

doi: 10.6046/zrzyyg.2023037

引用格式: 李益敏,冯显杰,李媛婷,等. 云南省植被覆盖时空变化特征及影响因素研究[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 116-125. (Li Y M, Feng X J, Li Y T, et al. Exploring the spatio-temporal variations and influencing factors of vegetation cover in Yunnan Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(2): 116-125.)

云南省植被覆盖时空变化特征及影响因素研究

李益敏^{1,2}, 冯显杰³, 李媛婷³, 杨雪¹, 向倩英³, 计培琨¹

(1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 昆明 650500; 3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500)

摘要: 云南省物种资源丰富但生态系统十分脆弱, 生态环境脆弱性保护与植被覆盖联系紧密。为此, 该文采用 2000—2022 年 MODIS Q1 数据集的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 利用最大值合成法(maximum value composite, MVC)、Theil-Sen 中位数趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验方法动态监测植被的时空格局变化。利用相关分析方法探讨植被对地形地貌、气候变化及土地覆被等影响因素的响应。研究表明: 2000—2022 年, 云南省整体植被覆盖度较高, 年均 NDVI 值在 0.74~0.90 之间, 呈波动上升趋势, 其中增加趋势的面积占 91.17%, 滇东北增长速率最快; 植被覆盖在地域上存在差异, 滇东南、滇西南的植被覆盖高于滇西北、滇中、滇东北; 在海拔 3 900 m 以下, 云南省 NDVI 值比较稳定, 3 900 m 以上随海拔升高而 NDVI 值呈减少趋势; 坡度 < 3° 时, NDVI 值最低, 随着坡度增加, NDVI 值先增加后降低; 平面坡向的 NDVI 值最低, 除平面坡向外, 其余坡向对植被生长影响较小; 2000—2022 年, 滇中、滇东南、滇东北的植被覆盖与降水呈正相关, 表明降水有利于植被生长; 而滇西南、滇西北与降水呈负相关。全区及各区域的植被覆盖与气温呈正相关, 表明气温有利于植被生长。研究结果可为加强云南省生态环境建设和生态管理提供科学依据。

关键词: MODIS NDVI; 植被变化; Theil-Sen 趋势; Mann-Kendall 检验; 相关性; 云南省

中图法分类号: Q 948 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)02-0116-10

0 引言

植被作为陆地生态系统的的重要组成部分, 在保护生物多样性、维护生态系统功能、改变陆地水循环、调节区域气候及维持地表平衡能量等方面发挥着关键作用^[1]。植被生长易受到地形、气候波动和人类活动等因素干扰, 长期动态监测和评估植被变化对加强生态环境建设和生态管理具有重要意义^[2-5]。随着遥感技术的不断进步, 利用“天-空”遥感数据监测植被生长及生态修复成为最有效的技术手段^[6-7], 目前遥感数据源有 Landsat、MODIS、高分数据等。利用遥感数据计算植被指数可对植被生长状况、季节性变化、植被空间格局特征、生态保护修复等方面开展定性和定量以及不同时间和空间尺度的动态监测, 其中归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI) 是使用最广泛的

指数之一; 通过各种数理统计分析方法探讨植被覆盖与气候、地形、土地覆被类型、人类活动等因素间的联系, 可为生态环境保护修复提供有效依据。郑朝菊等^[8]基于 MODIS—NDVI 数据分析了中国西南地区 2000—2014 年间植被覆盖度动态变化。熊俊楠等^[9]基于 MODIS NDVI 数据分析云南省植被覆盖变化及与地形因子的关系。赵安周等^[10]、刘哲等^[11]、Li 等^[12]基于不同遥感数据和研究方法对黄土高原植被覆盖时空变化格局及归因进行详细的分析。Pang 等^[13]、Chu 等^[14]分别分析青藏高原、阿穆尔—黑龙江流域植被的时空动态变化及降水、温度对植被生长期的影响, 结果表明植被空间异质性明显, 植被生长期会受降水、温度影响。Zougrana 等^[15]评估西非大草原植被覆盖的变化趋势, 结合土地利用/覆盖变化分析植被退化与人类活动的关系, 结果表明植被大量转化为农业和非植被用地, NDVI 会显著下降。

收稿日期: 2023-02-22; **修订日期:** 2023-04-24

基金项目: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目“‘天空地’协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究”(编号: 2019FY003017)、中国地质调查局项目“重要区域地质灾害监测评价与综合遥感地质调查”(编号: DD20221824)和云南大学第二届专业学位研究生实践创新项目“基于多源数据的高海拔山区地形表变动态监测及影响因素”(编号: ZC-22222175)共同资助。

第一作者: 李益敏(1965-), 研究员, 主要从事 3S 技术在山地资源环境和地质灾害中的应用研究。Email: liyimin1965@163.com。

云南省是中国生物多样性和资源的重要基地之一,植被多样性丰富,以亚热带植被为主,在中国发展战略中被定位为“努力成为生态文明建设排头兵”、“筑牢西南生态安全屏障”^[16]。因此,准确掌握云南省植被覆盖变化对云南生物多样性保护、生态文明建设等国家战略部署和动态监管至关重要。研究利用 MODIS NDVI 数据并结合 Theil-Sen 中位数趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验方法及相关性分析法对云南省植被覆盖的时空分布格局、变化特征及影响因素进行研究,旨在为加强云南省生态环境建设和生态管理提供科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

