

# 滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素

丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 揭示滇中地区植被 NDVI 时空变化特征及其与气候因子、人类活动的关系, 为该地区的社会经济可持续发展提供科学依据。[方法] 以 MODIS NDVI 数据资料集、标准气象站点的气候数据及社会经济统计数据为素材, 采用叠置分析、空间统计分析和相关分析为主要方法。[结果] (1) 滇中地区植被 5 月上旬进入生长季而 10 月下旬结束, 2001—2010 年植被 NDVI 呈现出上升的趋势, 速率为 0.03/10 a, 植被盖度整体朝增加的方向发展。(2) 2001—2010 年滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%, 减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围, 增加的区域主要集中在高海拔地区。(3) 气候影响因素中的水分类因素即平均相对湿度、最小相对湿度和降水是滇中地区植被 NDVI 年内变化主要的影响因素。(4) 退耕还林工程极大地提升了滇中地区的植被盖度, 而城镇化过程则使得滇中地区城镇周边的极低、低植被覆盖度区面积增加。[结论] 滇中地区年内植被 NDVI 变化由气候因子所控制, 而长期变化则受人类活动的制约。

**关键词:** 植被 NDVI; 时空变化; 气候因子; 退耕还林; 滇中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0252-06

中图分类号: Q948.11

**文献参数:** 丁文荣. 滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 252-257. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.042

## Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Vegetation NDVI and Its Driving Factors in Central Yunnan Province

DING Wenrong

(College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The relationships between NDVI and the impacting variables of climatic factors and human activity in central Yunnan Province were demonstrated to provide scientific basis for the sustainable social and economic development of the Province. [Methods] MODIS NDVI (normal difference vegetation index, NDVI) data sets, climate data from standard meteorological stations and socio-economic statistical source were dealt with overlay method, spatial statistical analysis and correlation analysis to study the characteristics of temporal and spatial variation of vegetation NDVI. [Results] Vegetation growing season in Central Yunnan Province starts from early May and ends around late October. From 2001 On 2010, vegetation NDVI showed a rising trend and a rate of 0.03/10 a. Though vegetation coverage area showed an increasing trend overall, there still existed decreases region for vegetation coverage in Central Yunnan Province. The increased and decreased area covered 70.24% and 29.76% of the total area of central Yunnan Province. The most prominent areas with decreased vegetation NDVI were found mainly around the people-centered cities and towns; and the increased areas were mainly in the high-altitude. The average relative humidity, minimum relative humidity and precipitation were the main factors affecting the annual change of vegetation NDVI. The implementation of returning farm land to forestry played a key role for the enhancement of vegetation coverage in Central Yunnan Province; On the contrary, the process of urbanization led to vegetation degradation. [Conclusion] The short term change of vegetation NDVI in central Yunnan Province, for example, the an-

收稿日期: 2015-10-13

修回日期: 2016-06-06

资助项目: 云南省教育厅重点项目“金沙江下游龙川江流域水沙输移过程及机制研究”(2015Z056); 国家自然科学基金项目(41101099; 41261044)

第一作者: 丁文荣(1979—), 男(彝族), 云南省昆明市人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: dingwenrong@163.com.

nual change was determined by climatic factors; While long-term change was mainly affected by human activities.

**Keywords:** vegetation NDVI; temporal and spatial variation; climatic factors; returning land for farming to forestry; central Yunnan Province

植被是地理环境的重要组成部分,归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是目前最为常用的表征植被状况的指标,与叶面积指数、土地利用、植被覆盖度、生物量等密切相关。国内外学者对 NDVI 的驱动因子尤其是气候要素与植被 NDVI 之间的关系进行了系统研究,发现气温、降水与植被 NDVI 变化最为密切,它们之间的关系具有显著的空间差异<sup>[1]</sup>。国外对植被 NDVI 变化的研究表明,北半球中高纬地区植被活动显著增加,气候变暖导致全球部分地区植被覆盖发生显著变化<sup>[2]</sup>,这在我国东北、华北、青藏高原等地区的研究中也得到了体现<sup>[3-5]</sup>。此外,现有的研究<sup>[6]</sup>结果表明,农业生产与植被恢复会导致植被 NDVI 增加,而植被分布及变化与人口密度、单位 GDP 等呈显著负相关。

