

引用格式:王永红,鲁恒. 2001—2018年云南省植被变化及驱动力[J]. 山地学报,2022,40(4):531-541.

WANG Yonghong, LU Heng. Driving force of vegetation cover change in Yunnan province of China from 2001 to 2018 [J]. Mountain Research, 2022, 40(4):531-541.

## 2001—2018年云南省植被变化及驱动力

王永红<sup>1</sup>, 鲁恒<sup>2\*</sup>

(1. 湖南城市学院 信息与电子工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

**摘 要:** 植被覆盖变化是评价区域生态、环境状况的重要指标。云南省是中国生物多样性最丰富、全球生物多样性最显著的地区,同时也是气候敏感区和典型生态环境脆弱地带。已有对云南植被时空变化主控因素的研究局限于考察单个因素与植被之间的关联,未考虑自然因素和人类活动因素协同对植被时空变化的影响,且大多是针对小尺度、小流域进行的,研究缺乏整体性,不能从时空上系统理解云南省植被变化及驱动力。本研究基于 2001—2018 年 MODIS 数据,利用时空分析方法和地理探测器模型,研究云南省植被变化的时空格局和驱动力。研究发现:(1)在 2001—2014 年植被呈缓慢增长趋势(1.5%/10a),2014—2018 年呈快速增长趋势(6.4%/10a);(2)滇东北、滇东南、滇西北地区是云南省植被主要上升区域;(3)气温和降水因子对云南植被变化影响最为显著,其次社会经济因素对云南植被变化也有一定的影响,植被类型和土壤类型对云南植被变化的影响最弱;(4)2001—2018 年云南省植被的时空变化特征是自然因素和社会因素共同作用的结果,所有因子在交互作用下均具有协同增强作用,其中风速与降水(0.3262)、风速与气温(0.3040)以及降水与城乡居民可支配收入(0.2924)的交互作用对云南植被变化的影响最为显著。研究结果可为云南省生态系统环境质量评价提供数据支撑和理论参考。

**关键词:** 植被变化;影响因素;时空格局;地理探测器;云南省

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

植被是陆地生态系统的重要组成部分,在连接土壤圈、大气圈和水圈方面发挥着关键作用,直接和间接地影响着地球系统的碳循环、能量交换、气候变化和水循环<sup>[1]</sup>。植被覆盖时空变化是评价区域生态、环境状况的重要指标,越来越受到国内外学者的广泛关注<sup>[2]</sup>。传统的植被实地调查方法耗费大量人力、物力,且效率低、数据更新困难,在进行大尺度植被变化动态监测具有很大局限性<sup>[3]</sup>。随着遥感技术的飞速发展,各类对地观测传感器为快速动态监测大范围的植被变化提供了有力保障。基于遥感技术,发展出了众多的植被覆盖计算方法,如:植被

指数法、多元回归法、决策树法、像元二分法等。其中归一化植被指数(NDVI)可准确、直观的描述地表植被覆盖状态,被广泛应用于植物物候、植被动态监测、植被覆盖与环境因素关系<sup>[4-5]</sup>。

云南是中国生物多样性最丰富、全球生物多样性最显著的地区,生物种类占中国高等植物的 60% 以上<sup>[6]</sup>。受气候、地形、人类活动等因素的综合影响,云南植被破坏后的恢复过程非常缓慢。准确掌握云南省植被时空变化状况及其驱动因素具有重要意义。已有学者在该区域开展了植被变化和驱动力的研究:在植被空间变化方面,相关研究发现澜沧

收稿日期(Received date):2022-04-13;改回日期(Accepted date):2022-07-29

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(41701499)[National Natural Science Foundation of China(41701499)]

作者简介(Biography):王永红(1978-),男,湖南株洲人,硕士研究生,主要研究方向:遥感与地理信息系统。[WANG Yonghong(1978-), male, born in Zhuzhou, Hunan province, M. Sc. candidate, research on remote sensing and geographic information system] E-mail: 45506034@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author):鲁恒(1984-),男,博士,副教授,主要研究方向:遥感与地理信息应用。[LU Heng(1984-), male, Ph. D., associate professor, specialized in remote sensing and geographic information] E-mail: luheng@scu.edu.cn

江、怒江等区域植被总体水平较好,但在不同空间和时间上有着较大差异<sup>[7,8]</sup>;在驱动力方面,有学者利用趋势分析模型、转移矩阵分析了云南省植被覆盖分布与地形因素的关系,也有学者利用变异系数模型、逐像元相关性研究了云南省植被变化与气候之间的联系<sup>[9-10]</sup>。上述研究对于云南省植被变化及其驱动力的研究总体较少,且大多是针对小尺度、小区域的,对植被时空变化主控因素的研究局限于单因素与植被之间的联系,未考虑自然因素和人类活动因素协同对植被时空变化的影响,研究缺乏整体性,不能系统地理解云南省植被时空变化及驱动力。

本文利用 2001—2018 年 MODIS、降水、风速、温度、社会经济等数据,基于时空分析模型分析云南省植被变化时空格局,应用地理探测器模型中的因子探测器、风险探测器和交互探测器分别定量探测单因子或多因子协同作用时对植被的作用强度,以期云南省植被保护和生态系统评价提供科学的参考依据。

## 1 研究区与数据处理

### 1.1 研究区概况

云南省(21°8′32″~29°15′8″N, 97°31′39″~106°11′47″E)地处中国西南部,属低纬度地区,东西宽 864.9 km,南北长 990 km,总面积约  $39.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。云南省地理位置特殊,地形地貌复杂,地势自北向南呈阶梯状逐级下降,平均海拔约 2000 m<sup>[11]</sup>。气候上,研究区属低纬山原季风气候,年温差一般 10℃~12℃,降水在季节和地域上的分配极不均匀,湿季 5—10 月集中了 85% 的降水量;全省年降水最多的地方达到 2200~2700 mm,最少的仅有 584 mm,复杂的气候条件、地形地貌使得该区植被较高<sup>[12]</sup>。研究区位置如图 1 所示。