云南省(简称滇),位于 E97°31'~106°11',N21°8'~29°15'之间,全省地势西北高、东南低,自北向南呈阶梯状逐级下降,可按地形地貌特征分为 5 个区域:滇西北、滇西南、滇中、滇东北与滇东南(图 1(a))。全省气候呈亚热带高原季风型,气温年较差小、日较差大,且气温的空间分布与海拔和纬度密切相关。省内海拔高差大,各区域气候差异明显,滇西

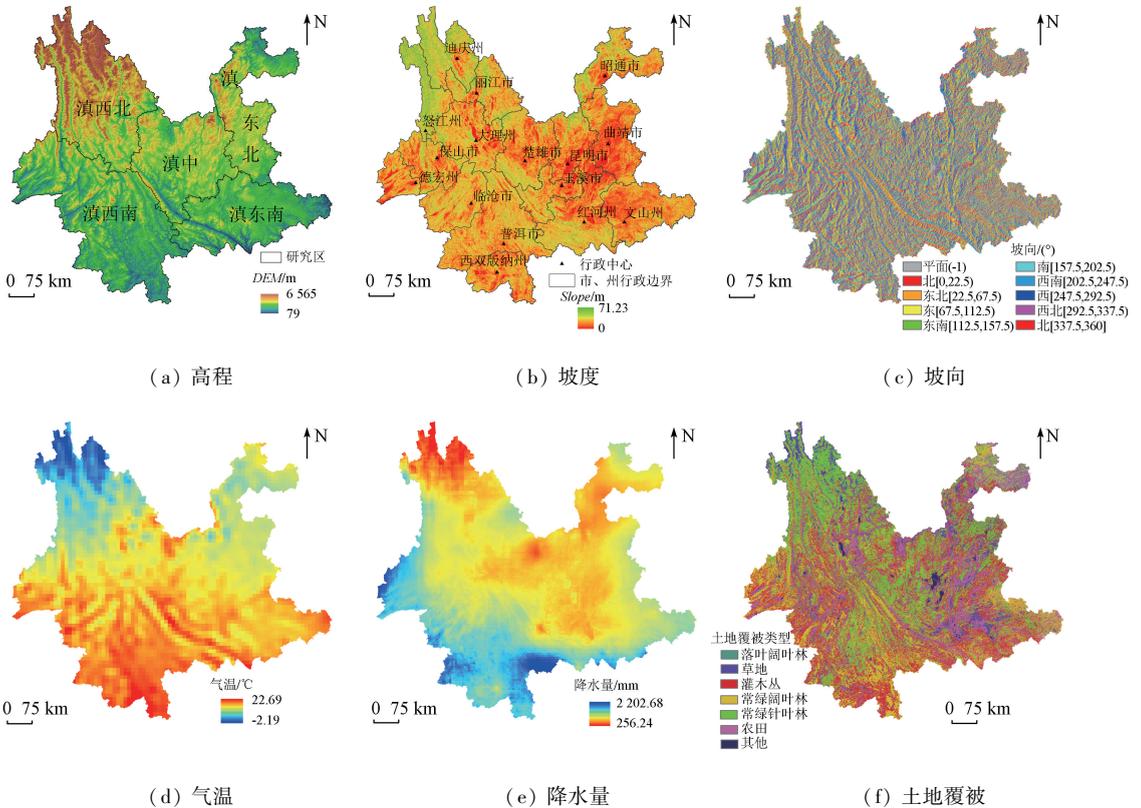


图 1 高程、坡度、坡向、气温、降水量及土地覆被图

Fig. 1 Elevation, slope, aspect, temperature, precipitation and land cover

南纬度低气温高,而滇西北海拔高气温低(图 1(d));同时存在明显的干雨季,夏秋季降水多于冬春季,降水量在空间分布上存在异质性,滇西南降水量高于其他地区(图 1(e))。气温和降水量总体上自南向北随海拔升高而下降,多变的气候类型和地理环境使省内植被分布具有明显的纬向和垂直分带特征。

1.2 数据源与预处理

1.2.1 NDVI 数据

研究的遥感数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 2000 年 2 月至 2022 年中分辨率成像光谱仪 MODIS Terra 中 MOD13Q1 的 16 d 植被指数产品,空

间分辨率为 250 m。为降低云层、大气散射及太阳高度角等对植被覆盖的影响,采用最大值合成法(maximum value composite, MVC)合成年度最大 NDVI 影像数据,得到云南省最佳植被覆盖。此外,结合研究区的实际情况,将植被指数 NDVI 值划分为 5 类:①<0.3(水域或低植被覆盖);②0.3~0.6(中低植被覆盖);③0.6~0.75(中植被覆盖);④0.75~0.85(中高植被覆盖);⑤>0.85(高植被覆盖)。

1.2.2 气象数据

因植被生长发育受气温和降水影响较大,本文研究气候驱动因素仅考虑降水和气温。降水数据采

用气候危害组红外降水与站点数据(CHIRPS),分辨率为 0.05° ,来源于美国加州大学气候危害中心(<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>)。

气温数据来源于欧洲中期气象预报中心(ECM-WF)(<https://climate.copernicus.eu/>)提供的第五代全球气候大气再分析数据(ERA5),ERA5能提供地面2 m气温数据,分辨率为 0.25° 。