滇中地区是云南省的政治、经济和文化中心与交通枢纽。2015 年的统计结果表明,该区域人口 1 702.8 万人,占该省总人口的 37.4%;城镇化水平为 40%左右,该区的城镇化决定了云南省城镇化水平的总体进程;GDP 占该省的 57.8%,人均 GDP 约为 19 400 元,是全省人均 GDP 的 1.55 倍,已成为云南省的名副其实经济核心区。近年来,研究者开始关注滇中地区植被覆盖的变化状况,如赵文君等<sup>[7]</sup>通过 Modis 1B 数据计算了 2009—2013 年滇中地区 NDVI 月时间序列数据,并利用相关性分析和差值分析定量描述了农田、森林、灌丛和草地 4 种绿色覆盖 NDVI 年内变化曲线在年际时间尺度上的协同性和差异性。王金亮等<sup>[8]</sup>利用 1982—2001 年近 20 a 的 AVHRR 8 km 的 NDVI 数据集,研究了云南省的植被指数变化特征,结果表明滇中地区植被有明显的季节差异和空间差异,植被 NDVI 变化幅度介于滇东北和全省植被 NDVI 变化之间。可见,目前针对滇中地区植被的研究已取得了一些有意义的成果,但这些研究成果仍然无法清晰揭示区内植被的演变特征及其主要驱动因素。基于此,本研究以滇中地区 Modis NDVI 植被数据集为基础,对滇中地区近年来植被覆盖的时空特征进行系统分析,探讨滇中地区植被 NDVI 的时空变化规律及驱动因素,及时为滇中地区的社会经济可持续提供科学依据。

## 1 研究区概况

滇中地区包括昆明市、玉溪市、曲靖市和楚雄彝族自治州 4 个州市,地理位置位于 100° 45'—

104° 48' E 和 23° 20'—27° 02' N 之间,面积约  $1.10 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占云南省国土面积的 27.92%。地势北高南低,起伏和缓,大部分地区海拔在 1 500~2 800 m 之间,以山地和山间盆地地形为主,集中了云南全省近 1/2 的山间平地(坝子)。多年平均气温 15.1 °C,年日照时数平均为 2 448.7 h,无霜期 227 d,年降雨量 1 035 mm,属典型的亚热带季风气候,干湿季分明。土壤类型以山原红壤为主,北部金沙江一带发育有干旱河谷特有的燥红土。植被类型多样,以次生植被和人工植被。由于滇中地区位于长江、珠江和红河的上游或源区,并有滇池、抚仙湖、星云湖和阳宗海等高原湖泊,水资源保障程度较高,但水质性缺水问题较为严重。

## 2 数据与方法

本研究所用数据主要包括 Modis NDVI 植被数据、气象数据和社会经济数据等。NDVI 数据为 NASA MODIS 陆地产品组根据统计算法开发的 MODIS 植被指数产品 MOD<sub>13</sub> Q<sub>1</sub>,其时间跨度为 2001 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日,时间分辨率为 1 日,空间分辨率为 1 000 m,是在已有的植被指数的基础上改进设计的。对所获得的 MOD<sub>13</sub> Q<sub>1</sub> 遥感数据集进行子集提取、图像镶嵌、数据格式转换、投影转换及质量检验等预处理后,采用最大值合成 MVC (maximum value composites)法<sup>[9]</sup>和均值法对 Modis NDVI 数据进行计算,获得质量可靠的植被 NDVI 旬和年时间尺度数据集。其中,MVC 法可以进一步消除云、大气、太阳高度角等的干扰,计算公式为:

$$\text{NDVI}_{mi} = \max(\text{NDVI}_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $\text{NDVI}_{mi}$  ——第  $i$  个 10 d 周期的 NDVI 最大值合成值;  $\text{NDVI}_{ij}$  ——第  $i$  个 10 d 周期内第  $j$  天的 NDVI 值。

