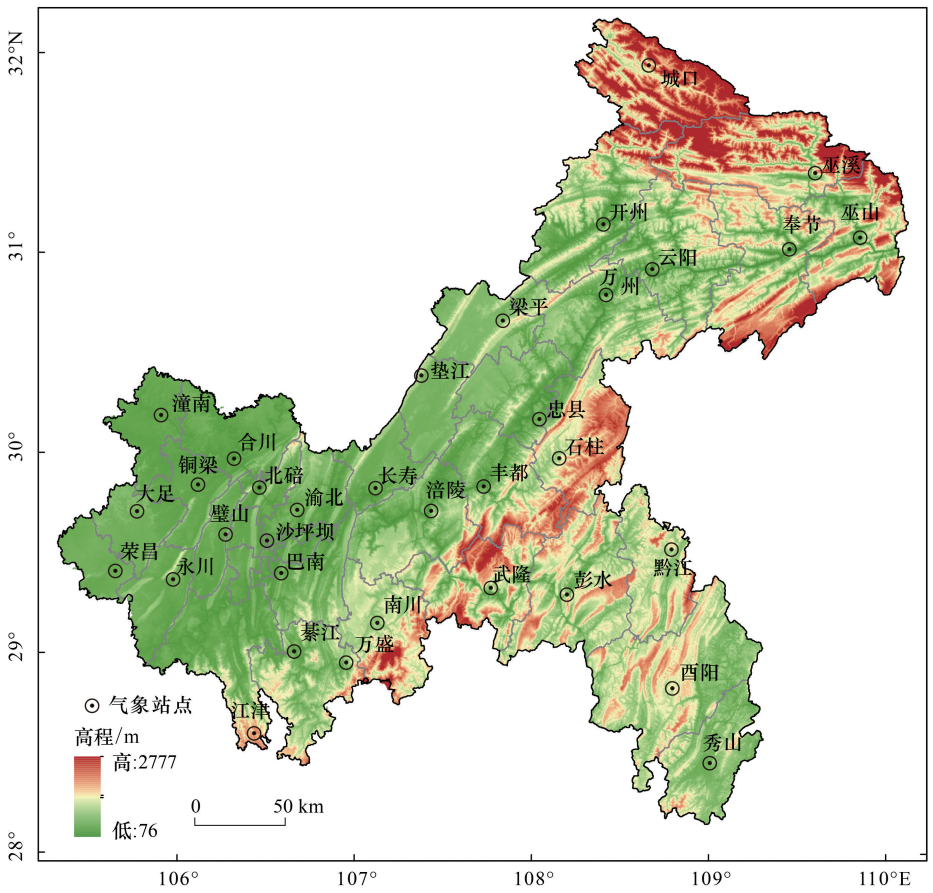

图 1　重庆市地理位置及气象站点分布图

Fig.1　Geographical location and distribution map of meteorological stations in Chongqing

1.2　数据来源

MODIS NDVI 数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS)提供的 MOD13A3 产品(http://glovis.usgs.gov/),空间分辨率为 1km×1km,时间分辨率为 30d。该产品经过几何纠正、辐射校正、大气校正等预处理;然后使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具进行投影和拼接,经裁剪得到重庆市 NDVI 数据集;为进一步消除异常值的影响,采用最大值合成法(Maximum Value Composites,MVC)[21] 合成月 NDVI 数据,最终得到 2000—2019 年重庆市年 NDVI 数据。

气象数据包括气温、降水量和太阳辐射,均来源于国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)。其中气温、降水量通过逐站点统计重庆 34 个气象站点的日平均气温和日降水量,最终得到年平均气温和年降水量数据;

太阳辐射数据由于重庆地区的太阳辐射实测站点较少,为提高数据精度,利用目前模拟精度较高且应用广泛的 Angstrom 模型及日照时数数据,模拟得到 34 个气象站点的年太阳辐射数据[22]。最后,利用 ANUSPLIN 气象插值软件的平滑样条函数对气温、降水量和太阳辐射数据进行空间插值[23],得到重庆市各气象因子栅格数据。