1.2.3 DEM数据

数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)提供的ASTER高程数据,分辨率为30 m。利用ArcGIS软件计算坡度(图1(b))、坡向(图1(c)),将高程、坡度及坡向作为主要地形因子,并进行分级,以便分析地形因子与植被的联系,将高程从900 m到4 800 m以300 m间隔划分为15个等级,坡度从 3° 到 42° 以 3° 间隔划分为15个等级区间,坡向划分为9类(平面、北、东北、东、东南、南、西南、西和西北)。

1.2.4 土地覆被类型

植被覆盖的空间分布与土地覆被类型密切相关。研究使用的土地覆被产品由欧洲航天局(ES-ACCI, <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>)提供,空间分辨率为300 m。此数据集的总体准确率达到74.4%,已广泛用于全球及区域的土地利用/土地覆盖动态研究^[17]。研究以2020年的土地覆被资料(图1(f))为基准,探讨不同土地覆被类型下植被的变化。

1.2.5 造林面积数据

造林面积数据来源于云南省统计局(<http://stats.yn.gov.cn/tjsj/tjnj/>)中的统计年鉴。

为便于后续基于像素尺度的相关性分析,研究对分辨率不等于250 m的数据进行重采样,以匹配MODIS数据的分辨率。

2 研究方法

国内外学者通常将Theil-Sen中位数趋势分析、Mann-Kendall及一元线性回归等^[18-19]方法应用于NDVI长时间序列趋势分析。此外,探究植被覆盖变化的影响因素对保护植被资源、防治植被退化等生态决策具有重要意义。在以往的研究中多元回归残差分析、地理探测器、相关性分析等^[20-22]都可用于探究植被覆盖变化影响因素,其中皮尔逊相关性分析法因计算效率高、适用性好等特点得到广泛应用。

2.1 Theil-Sen中位数趋势分析法

Theil-Sen中位数趋势分析法是一种可靠的非参数统计方法,抗噪性好,不受数据缺失和分布形态影响。在这种方法中,使用等式计算 $[n(n-1)]/2$ 个数据集的斜率的中值。计算公式为

$$S = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), 2\ 000 \leq i < j \leq 2\ 022, (1)$$

式中:Median()为取中值函数; x_j 和 x_i 分别为第 j 和第 i 项的值; S 为Theil-Sen中位数,当 $S > 0$ 时,NDVI呈上升趋势,否则呈下降趋势,该方法不能得出趋势的显著水平。

2.2 Mann-Kendall显著性检验

Mann-Kendall被广泛应用于判断数据趋势的显著性,是统计学中的一种非参数统计检验方法。该方法优势在于样本数据不需要服从一定的分布,也不受少数异常值影响,常用于径流、水质等水文时间序列及气温、降水等气象时间序列趋势性分析。计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases}, (2)$$

式中: Z 为统计量; S 为Theil-Sen中位数。在给定显著水平 α 下,采用双边检验,当 $|Z| \leq Z_{1-(\alpha/2)}$ 时,表明研究时间序列趋势不显著;当 $|Z| > Z_{1-(\alpha/2)}$ 时,表明研究时间序列趋势显著。当 $Z > 0$ (< 0)时,时间序列数据存在明显的上升(下降)趋势。一般取 $\alpha = 0.05$,判断在0.05置信水平上时间序列变化趋势的显著性。

2.3 相关性分析法

为研究因子间的相关关系,采用相关系数 R 反映该地区植被覆盖对气候因子的响应程度。计算公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, (3)$$

式中: R_{xy} 为2因子间的相关系数; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为2因子的平均值。 R_{xy} 数值区间为 $[-1, 1]$, R_{xy} 绝对值越高表明气候因子与植被覆盖两者间的关系越密切,对植被生长活动的影响越深。此外,相关系数为正($R_{xy} > 0$)表明该因子与植被覆盖间呈现正相关关系,反之为负相关关系。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖的时空变化特征

2000—2022 年云南省植被覆盖的年际变化情



图 2 2000—2022 年云南省 NDVI 年际变化

Fig. 2 Interannual NDVI changes in Yunnan Province from 2000 to 2022

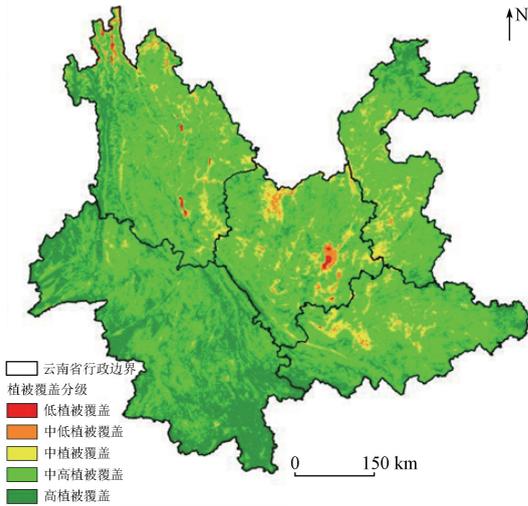


图 3 云南省植被覆盖的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation cover in Yunnan Province

NDVI 值出现显著下降,其原因可能与发生中度或极度干旱有关。2000—2022 年 23 a 以来,植被覆盖格局及 NDVI 的年际增速存在区域差异,整体覆盖格局呈现出南向北、西向东减少;全区、滇西南、滇东南、滇中、滇东北和滇西北的 NDVI 的年际增速分别约为 $0.25\% \cdot a^{-1}$, $0.24\% \cdot a^{-1}$, $0.30\% \cdot a^{-1}$, $0.23\% \cdot a^{-1}$, $0.35\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.20\% \cdot a^{-1}$,滇东北增速最快,其次是滇东南。其中,滇西南的植被覆盖最好,分布大量常绿阔叶林,NDVI 均值最高,滇东南植被覆盖较好因部分区域(文山、红河)是岩溶地貌