在统计整个区域的 NDVI 值时,采用均值法进行计算,计算公式为:

$$\text{NDVI}_a = \sum \text{NDVI}_{x,y/n} \quad (2)$$

式中:  $\text{NDVI}_a$  ——区域的 NDVI 平均值;  $x$  ——统计区域像元行数;  $y$  ——统计区域内像元列数;  $n$  ——统计区域内像元总数。

气象数据为 2001 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日滇中地区内 41 个站点资料(图 1),该数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)和云南省气象局资料中心,经过严格的质

量控制,包括连续性检验、极值检验和时间一致性检验。对收集到气候资料,首先处理为每个站点的旬值数据,然后采用泰森多边形法<sup>[10]</sup>将不同站点的气象数据转化为滇中地区的面值气象数据。

社会经济数据主要来源于 2000—2010 年的云南省统计年鉴。

### 3 滇中地区植被 NDVI 变化特征

#### 3.1 植被 NDVI 时间变化

植被覆盖度可由遥感影像反演的 NDVI 充分反映,与 NDVI 呈正相关,即植被覆盖度愈好,NDVI 值愈大<sup>[11]</sup>。统计结果表明,2001—2010 年滇中地区 NDVI 的旬平均值为 0.56。从图 1 可以看出,就逐旬

来看,滇中地区 NDVI 值变化非常明显,呈单峰型,波动于 0.49~0.68 之间,4 月下旬为一年中的最低值 0.49,而 9 月下旬达最高值 0.68。4 月下旬达到最低值后,逐步开始回升,5 月上旬进入生长季后 6 月缓慢上升,7,8 月升速最快,9 月下旬达到峰值,10 月下旬生长季结束后开始下降,并一直持续到翌年 5 月份。从年际来看,最大化年值 NDVI 数据散点图中(图 1),能清晰看出在研究时段内年均植被 NDVI 波动于 0.53~0.59 之间,2001 年 0.53 为最低值,而 2006 年 0.59 则为最高值。2001—2010 年植被 NDVI 呈现出波动上升的趋势,速率为 0.03/10 a,表明滇中地区植被得到恢复,总体来看覆盖度呈现增加的态势。

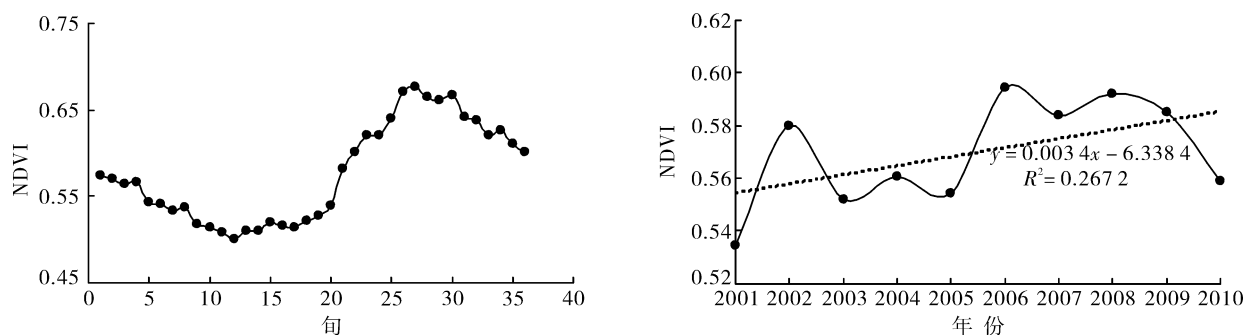


图 1 滇中地区植被 NDVI 年内和年际变化

为探讨滇中地区植被 NDVI 年际变化特征,根据中国水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[12]</sup>,将滇中地区 NDVI 值划分为 5 级,分级标准为:NDVI < 0.10 时为极低植被覆盖度,0.10 ≤ NDVI < 0.30 时为低植被覆盖度,0.30 ≤ NDVI < 0.50 时为中植被覆盖度,0.50 ≤ NDVI < 0.70 时为中高植被覆盖度和 NDVI ≥ 0.70 时为高植被覆盖度。起止年份 2001 和 2010 年各级别植被 NDVI 变化状况详见表 1。从表 1 可以看出,滇中地区植被覆盖面积最大的分别是中植被覆盖度区和中高植被覆盖度区,2001