### 1.2 数据来源及处理

本文数据来源包括基础地理信息数据、MODIS 数据、气候数据、土壤数据、植被数据和社会经济数据,具体如下:

#### (1) MODIS 数据

通过美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)网站(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)获取 MODIS MOD13Q1 产品,该数据时间范围为 2001—2018 年,

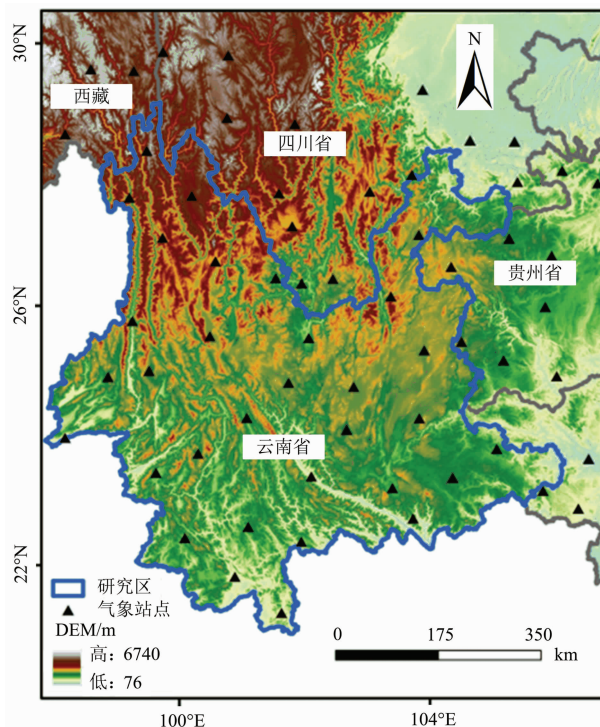


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of study area

时间分辨率为 16 d,空间分辨率 250 m。利用 MODIS Reprojection Tools(MRT),对数据进行格式转换、投影变化等预处理,在完成影像数据的拼接以及所需波段的提取后,在 ArcGIS10.5 环境下裁剪出研究区域。

#### (2) 气候数据

选取 2001—2018 年研究区及周边 63 个气象站点的月降水、气温等数据,该数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。对研究区及周边 63 个气象站点 2001—2018 年的气温、降水等的月值数据插值求平均,作为整个研究区的月均和年均气温、降水量等。

#### (3) 土壤类型数据

通过国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>)获取,采用传统的“土壤发生分类”将其重分类为 15 类。

#### (4) 植被覆盖类型数据

通过中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)获取 1:100 万植被类型图,根据植被类型划分为 9 类,提取云南省植被分布范围。

#### (5) 社会经济数据

通过云南省统计局(<http://www.stats.yn.gov.cn/>)

及云南省 2001—2018 年《云南省统计年鉴》获取云南省农林牧渔业总产值,粮食产量,城乡居民可支配收入,工业总产值,人口。

## 2 研究方法 with 实验流程

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 Mann-Kendall 检验

植被的突变是普遍存在于生态系统中的重要现象,指植被由保持的一种稳定状态(包括持续稳定的变化)急剧上升或下降到另一种稳定状态,在本研究中采用 Mann-Kendall 检验识别时间序列中潜在的突变点,Mann-Kendall 检测法的检测范围广,定量化程度高<sup>[13]</sup>。具体公式如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (1)$$

式中, $d_k$  为定义的统计量; $m_i$  表示植被的时间序列( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )中第  $i$  个样本( $1 < k \leq i$ )的值。在原序列随机独立的假设下,均值  $\text{var}(d_k)$  为:

$$\text{var}(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (2)$$

$d_k$  标准化后,方差  $UF_k$  为:

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{\text{var}(d_k)} \quad (3)$$

满足标准正态分布,概率  $p = \text{prob}(|U| > |UF_k|)$  可以通过查表获得。给出显著水平  $p(p=0.01)$ 。若  $|UF_k| > U_p$ ,则表明植被时间序列呈现显著的变化趋势。将植被时间序列( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )的逆序列,按照以上过程计算一次,同时使  $|UB_k| = -UF_k$ ,  $k = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。

植被的变化趋势依据置信度检验,曲线位于置信水平线之上时,说明植被时间序列的变化趋势明显。在置信区间内出现  $UF$  和  $UB$  两条曲线的交点,该点对应的的时间即为突变开始时间。

#### 2.1.2 趋势线分析法

为研究 2001—2018 年云南省植被生长状况对环境变化响应以及这种变化速率在空间上的差异,通过模拟每个像元的变化趋势,以此计算 NDVI 的变化趋势,斜率为正值的区域,NDVI 呈增加趋势,斜率为负值的区域,NDVI 为减少趋势。当斜率的绝对值越大,则 NDVI 增加或减少的越明显。

2001—2018 年间各像元 NDVI 变化趋势分析公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times f_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n f_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)} \quad (4)$$

式中, $\text{Slope}$  为趋势线斜率; $n$  为总的年数; $i$  为年序号; $f_i$  为第  $i$  年 NDVI 值。

#### 2.1.3 地理探测器

地理探测器是王劲峰<sup>[14]</sup>提出的一种新的空间分析模型,是探测和利用空间分异性的工具。本文在叠加分析的基础上借助地理探测器的因子探测器、风险探测器、交互探测器对影响云南省植被时空变化的各因子进行定量分析,获取影响植被时空变化的主控因子及不同因子的交互作用情况。