地形数据包括高程、坡度和坡向,其中高程数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),而坡度、坡向数据则基于高程数据通过 ArcGIS10.6 的 Spatial Analyst 工具计算得到。

人类活动强度指数(Human Activity Intensity of Land Surface,HAILS)数据借鉴徐勇[24]等学者构建的数学模型,通过重庆市土地利用数据计算得到,其中重庆市土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)。本研究中栅格数据空间分辨率均为 1km,其投影方式与 NDVI 数据一致。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

在植被覆盖时空变化分析中,为研究重庆市 2000—2019 年植被覆盖变化趋势,采用一元线性回归模型,将 NDVI 与时间序列做回归分析[25—26],计算公式如下:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (i \times \mathrm{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} \mathrm{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2} \tag{1}$$

式中,θ 为 NDVI 在多年时间序列上变化趋势的斜率,n 为时间序列的年数,NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值。若 θ 为正则说明植被覆盖随时间序列呈增加趋势,反之呈减少趋势;并且 θ 数值的绝对值越大,表明植被覆盖状况变化越明显。

1.3.2 偏差分析

为进一步研究重庆市植被覆盖在 2000—2019 年间相对变化(波动)程度,通过偏差分析计算各年份 NDVI 偏离多年 NDVI 均值的大小,以反映研究时段内植被覆盖的稳定性[27],计算公式如下:

$$D_i = \mathrm{NDVI}_i - \overline{\mathrm{NDVI}_n} \tag{2}$$

式中,D_i 表示第 i 年 NDVI 的偏差值,NDVI_i 为第 i 年 NDVI 值,$\overline{\mathrm{NDVI}_n}$ 为 n 年 NDVI 平均值。若 D_i 为正则说明第 i 年植被覆盖较多年均值高,反之则低;并且 D_i 数值的绝对值越大,说明偏离平均水平程度越大;同时,通过分析连续多年 NDVI 偏差值,可在一定程度上反映区域生态系统的稳定度。

1.3.3 地理探测器

在植被覆盖变化驱动因素分析中,为定量研究气候、地形、人类活动等不同因素各地理因子(表 1)及其交互作用对植被覆盖变化的影响程度与作用机制,本研究应用地理探测器模型[19—20]中的因子探测模块和交互探测模块,对各单因子作用强度及双因子交互作用强度进行探测。

其中,因子探测主要用来探测 NDVI 的空间分异性和不同地理因子对 NDVI 空间分异性的解释程度,其解释力大小用 q 值衡量,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{3}$$

式中,q 为地理因子对 NDVI 的解释力,值域为[0,1],值越大表示地理因子对 NDVI 解释力越强,反之则越弱;$h=1,2,\cdots,L$,L 为地理因子的分层数,N_h 和 N 分别为地理因子层 h 和整个重庆市的样本数;σ_h^2 和 σ^2 分别是地理因子层 h 和整个重庆市的 NDVI 值的方差。

交互探测用于识别不同地理因子之间的交互作用,即评估地理因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量 NDVI 的解释力,或这些因子对 NDVI 的影响是否相互独立。通过对比单因子 q 值及交互作用 q 值即可判

断交互作用的方式和方向。具体情况如下[19—20]:$q(X1\cap X2)<\mathrm{Min}(q(X1),q(X2))$,则交互后非线性减弱;$\mathrm{Min}(q(X1),q(X2))<q(X1\cap X2)<\mathrm{Max}(q(X1),q(X2))$,则交互后单因子非线性减弱;$q(X1\cap X2)>\mathrm{Max}(q(X1),q(X2))$,则交互后双因子增强;$q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)$,则交互后独立;$q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)$,则交互后非线性增强,其中,$X1$ 和 $X2$ 代表不同的地理因子。

地理探测器要求输入变量为分类变量,即需对输入的连续型数据进行离散化处理。基于王劲峰等提出的数据离散化方法[19],本研究采用自然断点法对气象、地形、人类活动等因素各地理因子的连续型数据进行离散化处理,将其分为 10 类。使用 ArcGIS10.6 中的 Create Fishnet 功能生成间隔为 2km 的渔网点数据,提取栅格数据作为样本,剔除异常值后,共有 19679 条数据参与计算。