年两者分别占滇中地区总面积的 32.62% 和 64.67%,而 2010 年两者则分别占 23.97% 和 70.61%。此外,从表 1 也可以看出,自 2001—2010 年,滇中地区各级别植被 NDVI 变化存在很大差异。除了中植被覆盖度区面积呈现出减少趋势外,其它等级植被覆盖度区面积都呈现出增加的趋势。其中极低植被覆盖度区面积增加了 27.86 km<sup>2</sup>,低植被覆盖度区面积增加了 174.57 km<sup>2</sup>,中植被覆盖度区面积增加了 6 526.79 km<sup>2</sup>,而高植被覆盖度区面积则增加了 2 780.55 km<sup>2</sup>。

表 1 滇中地区 2001—2010 年 NDVI 变化序列

年份	极低覆盖度		低覆盖度		中覆盖度		中高覆盖度		高覆盖度	
	数值	比例	数值	比例	数值	比例	数值	比例	数值	比例
2001	267.42	0.24	751.66	0.68	35 879.25	32.62	71 139.16	64.67	1 962.49	1.78
2010	295.28	0.27	926.23	0.84	26 369.49	23.97	77 665.96	70.61	4 743.04	4.31
变化	27.86		174.57		-9 509.77		6 526.79		2 780.55	

注:植被覆盖度面积单位为 km<sup>2</sup>,各占当年滇中地区总面积的比例单位为 %。

#### 3.2 植被 NDVI 空间变化

采用空间叠置分析方法,统计了滇中地区 2001—2010 年的植被 NDVI 变化情况,结果如图 2

所示。从统计结果来看,自 2001—2010 年:NDVI 值减少 0.2 以上的区域为 134.64 km<sup>2</sup>,约占滇中总面积的 0.12%;NDVI 值减少 0.2~0.1 的区域为

1 022.80 km<sup>2</sup>, 约占滇中面积的 0.93%; 面积减少了 0.1~0.0 的区域为 31 578.20 km<sup>2</sup>, 约占滇中面积的 28.71%; NDVI 值增加 0.0~0.1 的区域为 73 258.58 km<sup>2</sup>, 约占滇中面积的 66.60%; NDVI 值增加 0.1~0.2 的区域为 3 986.27 km<sup>2</sup>, 约占滇中面积的 3.62%; NDVI 值增加 0.2 以上的区域为 19.50 km<sup>2</sup>, 约占滇中面积的 0.02%。整体而言, 滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%。可见, 经过多年持续不断的植被恢复和保护后, 当地的植被覆盖整体上得到了有效提升。从图 2 中还可以看出, 植被 NDVI 减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围, 如环滇池一带的昆明市区、玉溪市首府所在地的红塔区、曲靖市首府所在地的麒麟区和楚雄彝族自治州首府所在地楚雄市的外围。此外, 区内一些重要的经济开发区、基础设施建设区也减少突出, 如嵩明县杨林工业园区、陆良县工业园区和昆明长水国际机场等区域植被 NDVI 均降低突出。再者, 植被 NDVI 有微弱减少的区域还集中在南盘江、元江和普渡河干流沿线一带。此外, 滇中地区植被主要为增加为主, 增加最为显著的区域主要集中在高海拔山区, 如昆明市与曲靖市交界的梁王山一带、玉溪市的哀牢山山区、曲靖市的乌蒙山山区、昆明市与楚雄市交界的三台山山区等。