##### 2.1.3.1 因子探测器

用于探测和揭示地理事物的时空变化趋势,地理因子对地理事物的影响程度,用  $q$  值度量<sup>[15]</sup>,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中, $q$  为因子对变量的影响程度的大小量化,取值范围为 $[0, 1]$ ,其值越接近于 0 表示地理因子对自变量的解释能力越弱,越接近于 1 则表明地理因子对自变量的解释能力越强; $N_i$  和  $N$  分别为类别  $i$  的单元数和全区的单元数; $\sigma_i^2$  和  $\sigma^2$  分别为类别  $i$  和全区的  $Y$  值的方差。

##### 2.1.3.2 风险探测器

用于比较两因子  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的空间分布影响是否有显著差异,即可以判断因子  $X_1$  是否比因子  $X_2$  对属性  $Y$  的空间分布具有更重要的影响力。

##### 2.1.3.3 交互探测器

交互探测器用于识别不同风险因子  $X_a$  之间的相互关系,即评估因子  $X_a$  和  $X_b$  共同作用时是否会增加或减弱对  $Y$  的解释力,或这些因子对  $Y$  的影响是相互独立的。假设  $P(A)$  与  $P(B)$  分别是影响因子  $X_a$  和  $X_b$  对 NDVI 产生空间分异的解释力, $P(X_a \cap X_b)$  是影响因子  $X_a$  和  $X_b$  交互后的解释力,两因子之间的关系可分为以下几类<sup>[16]</sup>:

(1) 非线性减弱:  $P(X_a \cap X_b) < \text{Min}(P(X_a), P(X_b))$

(2) 单因子非线性减弱:  $\text{Min}(P(X_a), P(X_b)) < P(X_a \cap X_b) < \text{Max}(P(X_a), P(X_b))$

(3) 双因子增强:  $P(X_a \cap X_b) > \text{Max}(P(X_a), P(X_b))$

(4) 独立作用:  $P(X_a \cap X_b) = P(X_a) + P(X_b)$

(5) 非线性增强:  $P(X_a \cap X_b) > P(X_a) + P(X_b)$

## 2.2 影响因子选取

影响植被变化因素可分为自然因素和人为因素<sup>[17]</sup>, 本文从这两方面进行指标选取。

### 2.2.1 自然因素

自然因素对植被的生长起决定性的作用, 一方面影响着植被对于矿物质元素和水分的吸收<sup>[18]</sup>, 另一方面影响着植被生长所需的光、热等能量供给<sup>[19]</sup>。为了充分体现自然因素对于植被的影响, 本文选取了 5 个自然因素相关因子:

(1) 多年平均降水: 在克里金插值得到的 250 m × 250 m 降水空间化栅格数据基础上, 利用 5 km × 5 km 格网几何中心点提取降水数据, 体现区域降水差异。

(2) 多年平均气温: 在克里金插值得到的 250 m × 250 m 气温空间化栅格数据基础上, 利用 5 km × 5 km 格网几何中心点提取降水数据, 体现研究单元气温差异。

(3) 多年平均两分钟风速: 克里金插值所得的 250 m × 250 m 风速空间化栅格数据基础上, 利用 5 km × 5 km 格网几何中心点提取风速数据, 体现区域风速差异。

(4) 土壤类型: 根据传统的“土壤发生分类”系统, 将其重分类为 15 类, 形成新的土壤类型图。

(5) 植被覆盖类型: 植被覆盖类型反映地表植被覆盖情况, 是衡量地表植被状况的一个重要指标。

### 2.2.2 人为因素

土地利用方式变化是人类活动对植被影响的主要体现, 一方面通过土地利用方式的变化导致植被面积的变化, 另一方面通过土地利用方式影响植被质量<sup>[20]</sup>。根据前人研究结果, 选择农林牧渔业总产值、粮食产量、城乡居民可支配收入、工业总产值、人口作为人类活动因子<sup>[21]</sup>。农林牧渔业总产值反映一定时期内农业发展规模和成果, 城乡居民可支配收入反映居民生活水平, 粮食产量反映农业发展水平, 工业总产值反映经济发展状况。

## 2.3 实验流程

为了更加深入的研究云南省植被的驱动力因素, 基于 ArcGIS10.5 中的数据管理工具建立

5 km × 5 km 的网格, 然后利用提取分析工具分别提取随机点处多年平均 NDVI、多年平均降水、多年平均气温等数据。共采集了 14 100 个样本进行进一步研究。自然间断点分级法就是将数据集中不连续的地方作为分级的依据对数据几何进行分级的方法, 避免了人为因素干扰。在应用地理探测器前, 将不可量化的因子(土壤类型、植被覆盖类型)按照属性标准进行分层, 可量化的因子按照自然间断点分级法分别应用空间分析工具进行重分类且每层样本数量均达到大样本数量要求, 将重分类的数据分为因变量  $Y$  和自变量  $X$  导入地理探测器软件中进行计算, 得到 NDVI 与各个因子之间的定量关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被时间变化特征

使用 2001—2018 年 MODIS-NDVI 数据, 基于 Mann-Kendall 检验以年为时间尺度进行分析, 结果表明, 2001—2018 年云南省植被呈显著增加趋势, 全年 NDVI 在 0.5 ~ 0.6 之间波动(图 2)。Mann-Kendall 分析表明, 2001—2018 年云南省 NDVI 共发生一次突变(2014 年), NDVI 在 2001—2014 年呈缓慢增长趋势, 增速为 1.5%/10a, 2014—2018 年呈快速增长趋势, 增速为 6.4%/10a。