况和平均植被覆盖的空间分布如图 2 和图 3 所示。

综合图 2 和图 3 分析可知,2000—2022 年云南省大部分区域属于中高和高植被覆盖,其生态环境质量较好,平均 NDVI 值在 0.74~0.90 间呈波动上升的趋势,在 2003、2010 及 2020 年,部分区域的

而次之。此外,在滇东北、滇中与滇西北三者中滇东北的 NDVI 年际增速波动最大;2000—2003 年期间,滇东北的 NDVI 均值处于最低;2003—2010 年期间,滇东北 NDVI 年际增速达到 $0.55\% \cdot a^{-1}$;2012 年后滇东北的 NDVI 均值稳定高于其他 2 个区域,原因可能是滇东北、滇西北造林面积显著增加,但滇西北地处青藏高原南缘,海拔高气温低,而滇中是城市建设的中心地带,且分布滇池、抚仙湖和星云湖等高原湖泊,大面积的植被生长受限。滇东北的地理环境、气候条件较滇西北和滇中,植被更适宜生长。云南省植被覆盖面积占比如表 1 所示。

表 1 云南省植被覆盖等级面积占比
Tab. 1 Proportion of vegetation coverage level in Yunnan Province

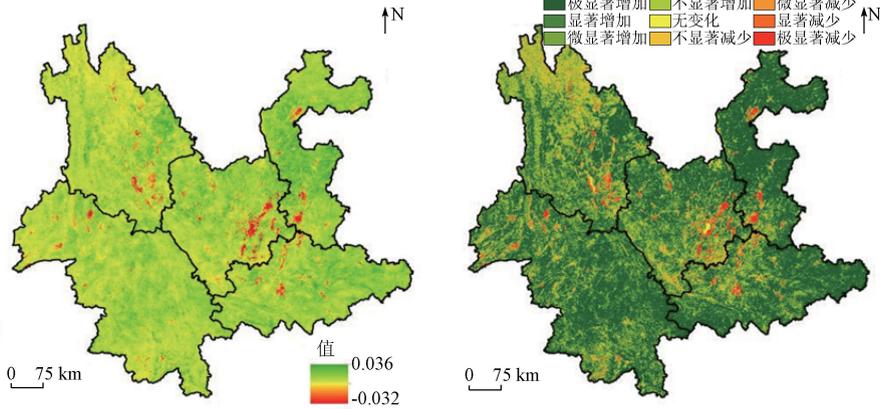
植被分级	面积比例/%
水域或低植被覆盖度	0.19
中低植被覆盖度	1.49
中植被覆盖度	11.78
中高植被覆盖度	57.17
高植被覆盖度	29.37

从表 1 中可以看出,水域或低植被覆盖地区占总面积最低,水域(高原湖泊、河流等)和滇西北高海拔冰雪区域的植被覆盖较低。中低植被覆盖主要分布在滇西北高海拔的冻土区、坡度较缓的滇中城市区、河流、湖泊、农田及其周边。中植被覆盖地区对应的土地覆盖类型主要是农田,大致分布在滇东北中部、滇东南西北部、滇西北东部和滇中地区,而滇西南分布最少。中高植被覆盖面积占比最高,广泛分布在各区域,对应的土地覆被类型主要有农田、

草地、常绿针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林等。高植被覆盖面积占比仅次于中高植被覆盖地区,大致分布在滇西南、滇东南的南部、滇东北的北部及滇西北的西部,对应的土地覆被类型主要有常绿阔叶林、灌木丛等。

3.2 植被覆盖空间变化特征

基于 Theil-Sen 中位数趋势分析法,分析云南省 2000—2022 年 23 a 间植被覆盖的时空变化格局(图 4(a)),其结果表明各地区的变化趋势存在空间异质性。



(a) Theil-Sen 中位数趋势变化

(b) 植被覆盖变化

图 4 云南省 Theil-Sen 中位数趋势变化图和植被覆盖变化图

Fig. 4 Theil-Sen median trend and vegetation cover change in Yunnan Province

根据 Theil-Sen 趋势变化和 Mann-Kendall 显著性检验后得到的变化趋势大小划分为 9 个等级,如表 2 所示。

表 2 2000—2022 年云南省植被变化趋势统计

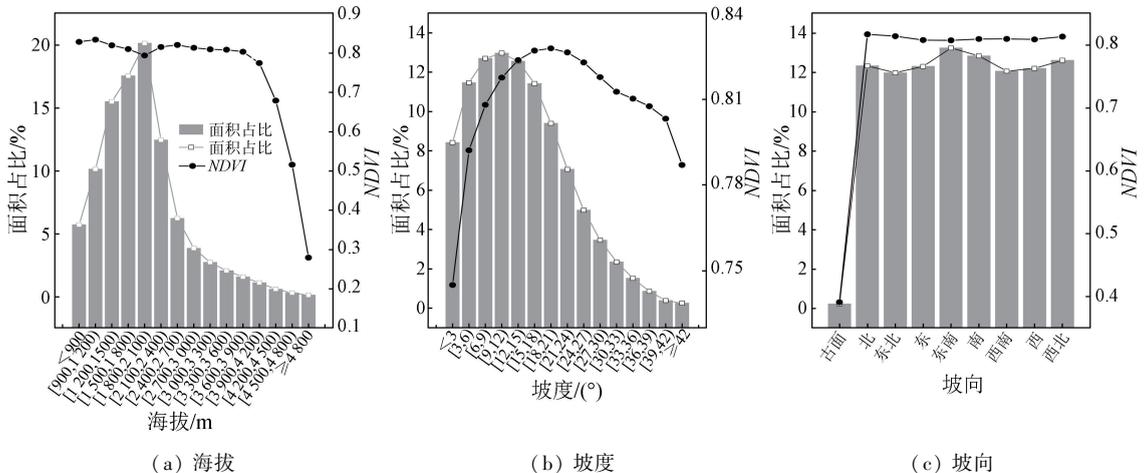
Tab. 2 Statistics of vegetation change trends in Yunnan Province from 2000 to 2022