表 1　地理因子指标

Table 1　Geographical factor index

类型 Type	地理因子 Geographical factor	指标 Index	单位 Unit	类型 Type	地理因子 Geographical factor	指标 Index	单位 Unit
气候 Climate	X_1	年均降水量	mm	地形 Terrain	X_4	高程	m
	X_2	年均温	℃		X_5	坡度	°
	X_3	总辐射	MJ/m^2		X_6	坡向	°
				人类活动 Human activity	X_7	人类活动强度指数	—

2　结果分析

2.1　植被覆盖变化特征

2.1.1　时间变化特征

趋势分析显示(图 2),2000—2019 年重庆市植被覆盖整体呈波动上升趋势,且存在明显阶段性特征。2000—2019 年重庆市植被覆盖状况正以 4.4%/10a 的增速逐步改善,以 2002 年和 2011 年为节点,植被覆盖变化明显表现为 3 个阶段:①前期(2000—2002 年),NDVI 年均值呈下降趋势,下降速率为 10.5%/10a,作为对环境变化极为敏感的生态脆弱区,受 2000 年和 2001 年连续特大干旱影响[28],重庆市植被覆盖状况出现明显下降;②中期(2002—2011 年),NDVI 年均值呈小幅增长趋势,增速为 2.9%/10a,期间受三峡库区建成蓄水[29]和极端高温事件[25]等影响而出现轻微震荡,但植被覆盖状况整体稳定;③后期(2011—2019 年),NDVI 年均值呈快速增长趋势,增速高达 7.8%/10a,其间由于持续性的区域生态修复和生态文明建设等因素,虽然不时受异常气候等因素的扰动[26],但植被覆盖增加明显。

偏差分析表明(图 2),2000—2019 年重庆市植被覆盖波动显著,NDVI 偏差值呈现先减小后增加趋势。其中,2000—2012 年,除 2010 年外其余年份 NDVI 偏差均为负值,植被覆盖低于多年平均水平,且 2000 年、2001 年和 2002 年偏差值较大,偏离多年平均水平程度较严重;2013—2019 年,NDVI 偏差均为正值,植被覆盖高于多年平均水平,且偏差值整体较大,但各年份偏差数值差异明显。说明虽然近年来一系列生态工程的不断推进对改善区域植被覆盖状况起到了一定积极作用,但生态系统依然脆弱,还需进一步增强区域水源涵养、水土保持等生态功能,逐步提升区域生态系统稳定性。

2.1.2　空间变化特征

从空间分布看(图 3),2000—2019 年重庆市植被覆盖空间异质性显著,整体呈“东高西低”空间分布格局。植被覆盖多年均值介于 0.26—0.88 之间,其中,高值区(0.82—0.88)主要分布于渝东北的城口、巫溪、巫山等大巴山脉绵延区,以及渝东南的武隆、丰都、石柱等武陵山边缘地区;低值区(0.26—0.58)则主要分部于受蓄水淹没影响的三峡库区消落带,以及人口高度集聚、城镇化快速发展的渝西和主城地区。

从格局演化看(图 3),2000—2019 年重庆市植被覆盖整体呈改善趋势,但高低集聚格局基本稳定。通过

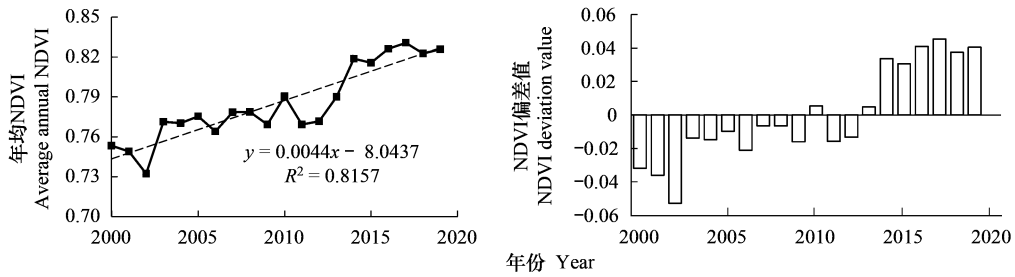

图 2 2000—2019 年重庆市植被覆盖变化趋势和偏差分析

Fig.2 Trend and deviation analysis of vegetation cover change in Chongqing from 2000 to 2019