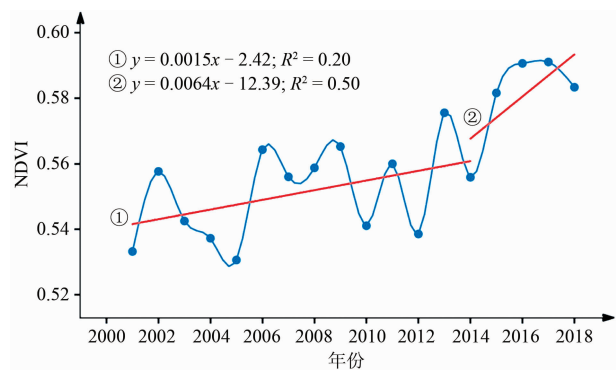


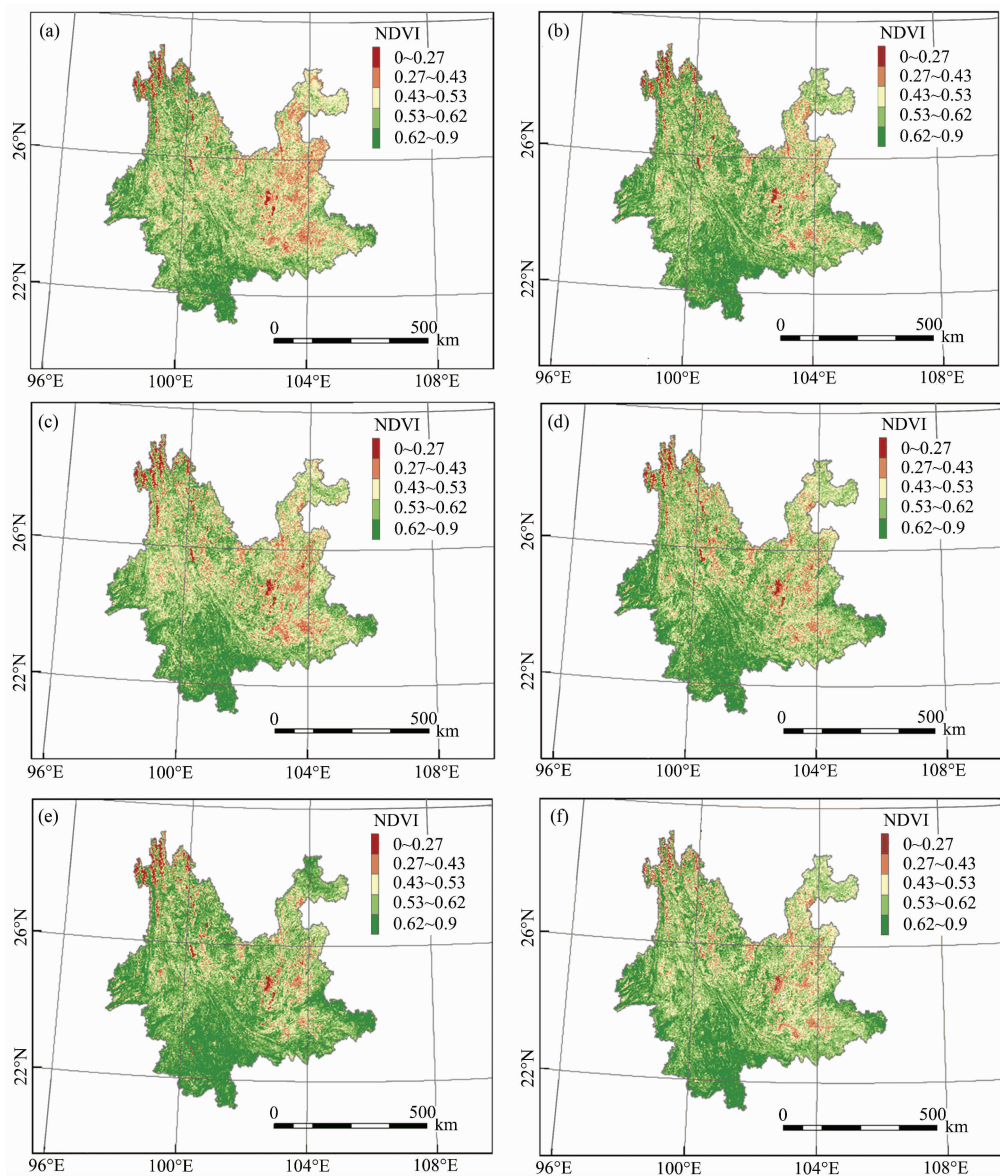
图 2 云南省 2001—2018 年 NDVI 变化趋势

Fig. 2 The trend of NDVI during 2001 - 2018 in Yunnan province of China

### 3.2 植被空间格局变化

由云南省植被时空分布(图 3)可知, 云南省植被总体呈增加趋势, 滇东北南部、滇东南西部、滇西北南部、滇中部分地区增长趋势明显; 滇西、滇西南地区相对稳定, 保持持续高植被覆盖状态; 但是对比





3 各时期植被时空分布:(a)2001 年;(b)2006 年;(c)2010 年;(d)2014 年;(e)2018 年;(f)2001—2018 年

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of vegetation;

(a) 2001; (b) 2006; (c) 2010; (d) 2014; (e) 2018; (f) 2001 - 2018

部分其他地区,如滇中的中部地区,可以比较明显的发现部分红色(NDVI 值为 0~0.27)斑块变大,分析后发现该地区是湖泊(抚仙湖、滇池)边缘地区,城市(昆明、玉溪)辐射地区<sup>[9]</sup>。随着现代化进程,城市化发展越来越快,城市建设向外扩张,更多的用地被使用来建设城市,使得 2018 年对比 2001 年部分植被较低的区域有逐渐向外扩张趋势。