S	Z	NDVI 变化趋势特征	面积比例/%
S<0	Z>2.58	极显著减少	1.39
	1.96<Z≤2.58	显著减少	0.73
	1.65<Z≤1.96	微显著减少	0.52
	Z≤1.65	不显著减少	6.03
S=0	Z	无变化	0.16
S>0	Z≤1.65	不显著增加	20.31
	1.65<Z≤1.96	微显著增加	6.48
	1.96<Z≤2.58	显著增加	14.39
	Z>2.58	极显著增加	49.99

由表 2 和图 4(b)可看出,植被呈现增加趋势的区域占总面积的 91.17%,其中极显著增加面积占 49.99%,而局部地区的植被覆盖呈减少趋势。结合研究区的实际情况分析,植被呈现减少趋势的原因可能有:①云南省重要城市向外扩张,建筑设施增加;②矿产资源开采导致周边植被减少;③气候变暖导致冰川冻土快速退化等。总体而言,2000—2022 年 23 a 来云南省植被覆盖分布格局变化特征为:植被覆盖增加的区域大于减少的区域。

3.3 NDVI 与地形因子的相关分析

地形因子对土壤类型和水热条件起影响作用,从而影响植被的生长发育。云南省是典型的高原山区地貌,山高坡陡,不同地形因子对植被生长的影响存在差异。如图 5(a)所示,云南省近 20%的土地



(a) 海拔

(b) 坡度

(c) 坡向

图 5 NDVI 对海拔、坡度、坡向的响应

Fig. 5 Response of NDVI to DEM, slope and aspect

面积处于[1 800,2 100) m 的海拔区间。海拔 1 200 m 以下的区域主要分布在滇西南、滇东南的东部及滇东北的北部,此海拔内植被覆盖高,NDVI 值随海拔升高而升高。海拔为[1 200,2 100) m 的区域分布众多河流、湖泊、农田、草地等,且该海拔范围适宜居住,人类活动频繁,在该海拔区间 NDVI 值呈下降趋势。海拔为[2 100,2 700) m 左右的区域,随着河流湖泊以及人类活动减少,植被覆盖逐渐增加。海拔为[2 700,3 600) m 的大部分区域在滇西北。海拔 $\geq 3 900$ m 是滇西北的北部区域,分布冰川冻土,NDVI 值急剧下降。

云南省坡度西北高、东部低,坡度主要分布在 $0^\circ \sim 42^\circ$ 间(图 5(b))。坡度 $< 3^\circ$ 的区域主要是湖泊、农田等类型,其 NDVI 值最小;在 $[3^\circ, 21^\circ)$ 坡度范围,NDVI 值随坡度增加而增加,在 $[18^\circ, 24^\circ)$ 间 NDVI 值达到最大;坡度 $\geq 24^\circ$ 时,坡度越陡,地形愈复

杂,水土流失加剧,随坡度增加 NDVI 值降低,其中坡度 $[33^\circ, 42^\circ)$ 间的 NDVI 下降速率快于 $[24^\circ, 33^\circ)$ 。此外,研究分析不同坡向上的植被覆盖情况(如图 5(c))后发现,平面坡向上多为湖泊区域,NDVI 值最低;其余坡向 NDVI 值约为 0.81 左右,对植被生长影响不大。

3.4 NDVI 与气候因子的时空相关分析

综合 2000—2022 年云南省的年平均气温和年降水量(图 6)分析知,降水量呈下降趋势,而温度呈上升趋势,总体呈“变干和变暖”的趋势。23 a 来,云南省全区年平均降水量约在 954~1 319 mm 间,年降水量以 $-2.82 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率下降,其中 2011 年最低。此外,全区 23 a 来年均气温在 $14.21 \text{ }^\circ\text{C} \sim 15.73 \text{ }^\circ\text{C}$ 间,年平均气温约以 $0.03 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率上升。2009—2010 年和 2019 年气温明显升高,2019 年气温达到最高。

