

2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系

徐虹, 刘琴

(云南省气候中心, 昆明 650034)

摘要:了解植被覆盖时空变化对区域环境保护及生态环境建设具有重要意义。基于 MOD13Q1 数据,运用趋势分析和相关分析方法,探讨了云南省植被 NDVI 的变化、未来趋势以及植被与气候关系的空间格局。结果表明:(1) 2001—2019 年云南植被 NDVI 均值为 0.68,变化率为 $0.37\%/a$ ($p < 0.001$),空间上表现为西高东低、南高北低的特点。(2) 全省 Hurst 指数值为 0.52,植被改善的趋势在未来将持续。不同土地覆盖类型,林地、耕地植被变化的趋势为持续改善,居民地为持续退化;草地和灌木林将由改善转变为退化。(3) 近 19 年年平均气温和降水的变化率分别为 $0.03^\circ\text{C}/a$ 和 $-2.67\text{ mm}/a$,两者与年 NDVI 之相关程度均值分别是 0.26、0.21,在大部分地区表现为正相关。总体上看,气温对植被的影响大于降水。(4) 植被与气温和降水的滞后响应时分别是 1.9 月和 1.5 月。月时间尺度上,植被对降水的响应更敏感。不同植被类型,林地、灌木林植被的滞后时间长于耕地和草地,森林植被最不易受短期气候变化的影响。综上,近 19 年云南植被 NDVI 呈改善趋势,未来将持续;植被 NDVI 与气温和降水的相关性有着明显的地域差异。

关键词:云南; NDVI; 变化趋势; 气候; 相关分析

中图分类号:Q948;TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0162-07

Analysis of Vegetation NDVI Dynamic and Its Relationship with Climatic Factors in Yunnan Province During 2001—2019

XU Hong, LIU Qin

(Yunnan Climate Center, Kunming 650034, China)

Abstract: It was of great significance to understand the temporal and spatial changes of vegetation cover for regional environmental protection and ecological environment construction. Based on MOD13Q1 data and methods of trend analysis and correlation analysis, the change of NDVI, the future trend and the spatial pattern of the relationship between vegetation and climate in Yunnan Province were discussed. The results showed that: (1) during the period from 2001 to 2019, the average NDVI of Yunnan vegetation was 0.68, and the annual change rate was 0.37% ($p < 0.001$); the spatial distribution of NDVI was high in the west and south, low in the east and north; (2) the Hurst index of the whole province was 0.52; the trend of vegetation improvement would continue in the future, but there were differences among various types of land cover; the trend of vegetation change of forest and cropland would continue to improve; residential land would degrade; grassland and shrubbery would convert to degradant from improvement; (3) in recent 19 years, the annual average temperature and precipitation change rates in Yunnan were $0.03^\circ\text{C}/a$ and $-2.67\text{ mm}/a$, respectively; the correlations between NDVI and annual average temperature and precipitation were 0.26 and 0.21, respectively; these were positive correlations in the most areas; in the whole, the influence of temperature on vegetation was greater than precipitation; (4) the lag time of vegetation change response to temperature and precipitation changes were 1.9 months and 1.5 months, respectively, the impact of precipitation was more sensitive than temperature on the monthly scale; for different vegetation types, the lag time of forest and shrub vegetation was longer than those of cropland and grassland, and forest vegetation was the

收稿日期:2020-12-01

修回日期:2021-02-02

资助项目:公益性行业(气象)科研专项“高时空分辨率的森林草原火险预报与灾损评估关键技术”(GYHY201406034)

第一作者:徐虹(1974—),女,云南昆明人,高级工程师,硕士,生态气象与卫星遥感应用。E-mail:10466894@qq.com

least vulnerable in short-term. In conclusion, the vegetation NDVI improved significantly in Yunnan in the past 19 years. This trend would be continued in the future. The regional distribution characteristics of the correlation between vegetation NDVI and temperature and precipitation were obvious.

Keywords: Yunnan ; NDVI; change trend; climate; correlation analysis

在陆地生态系统中,植被是极重要的构成部分^[1]。植被覆盖度是衡量植被生长、生态环境的重要指标^[2]。而归一化植被指数 NDVI 可以直观表征植被覆盖度的状况,常被作为植被覆盖程度、生长状况、生物量及净初级生产力等植被参数的评价指标^[3-4]。云南是中国甚至世界上最为重要的生物多样性和资源基地之一。由于其生态系统的多样、丰富,以及不可替代的独特性,使得云南生态文明建设意义重大。但复杂的地形与气候条件也让云南植被一旦遭受被破坏,就难以恢复,特别是滇西北和滇西南地区植被恢复和演替过程更是十分缓慢。随着社会经济的快速发展,城市不断扩张、林木遭到采伐、农田耕地不断扩张等,人类活动对植被的影响越来越迅猛。准确掌握云南省植被动态变化特征以及影响因子,对加强生态环境建设和生态管理具有重要意义。