云南省植被总体呈由北向南、由东向西增加特征,区域植被覆盖情况存在分区特征,造成这种分布格局主要因为西部多以林地为主而东部以草地和农用地为主<sup>[22]</sup>。其中,滇南南部、滇西、滇西南以及滇

东南东部植被较高,NDVI 值普遍在 0.62 以上。植被较低的区域主要分布在滇西北部、滇东北南部、滇中地区。其中,滇西北地区为青藏高原南延部分,海拔较高,终年积雪<sup>[23]</sup>;滇东北、滇中地区为云贵高原的组成部分<sup>[11]</sup>,平均海拔 2000 m 左右,整体地势较平缓适合发展农业,同时几个规模较大的城镇也分布于该区域,云南省省会城市昆明市就坐落在滇中地区,受人工农作物种植及城市化影响,该地区植被相对较低。

### 3.3 植被变化趋势的空间分布特征分析

通过趋势线分析法对各时相的平均 NDVI 进行

分析,得到各像元的 NDVI 变化趋势如图 4 所示。云南省在 2001—2018 年间 NDVI 主要呈增加趋势,广泛分布于各个小区域。NDVI 呈减少趋势的区域主要分布于昆明、玉溪、迪庆等地。NDVI 增加的区域主要分布于昭通、文山、临沧、普洱、西双版纳等地。其中发生大规模减少的主要集中在红塔、晋宁、呈贡、官渡、陆良、香格里拉、德钦、大理、祥云等县,主要增加县域包括大关、盐津、广南、景谷、澜沧、西盟、会泽、宣威等。

3.4 植被变化影响因子分析

云南植被覆盖变化主要分为稳定增长(2001—2014 年)和快速增长(2015—2018 年)两个阶段。为了发现云南省植被覆盖变化的形成规律和发育特征,本文按照 2001—2014 年、2015—2018 年、2001—2018 年三个时间段进行植被覆盖变化影响因素分析。

3.4.1 因子探测结果与分析

为了发现云南省植被变化受气候、降水、土壤和社会经济等因素的影响规律,选取了 10 个因子:平均两分钟风速、年平均降水量、年平均气温、人口、城乡居民可支配收入、工业总产值、粮食产量、农林牧渔业总产值、土壤类型和植被类型。利用 ArcGIS10.5 和地理探测器模型创建渔网点(Data Management Tools→Feature Class→Create Fishnet)定量分析云南植被变化影响因素,具体结果如表 1 所示。

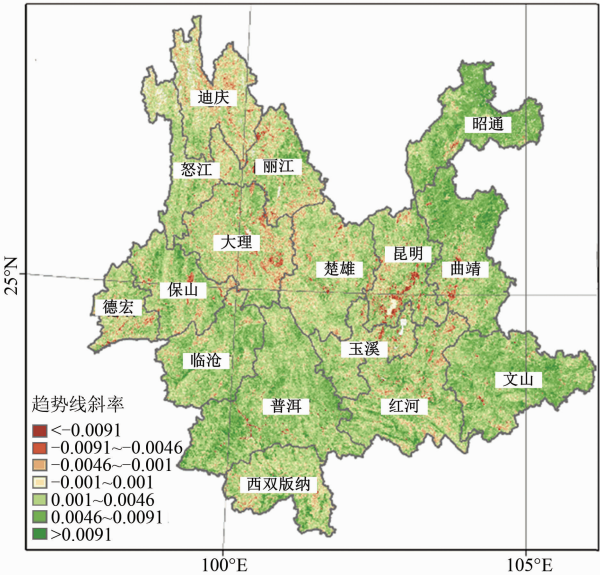


图 4 2001—2018 年植被年际变化趋势分布图

Fig.4 Diagram of annual variation trend of NDVI during 2001 - 2018

根据云南植被变化影响因素探测结果,气温和降水因子对云南植被变化影响较为显著,其次社会经济因素对云南植被变化也有一定的影响,植被类型和土壤类型对云南植被变化的影响最弱。根据表 1 计算结果显示:2001—2014 年,气温和降水因子为主控因子,多年平均降水量对植被变化影响最为显著,解释力为 0.2138,其次为多年平均气温和风速,粮食产量、农林牧渔业总产值、城乡居民可支配收入、工业总产值和人口解释力相对较弱属于次要因子,土壤类型和植被类型对云南植被变化影响最低;

表 1 植被变化影响因素单因子探测结果

Tab.1 Single factor detection results of influencing factors of vegetation change

探测因子 (X)	2001—2014 年解释力 P	2015—2018 年解释力 P	2001—2018 年解释力 P
风速 (X <sub>1</sub> )	0.1068	0.1206	0.1361
多年平均降水量 (X <sub>2</sub> )	0.2138	0.2143	0.2384
多年平均气温 (X <sub>3</sub> )	0.1783	0.1764	0.2069
人口 (X <sub>4</sub> )	0.0402	0.0599	0.0352
城乡居民可支配收入 (X <sub>5</sub> )	0.0595	0.0429	0.0514
工业总产值 (X <sub>6</sub> )	0.0498	0.0619	0.0645
粮食产量 (X <sub>7</sub> )	0.0831	0.0893	0.0886
农林牧渔业总产值 (X <sub>8</sub> )	0.0630	0.0876	0.0722
土壤类型 (X <sub>9</sub> )	0.0437	0.0432	0.0442
植被类型 (X <sub>10</sub> )	0.0206	0.0205	0.0210