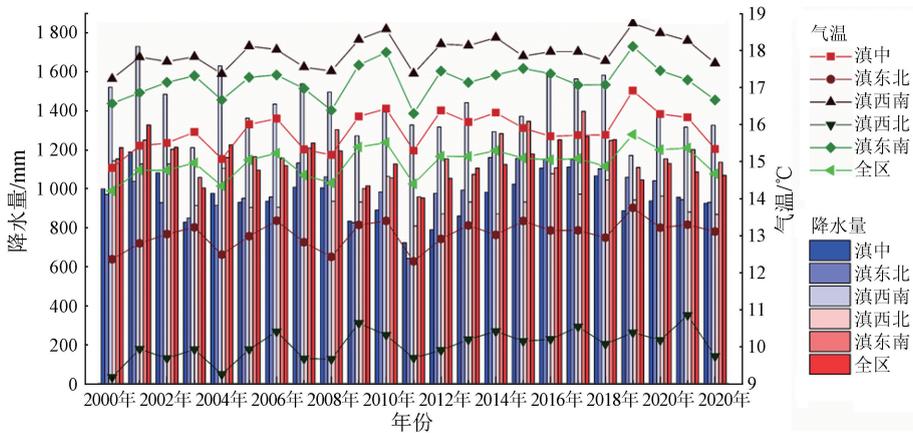
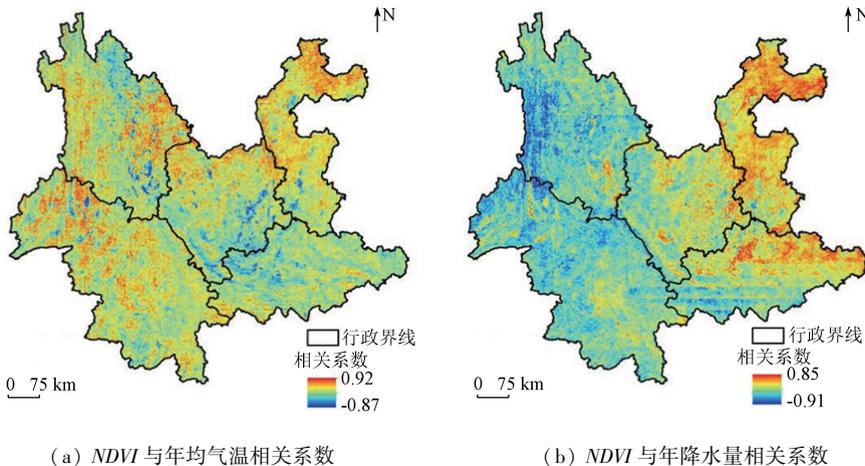


图 6 云南各区域的年平均气温、年均降水量变化图

Fig. 6 Average annual temperature and average annual precipitation in Yunnan Province

研究基于像元尺度计算 NDVI 与气候因子(气温、降水量)的相关性系数得,云南省 NDVI 与气温、降水量的相关系数分别在 $-0.87 \sim 0.92$, $-0.91 \sim$

0.85 间,其平均相关系数分别为 0.16 和 -0.01 。其中,滇中、滇东南、滇东北、滇西南和滇西北各区域植被覆盖与气温的平均相干系数分别为 0.13, 0.08,



(a) NDVI 与年均气温相关系数

(b) NDVI 与年降水量相关系数

图 7 NDVI 与年均气温、年降水量的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between NDVI and average annual temperature and annual precipitation

0.25, 0.19 和 0.16, 与降水量的平均相干系数分别为 0.06, 0.09, 0.25, -0.11 和 -0.13。计算可知, 云南省 76.58% 的区域的植被覆盖与气温呈正相关(图 7(a)), 表明大部分区域气温对植被生长有利; 47.87% 的区域植被覆盖与降水量呈负相关(图 7(b)), 表明接近一半区域的植被生长受到降水的驱动。从空间分布上看, 植被覆盖与降水量的相关关

系从东向西方向逐渐降低。

3.5 土地覆被与因子间相关分析

本次使用 2020 年土地覆被类型的数据, 划分为草地、灌木丛、落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林、农田及其他(水体、城区、裸地、永久冰雪等)共 7 种类型, 其面积占比如表 3 所示。

表 3 土地覆被类型面积占比及与其他因子关系

Tab. 3 Relationship between area share of vegetation types and other factors

土地覆被类型	面积占比/%	平均 NDVI	平均 DEM/m	平均坡度/(°)	平均降水量/mm	平均气温/℃
草地	7.898	0.732	2 273.549	14.195	998.959	12.711
灌木丛	28.841	0.816	1 716.075	13.037	1 196.155	16.007
落叶阔叶林	2.812	0.824	1 708.064	14.838	1 163.265	15.710
常绿阔叶林	14.943	0.865	1 725.792	15.640	1 324.125	16.373
常绿针叶林	28.692	0.826	2 247.938	16.507	1 064.775	13.343
农田	15.647	0.776	1 558.297	10.736	1 096.751	15.728
其他	1.177	0.566	1 743.873	2.917	1 028.880	15.245

从表 3 可看出, 林地(落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林)面积占比最高; 其次是灌木丛。由此得出, 云南省森林资源丰富。此外, 不同土地覆被类型的平均 NDVI 值与环境条件、植被的生长特征、人类活动等方面密切相关, 常绿阔叶林的年平均 NDVI 值最高, 其次是常绿针叶林, 其他土地覆被类型(城市、雪山、水体等)的年平均 NDVI 值最低。一般来说, 常绿阔叶林、常绿针叶林终年常绿, 阔叶林较针叶林, 叶面积更大。草地生长的平均海拔最高, 其次是常绿针叶林, 农田分布的平均海拔最低。常绿针叶林生长的平均坡度最陡, 其次是常绿阔叶林; 其他土地覆被类型(城市、雪山、水体等)区域最平缓。常绿阔叶林、灌木丛的平均降水量和平均气温高于其余的土地覆被, 草地的平均降水量和平均气温最低; 农田和其他土地覆被类型存在地形差异较大, 而平均降雨量及气温差异不明显, 可能的原因是该土地覆被类型受到明显的人类活动, 从而影响局部地区的降水和气温。上述结果表明, 植被类型空间分布差异源于其对地形地貌、气候条件以及人类活动的适应性差异。