NDVI:归一化植被指数 Normal Difference Vegetation Index

ArcGIS10.6 软件中趋势面分析工具对重庆市植被覆盖格局演化进一步分析发现,2000—2019 年重庆市植被覆盖在东西方向上由“一字型”向“斜线型”演化,东部地区植被覆盖增速大于西部地区,东西部植被覆盖差距相对增大;南北方向上由“浅 U 型”向“深 U 型”演化,北部和南部地区植被覆盖增速大于中部地区,且高值区面积不断扩大,低值区面积相对减少,但植被覆盖高低集聚格局基本稳定。

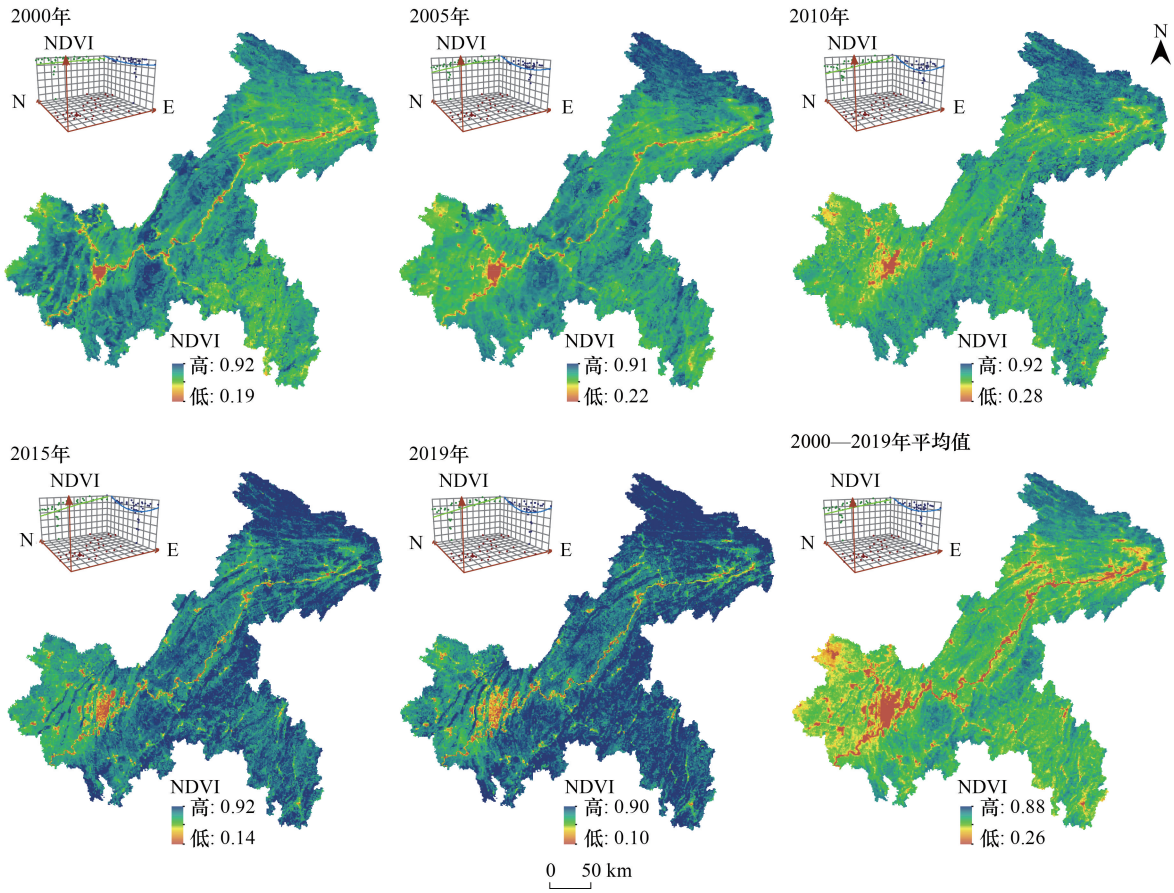

图 3 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空演变

Fig.3 Spatiotemporal evolution of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019