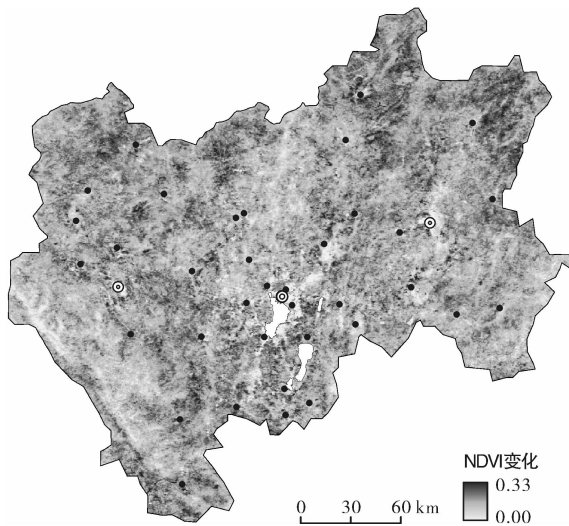


图 2 滇中地区植被 NDVI 空间变化

## 4 滇中地区植被 NDVI 变化的驱动因素

植被 NDVI 的时空变化影响要素是多方面的, 可以概括为自然方面和人为影响方面。短时间尺度

上自然因素特别是降水与气温变化往往是导致植被 NDVI 变化的主控因子, 长时间尺度上人类活动尤其是土地开发利用影响突出<sup>[13]</sup>。故此, 本研究分别从气候要素和人类活动的主要方面展开研究。

### 4.1 气候因子与植被 NDVI 变化

已有研究<sup>[3]</sup>表明, 气候对植被覆盖的影响主要表现为对植被生长期年内韵律的控制方面。本研究采用相关分析法计算了 2001—2010 年滇中地区 NDVI 旬值序列与同旬降水量、平均气温、日照时数、平均风速和平均气压等 10 个气候因子的相关系数(表 2)。结果表明, 滇中地区植被 NDVI 与各气候因子的同期相关性从大到小排序为: 平均相对湿度>最小相对湿度>降水>最高气温>日照时数>平均水汽压>平均气压>平均气温>最低气温和风速。可以看出, 从旬时间尺度来看, 植被 NDVI 是各气候要素综合作用的结果, 但与单个气候要素的相关系数都很小, 均未超过 0.25。植被生长对气候因子的响应存在一定的滞后效应, 为分析这种滞后效应, 本研究计算了滇中地区植被 NDVI 旬值与前 1—15 旬气候因子的相关系数, 相关系数最大值代表相关性最强(表 2)。其中, 若相关系数最大值所对应的当前旬, 表明无滞后, 反之即表示为滞后, 相关系数最大值对应旬即为滞后的旬数。从表 2 可以看出, 就水分类气候因子, 对于 NDVI 而言, 除了平均水汽压滞后为 7 旬外, 降水量、平均相对湿度和最小相对湿度的滞后期为 4 旬和 5 旬, 即有 2 个月左右的滞后期。对于温度类气候因子, 平均气温和最低气温滞后期均为 8 旬, 最高气温滞后期为 10 旬, 即有 3 个月左右的滞后期。对应其它类型的气候因子而言, NDVI 对平均气压仅有 1 旬的滞后时间, 而风速和日照时数的滞后期分别为 4 旬和 5 旬, 即 2 个月左右。

### 4.2 人类活动与植被 NDVI 变化

人类活动对植被的影响分为正面效应(如退耕还林还草等生态工程)和负面效应(如城市扩展、人为森林破坏等)<sup>[14]</sup>, 退耕还林还草工程对区域生态环境的恢复和改善起到了巨大作用<sup>[15-16]</sup>。云南省退耕还林工程自 2000 年开始试点、2002 年全面启动以来, 工程建设进展顺利。其中, 滇中地区内的昆明市、曲靖市和楚雄州均于 2000 年启动实施国家退耕还林工程, 玉溪市也自 2002 年启动实施退耕还林工程。由于这些工程的实施, 使滇中地区总退耕还林面积达 854.05 km<sup>2</sup>, 荒山荒地造林及封山育林面积分别达 1 514.74 和 241.49 km<sup>2</sup>(表 3), 植被覆盖呈现逐渐上升的趋势, 表明生态工程的实施有效改善了区域生态环境, 极大地提升了滇中地区的植被整体覆盖程度。

这是滇中地区中高植被覆盖度和高植被覆盖度区面积增加的主要因素。此外,城市扩展往往导致城市周边植被遭到破坏,引起植被覆盖下降。如昆明市 1992 年以来,以老城区为核心并以年平均增长率 3.9% 的速度迅速向东南、西南和东北方向扩张<sup>[17]</sup>,导致城市