近年来,学者们采用 SPOT VEGETATION, MODIS 和 Landsat NDVI 数据对云南在植被的时空分布以及变化趋势方面进行深入的研究^[5-11]。如丁文荣^[12]、李同艳^[13]、张景华^[14]等采用 MODIS NDVI 数据研究了滇中以及怒江、澜沧江等流域植被覆盖的变化,以及气候、地形、人类活动等驱动因子对植被的影响。赵桔超等^[15]分析 2001—2015 年西双版纳植被变化特征,其对水热因子的响应。何云玲等^[16]研究了云南植被与气候因子之间的关系。这些研究均表明近年来云南植被覆盖状况总体水平较好,植被与气候因子的变化较敏感,不同时间尺度和地域有着明显的差异。但对于云南省植被覆盖变化的持续性以及未来变化趋势,植被与气候滞后效应的空间结构格局这些相关研究尚比较欠缺。鉴于此,本文以 2001—2019 年 NDVI 时序数据为主要研究对象,通过趋势分析方法,分析云南省 NDVI 时空的分布、变化及未来趋势预测。并对研究区的气温和降水与植被 NDVI 进行逐像元相关性的分析,研究植被与当地气候之间相互关系的时空格局,以期对云南省植被的科学管理和保护提供科学客观的参考依据。

1 研究区概况

云南省地处青藏高原东南侧,北纬 $21^{\circ}8'32''$ — $29^{\circ}15'8''$ 和东经 $97^{\circ}31'39''$ — $106^{\circ}11'47''$ 之间,是云贵高原主体。全省 94% 的国土面积是山地,盆地、山

区、平坝交错,河川湖泊纵横。海拔高、低差高达 6 663.6 m。云南气候同时兼具低纬气候、季风气候和立体垂直气候的特征,四季不分明、干湿季分明、立体气候独特,从山谷向山顶随海拔升高,常常会出现不同的气候类型、植被和自然地地貌景观^[17]。云南气候资源极其丰富,且分布广、地域分布特征明显。云南的植物种类繁多,据统计,2019 年云南省森林覆盖率为 62.4%,以暖温性灌草及灌丛、暖温性针叶林、季风常绿阔叶林等分布面积较大^[18](图 1)。

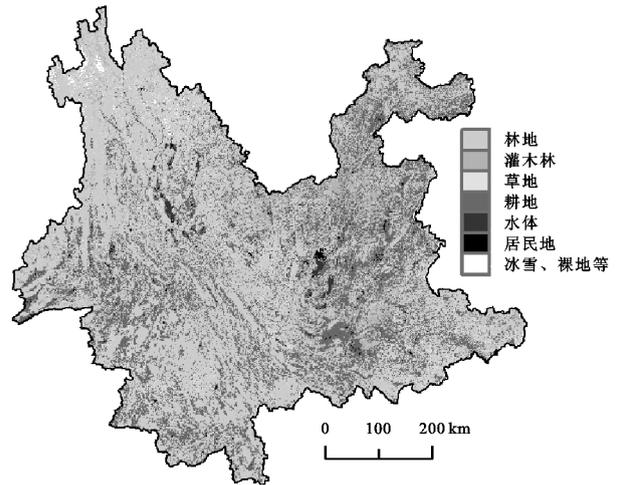


图 1 云南省 2010 年土地覆盖分布

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

NDVI 数据,来源于美国国家航天局 NASA 的 MOD13Q1 数据(<https://neo.scigsfc.nasa.gov>),研究时段为 2001—2019 年。首先对 MOD13Q1 数据预处理,完成拼接、投影转换和研究范围裁剪后,基于时间序列谐波分析法(Savitzky-Golay 滤波)进行对时序数据进行噪声平滑^[19]。再采用最大值合成法^[20]构建逐月数据。最后求取平均值,获得逐年 NDVI 时序数据。采用 Savitzky-Golay 滤波和最大值合成法能较好消除云和大气干扰。

土地覆盖数据,来源于国家基础地理信息中心 GlobeLand30 数据集,时间为 2010 年,空间分辨率为 30 m (<http://www.globallandcover.com/GLC30Download>)。

气象数据,来源于云南省气象局。采用反距离权重法(IDW)插值,得到空间分辨率为 250 m 云南省 2001—2019 年平均气温和降水的格点数据。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析法 植被年际 NDVI 变化趋势 k , 计算公式如下:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n i \cdot \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: n 为研究时间序列的长度; i 为年份; NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值。 $k > 0$ 时, NDVI 变化趋势为增加, 植被覆盖的表现改善趋势; 反之, 植被覆盖表现为退化趋势。