2.2 驱动因素分析

2.2.1 因子探测分析

选取表征气候、地形和人类活动 3 类因素 7 个地理因子,分别探测 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、

2019 年各因子对植被覆盖的影响大小。同时,以 2000—2019 年平均值从静态角度进一步分析各因子对植被覆盖的影响。从静态角度看(表 2),不同地理因子对植被覆盖空间分异性解释力存在显著差异。各地理因子解释力大小依次为:年均温(0.3459)>高程(0.3281)>年均降水量(0.2305)>人类活动强度指数(0.1747)>坡度(0.1008)>总辐射(0.0552)>坡向(0.0034),且均通过显著性检验(P<0.05)。其中,年均温、高程、年均降水量对植被覆盖空间分异性解释力较大,是影响植被覆盖变化的主要因子,人类活动强度指数、坡度次之,总辐射、坡向最小。整体来看,气候因素对植被覆盖空间分异性解释力最大,解释力高达 0.6316,且通过气温、降水等因子直接影响植被覆盖;其次是地形因素,解释力为 0.4323,通过在一定程度上影响降水、太阳辐射等气候因素的空间再分配过程及人类活动因素,进而影响植被覆盖空间分布;人类活动因素则最小,解释力为 0.1747。

表 2　2000—2019 年重庆市因子探测结果

Table 2　Detection results of environmental factors in Chongqing from 2000 to 2019

年份 Year	地理因子 Geographical factor	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
2000	q 值	0.1093	0.2691	0.1089	0.3184	0.1701	0.0018	0.1516
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000
2005	q 值	0.1306	0.2575	0.0849	0.2474	0.0617	0.0031	0.1079
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000
2010	q 值	0.3016	0.3136	0.1564	0.3647	0.1431	0.0020	0.1278
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.000
2015	q 值	0.0333	0.2957	0.0608	0.2747	0.1095	0.0036	0.1505
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2019	q 值	0.0901	0.2586	0.0580	0.2848	0.1417	0.0048	0.1528
	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000
平均值	q 值	0.2305	0.3459	0.0552	0.3281	0.1008	0.0034	0.1747
Average value	P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000

X_1:年均降水量 Average annual precipitation;X_2:年均温 Annual mean temperature;X_3:总辐射 Global radiation;X_4:高程 Elevation;X_5:坡度 Slope;X_6:坡向 Slope direction;X_7:人类活动强度指数 Human Activity Intensity of Land Surface

从动态角度看(图 4,表 2),各地理因子对植被覆盖空间分异性解释力表现出不同变化趋势,但主导因子相对一致。2000—2019 年年均温、坡向、人类活动强度指数解释力总体呈增加趋势,年均降水量、总辐射、高程、坡度解释力总体呈减小趋势,且年均温为第一主导因子,高程和年均降水量分别为第二、第三主导因子。其中,2000—2005 年年均降水量、坡向解释力呈增加趋势,其余各因子解释力呈减小趋势,第一、第二、第三主导因子分别为年均温、高程、年均降水量;2005—2010 年除坡向解释力呈减小趋势外,其余各因子解释力均呈增加趋势,且高程上升为第一主导因子,年均温下降为第二主导因子,年均降水量仍为第三主导因子;2010-2015 年坡向、人类活动强度指数解释力呈增加趋势,其余各因子解释力呈减小趋势,人类活动强度指数上升为第三主导因子,年均温和高程分别为第一、第二主导因子;2015—2019 年高程、坡度、坡向、人类活动强度指数解释力呈增加趋势,其余各因子解释力呈减小趋势,高程、年均温、年均降水量分别为第一、第二、第三主导因子。