周边地区植被覆盖表现出下降趋势(图 2),说明城市扩张是导致植被覆盖下降的重要驱动因素。这在玉溪市、曲靖市和楚雄市首府所在地也有明显的体现,揭示了滇中地区极低植被覆盖度和低植被覆盖度区面积增加的主要原因。

表 2 植被 NDVI 旬序列与气候因子相关系数

旬号	$P$	$R_{\text{mean}}$	$R_{\text{min}}$	$V$	$T_{\text{mean}}$	$T_{\text{min}}$	$T_{\text{max}}$	$S$	$W$	$P_v$
当前旬	0.123*	0.239**	0.139**	0.043	0.010*	0.007	0.121*	0.061	-0.318**	0.039
前 1 旬	0.144**	0.366**	0.319**	0.145**	0.021	0.018	0.137**	-0.030	0.366**	0.052
前 2 旬	0.134*	0.388**	0.347**	0.237**	0.028	0.110*	0.044	0.021	0.372**	0.012
前 3 旬	0.277**	0.448**	0.422**	0.328**	0.101	0.192**	0.011	0.006	0.386**	-0.008
前 4 旬	0.251**	0.481**	0.476**	0.383**	0.149**	0.243**	0.055	0.061	0.431**	-0.013
前 5 旬	0.430**	0.475**	0.450**	0.436**	0.216**	0.310**	0.117*	0.090	0.407**	-0.142**
前 6 旬	0.338**	0.451**	0.458**	0.489**	0.307**	0.386**	0.216**	0.056	0.382**	0.019
前 7 旬	0.368**	0.393**	0.420**	0.510**	0.373**	0.440**	0.288**	-0.013	0.324**	-0.090
第 8 旬	0.325**	0.305**	0.338**	0.507**	0.412**	0.478**	0.395**	-0.002	0.283**	-0.088
前 9 旬	0.296**	0.253**	0.277**	0.493**	0.467**	0.490**	0.427**	0.027	0.208**	-0.079
前 10 旬	0.310**	0.197**	0.234**	0.471**	0.421**	0.472**	0.452**	0.046	0.181**	-0.111*
前 11 旬	0.336**	0.213**	0.236**	0.451**	0.452**	0.467**	0.418**	0.077	0.148**	-0.068
前 12 旬	0.286**	0.115*	0.150**	0.403**	0.472**	0.463**	0.449**	0.019	0.035	-0.143*
前 13 旬	0.256**	0.116*	0.162**	0.350**	0.401**	0.405**	0.371**	0.040	0.021	0.043
前 14 旬	0.193**	-0.007	0.051	0.269**	0.376**	0.361**	0.363**	0.013	0.136*	0.043
前 15 旬	0.138*	-0.096	-0.046	0.189**	0.332**	0.294**	0.344**	0.047	0.166**	0.025

注:\*\*指通过 0.01 显著性检验;\*为通过 0.05 显著性检验。 $P$  为 20~20 时降水量, $R_{\text{mean}}$  为平均相对湿度, $R_{\text{min}}$  为最小相对湿度, $V$  为平均水汽压, $T_{\text{mean}}$  为平均气温, $T_{\text{min}}$  为日最低气温, $T_{\text{max}}$  为日最高气温, $S$  为日照时数, $W$  为平均风速, $P_v$  为平均气压。

表 3 滇中地区退耕还林现状

km<sup>2</sup>

州市名称	统计时段	退耕地还林	荒山荒地造林	封山育林	合计
昆明市	2000—2010 年	167.34	297.35	28.04	492.73
玉溪市	2002—2010 年	168.01	263.35	108.04	539.39
曲靖市	2000—2010 年	263.35	537.36	91.34	892.04
楚雄州	2000—2010 年	255.36	416.69	14.07	686.11

## 5 结论

(1) 滇中地区年内植被 NDVI 旬值变动于 0.49~0.68 之间,2001—2010 年植被 NDVI 呈现出上升的趋势,速率为 0.03/10 a。整体而言,滇中地区植被覆盖呈增加和减少趋势的面积分别占总面积的 70.24% 和 29.76%,减少最为突出的区域主要集中在人口聚集的城镇周围,增加的区域主要集中在高海拔山区。