江、滇东北的北部等地, 滇西北有高黎贡山自然保护区; 滇西南地区的水热条件、地形条件等因素良好, 适宜植被生长; 滇东北的北部森林资源丰富。而滇中分布众多高原湖泊, 并且城市扩张、矿产开采、人类活动强度加剧等负向扰动破坏植被生长环境。此外, 滇西南、滇东南的植被覆盖高于其他区域, 滇东北的 NDVI 值年际增长速率最快, 其原因与昭通、曲靖造林面积增加有关。

2) 通过对云南省 2000—2022 年 23 a 间 NDVI 的空间格局分布特征及变化趋势分析, 发现研究期内植被在时间及空间上呈现不断改善的趋势。一方面云南高原山区的地形地貌、气候条件给植被生长提供有利的环境; 另一方面加强草地、湿地、生物多样性的保护和修复, 推进退耕还林还草、防护林建设、石漠化治理和水土流失监测等生态治理工程, 使云南省生态环境质量得到明显改善, 植被覆盖得到显著提升(图 8)。

4 讨论

1) 适宜的气候可为植被的生长提供良好的生存条件, 而部分人类活动(城市扩张、工程建设、砍伐林地等)则会引发许多生态环境问题(水土流失、土地荒漠化、森林资源锐减等)。受地形因子、气候条件、人类活动等影响, 云南省植被覆盖存在区域差异性, 呈现南部高于北部、西部高于东部的空间格局。高植被覆盖地区主要分布在滇西南、滇西北怒

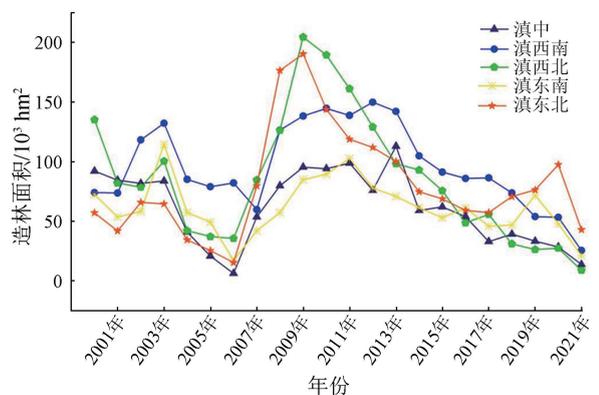


图 8 2000—2021 年云南省各州市造林面积

Fig. 8 Afforestation area of each city in Yunnan Province from 2000 to 2021

3) NDVI 的时空变化是自然因素(地形地貌、气候条件、土壤条件等)和人为因素(土地覆被类型、人类活动、畜牧业发展、生态修复等)共同作用的结果。

5 结论

1) 2000—2022年,云南省整体植被覆盖度较高,年均植被覆盖 NDVI 值在 0.74~0.90 间波动;且各区域的植被覆盖呈波动上升趋势,增加趋势占比 91.17%,其中滇东北增长速率最快。

2) 植被覆盖在区域上存在差异。滇中位于城市建设区,且分布众多湖泊;滇西北海拔高,冰川冻土分布;滇东北分布大量农田;滇东南、滇西南分布大量的常绿阔叶林及灌木丛,这是滇东南、滇西南的植被覆盖高于其他区域的原因。

3) 在海拔 3 900 m 以下,云南省 NDVI 值较稳定,3 900 m 以上随海拔升高而 NDVI 值呈减少的趋势;坡度 $<3^\circ$ 时,NDVI 值最低,随坡度增加,NDVI 值呈先增加后降低的趋势;平面坡向的 NDVI 值最低,其余坡向的 NDVI 值大致一致。除平面坡向外,其余坡向对植被生长影响小。

4) 2000—2022年,云南省气候呈现“变干、变暖”。滇中、滇东南和滇东北与降水呈正相关,表明降水有利于植被生长;而滇西南和滇西北与降水呈负相关。全区的植被覆盖与气温呈正相关,表明合适的气温有利于植被生长。

本文只对降水、气温、地形因子、土地覆被类型与 NDVI 的相关性进行分析,但对其他影响植被覆盖的因素没有做分析。建议在后续研究中,加强对植被覆盖时空变化的驱动力因素的定量分析,确定主要驱动因素,为生态保护提高科学的理论依据。

参考文献 (References):

[1] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260–270.

[2] 杨艳萍, 陈建军, 覃巧婷, 等. 2000—2018年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 234–241.

Yang Y P, Chen J J, Qin Q T, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000—2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(17): 234–241.

[3] 苗百岭, 梁存柱, 韩芳, 等. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7689–7701.

Miao B L, Liang C Z, Han F, et al. Responses of phenology to climate change over the major grassland types[J]. *Acta Ecologica*

Sinica, 2016, 36(23): 7689–7701.

[4] 路洁, 王学风, 曹永强. 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 7–14, 38.

Lu J, Wang X F, Cao Y Q. Effects of climate and human activities on vegetation change in Liaoning Province[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(4): 7–14, 38.

[5] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961–974.

Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982–2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961–974.

[6] 逯金鑫, 周荣磊, 刘洋洋, 等. 黄土高原植被覆被时空动态及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 211–219.

Lu J X, Zhou R L, Liu Y Y, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation cover on the Loess Plateau and its influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 211–219.