2.2.2　交互探测分析

同样,在分别探测 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年各地理因子交互作用的同时,进一步探测各地理因子平均值对植被覆盖变化的交互作用。交互探测结果表明(表 3),2000—2019 年重庆市各地理因子对植被覆盖变化存在交互作用,且呈双因子增强和非线性增强两种类型,说明各地理因子交互作用时会增强对植被覆盖变化的解释力,而不存在相互独立作用或减弱对植被覆盖变化解释力的交互因子。其中,$X_1 \cap X_2$、$X_3 \cap X_4$、$X_1 \cap X_4$、$X_4 \cap X_5$、$X_2 \cap X_3$、$X_4 \cap X_7$、$X_2 \cap X_4$、$X_2 \cap X_5$、$X_5 \cap X_7$、$X_2 \cap X_7$在 2000—2019 年均为双因子增强

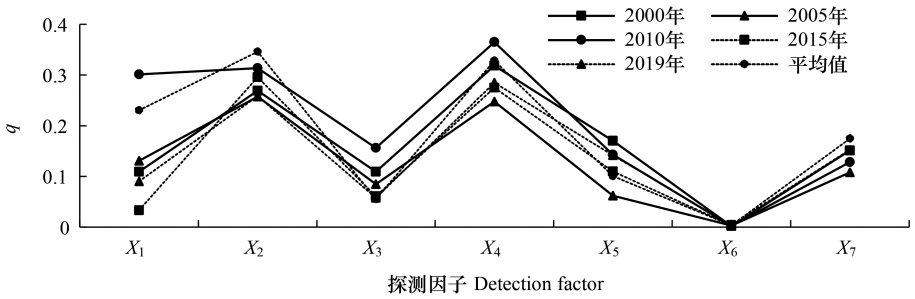

图 4 2000—2019 年重庆市地理因子 q 值变化

Fig.4 Change of Q value of geographical factors in Chongqing from 2000 to 2019

X_1:年均降水量 Average annual precipitation;X_2:年均温 Annual mean temperature;X_3:总辐射 Global radiation;X_4:高程 Elevation;X_5:坡度 Slope;X_6:坡向 Slope direction;X_7:人类活动强度指数 Human Activity Intensity of Land Surface

型;$X_3 \cap X_6$、$X_1 \cap X_6$、$X_4 \cap X_6$、$X_5 \cap X_6$在 2000—2019 年均为非线性增强型;$X_1 \cap X_5$、$X_1 \cap X_7$、$X_2 \cap X_6$在 2000—2019 年主要为双因子增强型,个别年份为非线性增强型;$X_1 \cap X_3$、$X_3 \cap X_5$、$X_3 \cap X_7$、$X_6 \cap X_7$在 2000—2019 年主要为非线性增强型,个别年份为双因子增强型。

同时,交互探测结果显示(表 3),2000—2019 年重庆市植被覆盖变化第一主导交互因子为年均温∩人类活动强度指数,第二主导交互因子为高程∩人类活动强度指数,第三主导交互因子为年均温∩总辐射。根据相关研究,气温对植被生长具有重要影响作用,气温低于或高于植被生长所能忍受的范围时,均不利于植被生长,甚至出现死亡[20];高程在一定程度上会影响人类活动因素对植被的作用大小,同时重庆市作为典型的山地区域,受气温垂直递减率影响,在一定范围内随海拔升高而降雨量增加,通过改变区域水热条件进而影响植被覆盖变化[30];人类活动对植被覆盖变化同样具有重要影响,一方面通过退耕还林还草、生态保护修复等措施可促进植被覆盖,另一方面通过城镇化建设、资源过度开发等行为可破坏植被覆盖[30];而太阳辐射则通过光合作用影响植被生长。总之,2000—2019 年重庆市各地理因子交互作用对植被覆盖变化的解释力不是独立作用或减弱的,也不是简单的叠加过程,而是解释力显著增强的双因子增强或非线性增强。