(2) 气候影响因素中的水分类因素即平均相对湿度、最小相对湿度和降水是滇中地区植被 NDVI 年内变化主要的影响因素。植被 NDVI 对水分类因子有 2 个月左右的滞后期,对温度类气候因子有 3 个月左右的滞后期。

(3) 滇中地区退耕还林工程的实施,极大地提升了滇中地区的植被整体覆盖程度,使滇中地区中高植被覆盖度和高植被覆盖度区面积增加,而城镇化过程则使得滇中地区极低植被覆盖度和低植被覆盖度区面积增加。

### [参 考 文 献]

- [1] Nemani R, Keeling C D, Hashimoto H. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 2003, 300 (5625): 1560-1563.
- [2] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. Nature, 1993, 363 (6426): 234-40.
- [3] 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[J]. 2014, 34(7):882-887.
- [4] 毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982—2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析[J]. 地理科学, 2012, 32(9):1106-1111.
- [5] 张晓克, 鲁旭阳, 王小丹. 2000—2010 年藏北申扎县植被 NDVI 时空变化与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2014, 32(4):475-480.
- [6] 侯光雷, 张洪岩, 郭聘, 等. 长白山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子敏感性[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3):285-292.
- [7] 赵文君, 谢飞帆. 利用 Modis-NDVI 时序数据分析滇中地区绿色覆被的变化特征[J]. 价值工程, 2014, 33(22):320-321.
- [8] 王金亮, 高雁. 云南省近 20 a 植被动态变化遥感时序分析[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(6):1-7.
- [9] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11):1417-1434.
- [10] 朱求安, 张万昌, 赵登忠. 基于 PRISM 和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J]. 地理科学, 2005, 25(2):233-238.
- [11] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 a 来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011, 31(8):1019-1024.
- [12] 水利部. GB/SL190-2007. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2008.
- [13] 安如, 徐晓峰, 杨仁敏. 三江源区植被 NDVI 对区域气候的时滞效应分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2):1-6.
- [14] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5):705-716.
- [15] 周洪建, 王静爱, 李睿, 等. 基于 SPOT-VEG NDVI 和降水序列的退耕还林(草)效果分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4):70-74.
- [16] 杨延征, 赵鹏祥, 郝红科, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的陕北植被覆盖时空变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7):1897-1903.
- [17] 赵璐, 苏怀. 基于遥感影像的 1992—2006 年昆明市城区扩张及驱动力分析[J]. 中国科技纵横, 2011, 35(10):17-19.

(上接第 251 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 余新晓, 张志强, 陈丽华, 等. 森林生态水文[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [2] 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 等. 云南高原金沙江流域森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):165-169.
- [3] 石媛, 鲁绍伟, 陈波, 等. 河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):92-97.
- [4] 王伟伟. 栓皮栎林分枯落物对土壤-植物系统水分运动的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3):105-111.
- [5] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14):3807-3819.
- [6] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 等. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(12):4105-4114.
- [7] 李学斌, 陈林, 张硕新, 等. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态[J]. 生态学报, 2012, 32(20):6575-6583.
- [8] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6):48-53.
- [9] Slodicak M, Novak J, Skovsgaard J P. Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 209(1/2):157-166.
- [10] 璩芳, 张万军, 刘秀萍. 太行山低山区枯落物分解及主要营养元素变化[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6):41-45.
- [11] 寇萌, 焦菊英, 尹秋龙, 等. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1337-1349.
- [12] 李荣, 张文辉, 何景峰, 等. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响. 应用生态学报, 2011, 22(1):14-20.
- [13] 尤健健, 张文辉, 邓磊. 黄龙山不同郁闭度油松中龄林林木形质评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):1945-1953.
- [14] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学, 2010, 46(10):6-14.
- [15] 马正锐, 程积民, 班松涛, 等. 宁夏森林枯落物储量与持水性能分析[J]. 水土保持学报, 2012, 24(4):199-203.