[7] 武锦辉. 基于多源遥感数据的物种多样性及陆表植被恢复力监测研究[J]. *测绘学报*, 2022, 51(8): 1826.

Wu J H. Monitoring species diversity and measuring vegetation resilience with satellite remote sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(8): 1826.

[8] 郑朝菊, 曾源, 赵玉金, 等. 近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(3): 128–136. doi: 10.6046 /gtzyyg. 2017. 03. 19.

Zheng Z J, Zeng Y, Zhao Y J, 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.

[9] 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 J N, Peng C, Cheng W M, 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.

[10] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000—2014年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1568–1578.

Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1568–1578.

[11] 刘哲, 邱炳文, 王壮壮, 等. 2001—2014年间黄土高原植被覆盖状态时空演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 192–198. doi: 10.6046 /gtzyyg. 2017. 01. 29.

Liu Z, Qiu B W, Wang Z Z, et al. Temporal and spatial variation analysis of vegetation cover in the Loess Plateau from 2001 to 2014[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(1): 192–198. doi: 10.6046 /gtzyyg. 2017. 01. 29.

[12] Li S S, Yang S N, Liu X F, et al. NDVI-Based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Central China[J].

- Remote Sensing, 2015, 7(9):11163–11182.
- [13] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012 [J]. Quaternary International, 2017, 444:87–96.
- [14] Chu H S, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur–Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 650(Pt 2):2051–2062.
- [15] Zoungrana B J, Conrad C, Thiel M, et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa [J]. Journal of Arid Environments, 2018, 153:66–75.
- [16] 杨红娟, 张成浩. 基于系统动力学的云南生态文明建设有效路径研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2):16–24.
- Yang H J, Zhang C H. Research on the effective route of ecological civilization construction in Yunnan Province based on System Dynamics [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(2):16–24.
- [17] 阮宏威, 于静洁. 1992—2015年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化 [J]. 地理学报, 2019, 74(7):1292–1304.
- Ruan H W, Yu J J. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7):1292–1304.
- [18] Yang Y J, Wang S J, Bai X Y, et al. Factors affecting long-term trends in global NDVI [J]. Forests, 2019, 10(5):372.
- [19] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. Global and Planetary Change, 2013, 100:172–182.
- [20] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(2):826–836.
- Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model: Take the Beijing–Tianjin sand source region as an example [J]. China Environmental Science, 2021, 41(2):826–836.
- [21] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 等. 2001—2020年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(7):2798–2809.
- Huang H B, Xu H L, Lin T, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change in the Altay region of Xinjiang from 2001 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7):2798–2809.
- [22] 梁守真, 禹定峰, 王猛, 等. 应用遥感时序数据研究植被变化与气候因子的关系——以环渤海地区为例 [J]. 国土资源遥感, 2015, 27(3):114–121. doi:10.6046/gtzyyg.2015.03.19.
- Liang S Z, Yu D F, Wang M, et al. Application of remote sensing time series data to investigate the relationship between vegetation change and climatic factors: A case study of Circum-Bohai Sea area [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(3):114–121. doi:10.6046/gtzyyg.2015.03.19.

Exploring the spatio-temporal variations and influencing factors of vegetation cover in Yunnan Province

LI Yimin^{1,2}, FENG Xianjie³, LI Yuanting³, YANG Xue¹, XIANG Qianying³, JI Peikun¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Research Center of Domestic High-resolution Remote Sensing Geological Engineering, Kunming 650500, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Yunnan Province has abundant species resources but fragile ecosystems, and the ecological vulnerability is closely related to vegetation cover. Hence, based on the normalized difference vegetation index (NDVI) from the MOD13Q1 dataset for 2000–2022, this study dynamically monitored the spatio-temporal variations of vegetation using the maximum value composite (MVC), Theil–Sen median trend analysis, and Mann–Kendall significance test. Moreover, this study delved into the response of vegetation to factors like topography, climate change, and land cover through correlation analysis. The results show that: ① From 2000 to 2022, the overall vegetation coverage of Yunnan Province was relatively high, with average annual NDVI values ranging from 0.74 to 0.90, showing a fluctuating upward trend. Of the whole area, 91.17% exhibited an increasing vegetation coverage trend, with the fastest growth rate seen in northeastern Yunnan; ② Regional differences were observed in vegetation cover, which was higher in southeastern and southwestern Yunnan compared to northwestern, central, and northeastern Yunnan; ③ The NDVI values of Yunnan Province were relatively stable below the altitude of 3 900 m, and decreased with increasing altitude in the case of over 3 900 m; ④ The NDVI values were the lowest with slopes below 3°, and with an increase in slope, they increased first and then decreased; ⑤ The planar slope aspect displayed the lowest NDVI values, and other slope aspects showed minimal impact on vegetation growth; ⑥ From

2000 to 2022, the vegetation cover in central, southeastern, and northeastern Yunnan was positively correlated with precipitation, suggesting that precipitation in these areas was favorable for vegetation growth. However, the vegetation cover in southwestern and northwestern Yunnan showed a negative correlation with precipitation. Additionally, the vegetation cover in the whole region and various areas was positively correlated with temperature, suggesting that temperature is beneficial to vegetation growth. The results of this study will provide a scientific basis for strengthening ecological environment construction and ecological management in Yunnan Province.

Keywords: MODIS NDVI; vegetation change; Theil-Sen trend; Mann-Kendall test; correlation; Yunnan Province

(责任编辑: 陈昊旻)