表 3 2000—2019 年重庆市交互探测结果

Table 3 Interactive detection results of Chongqing from 2000 to 2019

交互因子 Reciprocal factor	2000	2005	2010	2015	2019	平均值 Average value	交互因子 Reciprocal factor	2000	2005	2010	2015	2019	平均值 Average value
$X_1 \cap X_2$	0.3058 *	0.2879 *	0.3916 *	0.3275 *	0.2897 *	0.3662 *	$X_3 \cap X_4$	0.3573 *	0.2979 *	0.4326 *	0.3096 *	0.3107 *	0.3676 *
$X_1 \cap X_3$	0.2337 **	0.2870 **	0.3987 *	0.1660 **	0.2233 **	0.3010 **	$X_3 \cap X_5$	0.2454 *	0.1736 **	0.2882 *	0.1844 **	0.2062 **	0.1960 **
$X_1 \cap X_4$	0.3478 *	0.2915 *	0.4262 *	0.3033 *	0.3068 *	0.3670 *	$X_3 \cap X_6$	0.1163 **	0.0936 **	0.1617 **	0.0712 **	0.0683 **	0.0653 **
$X_1 \cap X_5$	0.2051 *	0.1672 *	0.3442 *	0.1531 **	0.1983 *	0.2583 *	$X_3 \cap X_7$	0.2420 *	0.2163 **	0.2894 **	0.2178 **	0.2164 **	0.2478 **
$X_1 \cap X_6$	0.1167 **	0.1351 **	0.3052 **	0.0407 **	0.0970 **	0.2345 **	$X_4 \cap X_5$	0.3450 *	0.2588 *	0.3756 *	0.2816 *	0.2875 *	0.3335 *
$X_1 \cap X_7$	0.2221 *	0.2420 **	0.3572 *	0.1839 *	0.2184 *	0.3335 *	$X_4 \cap X_6$	0.3265 **	0.2537 **	0.3675 **	0.2819 **	0.2944 **	0.3344 **
$X_2 \cap X_3$	0.3168 *	0.3111 *	0.3961 *	0.3263 *	0.2891 *	0.3826 *	$X_4 \cap X_7$	0.3881 *	0.3218 *	0.4121 *	0.3509 *	0.3480 *	0.3999 *
$X_2 \cap X_4$	0.3325 *	0.2893 *	0.3891 *	0.3245 *	0.3125 *	0.3785 *	$X_5 \cap X_6$	0.1832 **	0.0704 **	0.1495 **	0.1190 **	0.1511 **	0.1090 **
$X_2 \cap X_5$	0.3065 *	0.2629 *	0.3361 *	0.3007 *	0.2689 *	0.3493 *	$X_5 \cap X_7$	0.2542 *	0.1570 *	0.2214 *	0.2118 *	0.2357 *	0.2211 *
$X_2 \cap X_6$	0.2745 **	0.2605 *	0.3185 **	0.2985 *	0.2617 *	0.3486 *	$X_6 \cap X_7$	0.1584 **	0.1203 **	0.1388 **	0.1593 **	0.1574 *	0.1826 **
$X_2 \cap X_7$	0.3401 *	0.3280 *	0.3641 *	0.3667 *	0.3246 *	0.4167 *							

* 表示双因子增强; * * 表示非线性增强

3 结论与讨论

本研究基于 MODIS-NDVI 数据、气候数据、地形数据和人类活动数据,采用趋势分析等方法,应用地理探

测器模型,全面分析 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征,并探究各地理因子及其交互作用对重庆市植被覆盖的影响程度与作用机制。主要结论如下:

(1)时间变化分析显示,2000—2019 年重庆市植被覆盖整体呈波动上升趋势,NDVI 偏差值呈先减小后增加趋势,植被覆盖变化特征明显且表现为 3 个阶段。2000—2019 年重庆市植被覆盖增长率为 4.4%/10a,前期(2000—2002 年),NDVI 年均值呈下降趋势;中期(2002—2011 年),NDVI 年均值呈小幅增长趋势;后期(2011—2019 年),NDVI 年均值呈快速增长趋势。

(2)空间变化分析显示,2000—2019 年重庆市植被覆盖空间异质性显著,但高低集聚格局基本稳定。2000—2019 年重庆市植被覆盖呈“东高西低”空间分布格局,高值区主要分布于渝东北的大巴山脉绵延区和渝东南的武陵山边缘地区;低值区则主要分部于三峡库区消落带及渝西、主城地区。植被覆盖空间格局在东西方向上由“一字型”向“斜线型”演化,南北方向上由“浅 U 型”向“深 U 型”演化,但植被覆盖高低集聚格局基本稳定。