2015—2018 年,气温和降水因子同样作为云南植被变化的主控因子,社会经济因子作为次要因子,但是云南植被变化受到社会经济因素的影响更加突出,人口、工业生产总值、粮食产量和农林渔牧业总产值对云南植被变化的解释力明显增加,说明云南植被变化越来越受到人类活动的影响;2001—2018 年,云南植被变化影响因素地理探测器结果显示,多年平均降水量和多年平均气温是主控因素。

3.4.2 交互探测影响分析

云南省植被稳定增长(2001—2014 年)和快速增长(2015—2018 年)两个阶段以及 2001—2018 年

各因素交互作用结果,具体如表 2、表 3、表 4 所示。

云南省植被时空差异性是多因子协同作用的结果,且对植被时空变化的影响较单一因子影响更显著。所有因子在协同作用下对植被的时空变化的影响具有协同增加效果。各影响因子之间的协同作用不是简单的线性关系,而是一种复杂的非线性叠加关系。

2001—2014 年,风速和气温、降水和人口、降水和城乡居民可支配收入、降水和工业总产值、降水和粮食产量、降水和农林牧渔业总产值协同作用最为明显。2015—2018 年,风速和气温、风速和降水协

表 2 2001—2014 年植被变化影响因素交互作用结果

Tab. 2 Interaction results of influencing factors of vegetation change from 2001 to 2014

	各变量因子									
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$	0.1068									
$X_2$	0.2522	0.2138								
$X_3$	0.2680	0.2447	0.1783							
$X_4$	0.2055	0.2529	0.2263	0.0402						
$X_5$	0.2085	0.2595	0.2449	0.1415	0.0595					
$X_6$	0.1718	0.2506	0.2321	0.1325	0.1278	0.0498				
$X_7$	0.2325	0.2550	0.2259	0.1412	0.1766	0.1773	0.0831			
$X_8$	0.2160	0.2555	0.2254	0.1465	0.1484	0.1888	0.1610	0.0630		
$X_9$	0.1527	0.2190	0.1870	0.088	0.1023	0.1077	0.1129	0.0947	0.0437	
$X_{10}$	0.1361	0.2194	0.1900	0.0650	0.0871	0.0813	0.1021	0.0827	0.0565	0.0206

表 3 2015—2018 年植被变化影响因素交互作用结果

Tab. 3 Interaction results of influencing factors of vegetation change from 2015 to 2018

	各变量因子									
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$	0.1206									
$X_2$	0.2509	0.2143								
$X_3$	0.2606	0.2495	0.1764							
$X_4$	0.2170	0.2566	0.2260	0.0599						
$X_5$	0.1997	0.2558	0.2398	0.1496	0.0429					
$X_6$	0.1884	0.2495	0.2260	0.1758	0.1317	0.0619				
$X_7$	0.2295	0.2565	0.2233	0.1384	0.1690	0.1856	0.0893			
$X_8$	0.2381	0.2445	0.2107	0.1817	0.1610	0.1843	0.1989	0.0876		
$X_9$	0.1581	0.2194	0.1848	0.0969	0.0956	0.1057	0.1202	0.1086	0.0432	
$X_{10}$	0.1430	0.2197	0.1867	0.0827	0.0721	0.0873	0.1104	0.1026	0.0559	0.0205

表 4 2001—2018 年植被变化影响因素交互作用结果  
Tab. 4 Interaction results of influencing factors of vegetation change from 2001 to 2018

	各变量因子									
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$	0.1361									
$X_2$	0.3262	0.2384								
$X_3$	0.3040	0.2739	0.2069							
$X_4$	0.1934	0.2831	0.2624	0.0352						
$X_5$	0.2135	0.2924	0.2782	0.1390	0.0514					
$X_6$	0.2183	0.2842	0.2711	0.1555	0.1383	0.0645				
$X_7$	0.2252	0.2885	0.257	0.1619	0.1673	0.1881	0.0886			
$X_8$	0.2143	0.2911	0.2570	0.1608	0.1593	0.1826	0.2004	0.0722		
$X_9$	0.1718	0.2446	0.2162	0.0917	0.0992	0.1201	0.1239	0.1129	0.0442	
$X_{10}$	0.1564	0.2438	0.2188	0.0655	0.0816	0.0972	0.1112	0.0977	0.0560	0.0210

同作用最为明显,其后依次为降水和人口、降水和城乡居民可支配收入、降水和粮食产量。2001—2018 年,风速和降水、风速和气温协同作用最为显著,其次降水和人口、城乡居民可支配收入、农林渔业产值等社会经济因子协同作用也较强。对比三阶段地理探测器结果,云南省植被变化受人类活动的影响逐年增强。

4 讨论

自实施退耕还林等一系列生态工程以来,云南省植被覆盖发生了较大变化。本文研究表明,2001—2018 年云南省 NDVI 整体呈波动增加趋势,其中 2014—2018 年 NDVI 变化率明显增大,增长速率达到 0.064/10a。已有研究表明自 2000 年退耕还林等生态工程施行以来,云南省植被覆盖情况得到了很大的改善<sup>[7]</sup>。但在 2002—2005 年云南省植被呈现下降趋势,造成这种情况的原因是云南省高频的气象灾害(干旱、冰雹等)和自然灾害(地震、滑坡等)。

降水、气温、风速等气候因子在 2001—2014 年和 2015—2018 年 2 个时间段对于 NDVI 有很高的解释力。适当的降水、气温有利于植物进行光合作用和蒸腾作用,光合作用的增强,刺激了植被的生长,而蒸腾作用的加剧有利于植物生长所需的营养物质和矿物质的运输<sup>[24-25]</sup>。风速会改变小区域气

温、湿度、二氧化碳浓度等,从而刺激植物的生长发育;与此同时,风速有利于植物种子的传播,便于植物的大面积增长<sup>[26]</sup>。相比于气候因子,人为因子对于植被覆盖的影响很小,从单因子角度出发,粮食产量是反映植被覆盖的关键因素,其次是农林牧渔业总产值,这可能由于云南省部分地区属于山区,地势复杂,人为干涉的力度较小。

由于生态系统的复杂性,植被的生长受到多种因素的共同作用,本文不仅从单因子角度解释了各驱动因子对于植被的影响,同时也探明了两两因子的耦合作用,明晰了各驱动因素的耦合作用对于植被生长的影响。与此同时,本文将人为因子定量化,较之前的定性化描述,可以直观的显示出各人为因子对植被生长的影响。虽然部分植被生长指标的变化可以从气候因素和人为因素角度解释,但在以往的研究中,其他的决定因素可能对植被动态也有影响,例如太阳辐射、二氧化碳的施肥效应和土壤性质(土壤总磷、土壤含水量)等<sup>[21]</sup>。由于气候因子对土壤微生物活性和土壤养分的影响与植物生长密切相关,因此在今后的研究中应重视植被与土壤因子的关系。

5 结论

本文利用 MODIS 数据,获得研究区 2001—2018 年共 18 个时相的植被覆盖情况,在此基础上分析了



研究区植被的时空变化趋势;应用地理探测器模型的因子探测器、风险探测器和交互探测器分别定量探测出单因子和多因子交互作用对植被时空变化的影响,得出如下结论:

(1) 云南省植被总体呈上升趋势:2001—2014 年呈稳定增加趋势(1.5%/10a),2015—2018 呈快速增加(6.4%/10a);上升区域主要分布在滇东北、滇东南、滇西北地区;减少区域主要分布在滇中部;滇西地区变化相对稳定。

(2) 气温、风速和降水因子对云南植被变化影响较为显著,其次社会经济因素对云南植被变化也有一定的影响,植被和土壤对云南植被变化的影响最弱。2001—2018 年云南植被变化影响因素地理探测器结果显示,多年平均降水量(解释力为 0.2384)和多年平均气温(解释力为 0.2069)是主控因素。

(3) 云南省植被时空变化不是只与一种影响因素有关,而是多种因子协同作用的结果。与单因子相比,多因子交互作用对植被时空变化影响具有协同增强作用。2001—2018 年,风速与降水(交互解释力为 0.3262)、风速与气温(交互解释力为 0.3040)以及降水与城乡居民可支配收入(交互解释力为 0.2924)的交互作用对云南植被变化的影响最为显著。

(4) 对比三阶段地理探测器结果,云南省植被变化受人类活动的影响逐年增强。人口、城乡居民可支配收入、粮食产量等人类活动因子对云南植被变化解释力逐年增强。云南经济发展、社会城市化建设等对生态平衡的影响越来越严重。

## 参考文献 (References)

- [1] QU Sai, WANG Lunche, LIN Aiwen, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**:438–450. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.029
- [2] 马梓策,于红博,曹聪明,等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(6):1310–1321. [MA Zice, YU Hongbo, CAO Congming, et al. Spatiotemporal characteristics of fractional vegetation coverage and its influencing factors in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(6):1310–1321] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202006006
- [3] WHITE M A, ASNER G P, NEMANI R R, et al. Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems: Digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**(1):45–57. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00119-X
- [4] XU Yufeng, YANG Jing, CHEN Yanning. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, **126**(1–2):213–222. DOI: 10.1007/s00704-015-1572-1
- [5] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等. 近 15 年中国西南地区植被动态变化[J]. *国土资源遥感*, 2017, **29**(3):128–136. [ZHENG Zhaoju, ZENG Yuan, ZHAO Yujin, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in southwestern China over the past 15 years based on MODIS data [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, **29**(3):128–136] DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.03.19
- [6] PENG Li, DENG Wei, ZHANG Hao, et al. Focus on economy or ecology? A three-dimensional trade-off based on ecological carrying capacity in southwest China [J]. *Natural Resource Modeling*, 2018, **32**(2):1–16. DOI: 10.1111/nrm.12201
- [7] 李同艳,何云玲,熊巧利. 云南中部地区植被覆盖时空变化特征及其影响因素研究[J]. *生态科学*, 2019, **38**(3):45–54. [LI Tongyan, HE Yunling, XIONG Qiaoli. Study on the spatial-temporal variation and associated driving forces of vegetation coverage in central Yunnan [J]. *Ecological Science*, 2019, **38**(3):45–54] DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.03.006
- [8] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(9):1425–1435. [ZHANG Jinghua, FENG Zhiming, JIANG Luguang, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(9):1425–1435] DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.09.001
- [9] 熊俊楠,彭超,程维明,等. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2018, **20**(12):1830–1840. [XIONG Junnan, PENG Chao, CHENG Weiming, et al. Analysis of vegetation coverage change in Yunnan province based on MODIS-NDVI [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, **20**(12):1830–1840] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180371
- [10] 徐虹,刘琴. 2001—2009 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(1):162–168. [XU Hong, LIU Qin. Analysis of vegetation NDVI dynamic and its relationship with climatic factors in Yunnan province during 2001–2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(1):162–168] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.01.018
- [11] 刘世梁,田韞钰,尹艺洁,等. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应[J]. *生态学报*, 2016, **36**(15):4699–4707. [LIU Shiliang, TIAN Yanyu, YIN Yijie, et al. Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions

- in Yunnan province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4699–4707] DOI: 10.5846/stxb201501030006
- [12] 李东梅, 高正文, 付晓, 等. 云南省生态功能类型区的生态敏感性[J]. *生态学报*, 2010, **30**(1): 138–145. [LI Dongmei, GAO Zhengwen, FU Xiao, et al. Characteristic of ecological sensitivity in Yunnan ecological zones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(1): 138–145]
- [13] 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 Wenjie, GONG Zhaoning, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north China plain from 1981 to 2013 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 576–592] DOI: 10.5846/stxb201507301600
- [14] 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 prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116–134] DOI: 10.11821/dlxb201701010
- [15] RAGHAVAN R K, BRENNER K M, HARRINGTON J A, et al. Spatial scale effects in environmental risk-factor modelling for diseases [J]. *Geospatial Health*, 2013, **7**(2): 169–182. DOI: 10.4081/gh.2013.78
- [16] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J]. *测绘学报*, 2015, **44**(S1): 96–101. [XU Qiurong, ZHENG Xinqi. Analysis of influencing mechanism of urban growth using geographical detector [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(S1): 96–101] DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.F064
- [17] 孟梦, 牛铮. 近 30a 内蒙古 NDVI 演变特征及其对气候的响应[J]. *遥感技术与应用*, 2018, **33**(4): 676–685. [MENG Meng, NIU Zheng. Change characteristic of NDVI and its response to climate change in Inner Mongolia over the past 30 years [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, **33**(4): 676–685] DOI: 10.11873/j. issn. 1004–0323.2018.4.0676
- [18] RUI Yichao, WANG Yanfen, CHEN Chengrong, et al. Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai–Tibet Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2012, **357**: 73–87. DOI: 10.1007/s11104–012–1132–8
- [19] 韦振锋, 任志远, 张翀. 近 12 年广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征[J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(5): 33–44. [WEI Zhenfeng, REN Zhiyuan, ZHANG Chong. Research on vegetation response to temperature and precipitation in Guangxi in recent 12 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(5): 33–44]
- [20] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力[J]. *生态学报*, 2015, **35**(22): 7377–7386. [SONG Naiping, DU Lingtong, WANG Lei. Vegetation dynamics over 2000–2012 and its driving factors in Yanchi county, Ningxia province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7377–7386] DOI: 10.5846/stxb201403050374
- [21] 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, 2016. [PANG Jing. Geographical detector-based identifying the impact of natural and human factors on vegetation changes [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016]
- [22] 郝成元, 吴绍洪, 王海江. 滇南地区植被景观时空异质性及其成因[J]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 223–230. [HAO Chengyuan, WU Shaohong, WANG Haijiang. Analysis on spatio-temporal heterogeneity of vegetation landscape and its cause in southern Yunnan province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(1): 223–230]
- [23] YU Deyong, PAN Yaozhong, LIU Xin, et al. Measurement of ecological capital of ecosystem in Yunnan province based on remote sensed data from 2001 to 2004 [C]. 2006 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 31 July 2006–04 August 2006, Denver, USA: IEEE, 2006, **1–8**: 2685–2688.
- [24] TAO Zexing, WANG Huanjiang, LIU Yachen, et al. Phenological response of different vegetation types to temperature and precipitation variations in northern China during 1982–2012 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**(11): 3236–3252. DOI: 10.1080/01431161.2017.1292070
- [25] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. *生态学报*, 2018, **38**(6): 2229–2238. [JIAO Kewei, GAO Jiangbo, WU Shaohong, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 2229–2238] DOI: 10.5846/stxb201702240305
- [26] 孙倩, 张敏, 曾永兵, 等. 艾比湖流域降水和风速对植被 NDVI 时空变化的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, **31**(11): 194–199. [SUN Qian, ZHANG Min, ZENG Yongbing, et al. Effect of precipitation and wind speed on NDVI in Aibi Lake [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, **31**(11): 194–199] DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2018.11.030

## Driving Force of Vegetation Cover Change in Yunnan Province from 2001 to 2018

WANG Yonghong<sup>1</sup>, LU Heng<sup>2\*</sup>

(1. College of Information and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China;

2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Vegetation plays an important role in regulating ecological process and evaluating the environmental quality of an ecosystem. Yunnan province is a region with the richest biodiversity in China and the most significant biodiversity in the world. It is a typical ecological environment fragile area, susceptible to climate change. Most of the past studies were performed on small scale and based on a single watershed; and some investigations on vegetation differentiation were limited to the relationship between single factor and vegetation, ignoring the influence of natural factors and human factors on the spatial differentiation of vegetation; Therefore, past research lacks integrity and cannot comprehensively clarify the dynamic changes and driving forces of vegetation in Yunnan province from time and space. In this study, it collected MODIS data from 2001 to 2018 to reveal the spatio-temporal patterns and driving forces of vegetation change in Yunnan province by using a spatio-temporal analysis model and Geodetector model. We have the following results: (1) Vegetation had a slow growth trend from 2001 to 2014 (1.5%/10a) in Yunnan, and a fast growth trend from 2014 to 2018 (6.4%/10a). (2) Vegetation in northeast Yunnan, and the southeast and the northwest stood for the most growing areas. (3) Temperature and precipitation factors had the most significant effects on vegetation change in Yunnan, followed by socio-economic factors; Vegetation type and soil type had the weakest effect on vegetation change in Yunnan. (4) The spatial distribution and differentiation of vegetation in Yunnan province from 2001 to 2018 were attributed to joint actions of social and natural factors, and all factors had synergistic enhancement effect under interaction. The interaction between wind speed and precipitation (0.3262) had the most significant impact on vegetation change in Yunnan, and interaction between wind speed and air temperature (0.3040) also mattered a lot, as well as precipitation and disposable income of urban and rural residents (0.2924). This research could provide a sound support for environmental quality evaluation in Yunnan.

**Key words:** vegetation change; influencing factors; spatio-temporal pattern; geodetector; Yunnan province