(3)因子探测发现,不同地理因子对植被覆盖空间分异性解释力存在显著差异,且变化趋势不同,但主导因子相对一致。2000—2019 年重庆市植被覆盖各地理因子解释力大小依次为:年均温(0.3459)>高程(0.3281)>年均降水量(0.2305)>人类活动强度指数(0.1747)>坡度(0.1008)>总辐射(0.0552)>坡向(0.0034)。其中,年均温、坡向、人类活动强度指数解释力总体呈增加趋势,年均降水量、总辐射、高程、坡度解释力总体呈减小趋势。

(4)交互探测发现,2000—2019 年重庆市各地理因子对植被覆盖变化存在交互作用,且呈双因子增强和非线性增强两种类型,而不存在相互独立作用或对植被覆盖变化解释力减弱的交互因子。2000—2019 年重庆市植被覆盖变化第一主导交互因子为年均温∩人类活动强度指数,第二主导交互因子为高程∩人类活动强度指数,第三主导交互因子为年均温∩总辐射。

本研究通过对 2000—2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素的分析,在一定程度上探究了气象、地形和人类活动等因素各地理因子及其交互作用对重庆市植被覆盖的影响程度与作用机制,但植被覆盖变化受多因素综合作用,是一个非常复杂的动态过程,因此,在后续的研究中还需进一步完善指标因子,同时考虑建立更长时间尺度的分析模型。此外,今后的研究可在深入探究各因素对植被覆盖作用机制与驱动规律的基础上,进行植被覆盖变化模型的构建和区域未来植被覆盖情况的预测。

参考文献(References):

[1] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 143-160.

[2] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luyssaert S, Margolis H, Fang J Y, Barr A, Chen A P, Grelle A, Hollinger D Y, Laurila T, Lindroth A, Richardson A D, Vesala T. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. Nature, 2008, 451(7174): 49-52.

[3] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.

[4] Jia S F, Zhu W B, Lü A, Yan T T. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3069-3079.

[5] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系. 地理科学, 2014, 34(7): 882-888.

[6] 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.

[7] 王建邦, 赵军, 李传华, 朱钰, 康重阳, 高超. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.

[8] 陈超男, 朱连奇, 田莉, 李新鸽. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. 生态学报, 2019, 39(9): 3257-3266.

[9] 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.

[10] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D17): 20069-20083.

[11] 栾金凯, 刘登峰, 黄强, 冯九梁, 林木, 李国宝. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素. 生态学报, 2018, 38(8): 2780-2790.
[12] 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.
[13] 李学梅, 任志远, 张翀. 气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1390-1394.
[14] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS-EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究. 生态学报, 2018, 38(19): 6992-7002.
[15] 李惠敏, 刘洪斌, 武伟. 近 10 年重庆市归一化植被指数变化分析. 地理科学, 2010, 30(1): 119-123.
[16] 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析. 生态学报, 2022, 42(1): 220-235.
[17] 栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 文林琴, 黄丽春. 1996—2015 年滇西北香格里拉植被净初级生产力变化. 生态学报, 2022, 42(1): 266-276.
[18] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1158-1167.
[19] 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.
[20] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 陶帅, 徐新良. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
[21] Lanorte A, Lasaponara R, Lovallo M, Telesca L. Fisher-Shannon information plane analysis of SPOT/VEGETATION Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series to characterize vegetation recovery after fire disturbance. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 441-446.
[22] 罗悦, 俞文政, 袁真艳. 淮北平原太阳总辐射的估算及时空特征分析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1031-1042.
[23] 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较. 资源科学, 2003, 25(6): 83-88.
[24] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. 地理学报, 2015, 70(7): 1068-1079.
[25] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.
[26] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.
[27] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 郭恒亮, 魏海涛. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262.
[28] 赵晓, 周文佐, 田罗, 何万华, 章金城, 刘东红, 杨帆. 土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7658-7668.
[29] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于 MODIS-EVI 的 2000—2015 年重庆植被覆盖季节变化. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2146-2155.
[30] 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 刘晓华, 陈宇轩. 黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1830-1838.