采用 t 检验法进行显著性检验, 结合变化趋势 k 与显著性水平 p 值, 将 NDVI 变化趋势划分: 显著退化 ($k < 0, p < 0.05$)、不显著退化 ($k < 0, p > 0.05$)、显著改善 ($k > 0, p < 0.05$) 和不显著改善 ($k > 0, p > 0.05$)。

2.2.2 Hurst 指数分析 本文采用了 R/S 分析的 Hurst 指数来对研究区植被 NDVI 未来的变化进行趋势预测^[21]。计算方法如下: 时间序列 $\{\text{NDVI}(t)\}$, $t = 1, 2, \dots, n$, 对于任一正整数 $\tau \geq 1$:

均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \text{NDVI}(i), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}(i) - \overline{\text{NDVI}(\tau)}), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}(i) - \overline{\text{NDVI}(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$\tau = 1, 2, \dots, n$

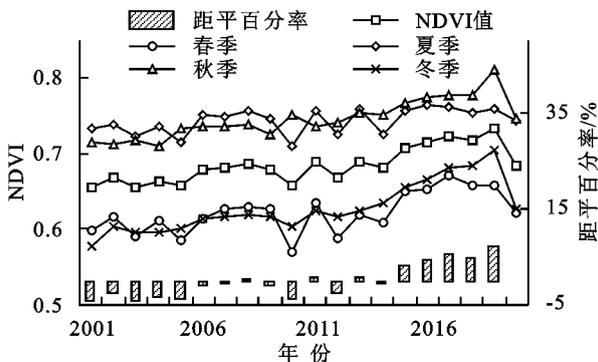


图 2 云南省 2001—2019 年植被 NDVI 变化趋势

3.1.2 空间变化特征 云南省 NDVI 均值为 0.68, $\text{NDVI} > 0.7$ 区域主要位于西南部和西部。 $\text{NDVI} > 0.5$ 的主要位于中东部和西北部, 空间上总体呈西高

若 $R/S \propto \tau^H$, 则表明 $\{\text{NDVI}(t)\}$ 存在 Hurst 现象, H 值为 Hurst 指数。通过最小二乘法双对数坐标系 ($\ln \tau, \ln R/S$) 拟合计算得到。(1) $H = 0.5$, 时间序列与过去变化趋势不相关; (2) $0 < H < 0.5$, 表明未来变化趋势将反转, H 值越接近于 0, 反转性越强; (3) $0.5 < H < 1$, 表明未来变化趋势将持续, H 值越接近于 1, 持续性越强。

2.2.3 NDVI 与气候因子的相关分析 本文选用气温和降水来探讨 NDVI 与气候因子之间的关系。相关系数 r_{xy} 计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

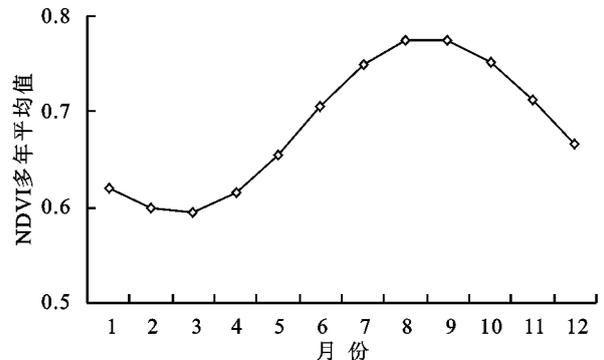
式中: n 为研究时间序列的长度; x, \bar{X} 分别为 NDVI 及其平均值; y, \bar{Y} 为气候因子及其平均值。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空分布特征

3.1.1 NDVI 时间变化特征 云南 2001—2019 年 NDVI 均值介于 0.66~0.73, 变化率 0.37%/a ($p < 0.001$)。2001—2008 年和 2014—2019 年两个时段呈增加趋势, 变化率为 0.41%/a 和 0.89%/a。而 2008—2014 年呈减少趋势, 变化率 -0.27%/a, 主要原因与 2009—2014 年云南出现的严重干旱有关。年内各月 NDVI 均值在 3 月最小, 8 月、9 月最大。在 1—3 月和 9—12 月 NDVI 值出现下降, 下降率分别为 1.31% 和 4.31%。3—8 月为增长增长率为 3.43% (图 2)。

根据气候统计方法划分: 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12—2 月为冬季。秋、夏季 NDVI 值大于冬、春季, 秋季 NDVI 值最大, 冬季最小; 近 19 a 四季植被 NDVI 变化均表现为显著增加, 冬、秋季变化趋势大于春、夏季, 冬季变化最大, 秋季则最小。



东低、南高北低。NDVI 值随海拔升高而增加, 在海拔 800 m 和 2 600 m 区域出现两个峰值。

云南的耕地和人口集中分布在海拔 800~2 000 m

的地区,人类活动的影响导致植被覆盖的下降。进入高海拔地区,特别是4 000 m以后,受自然环境因素

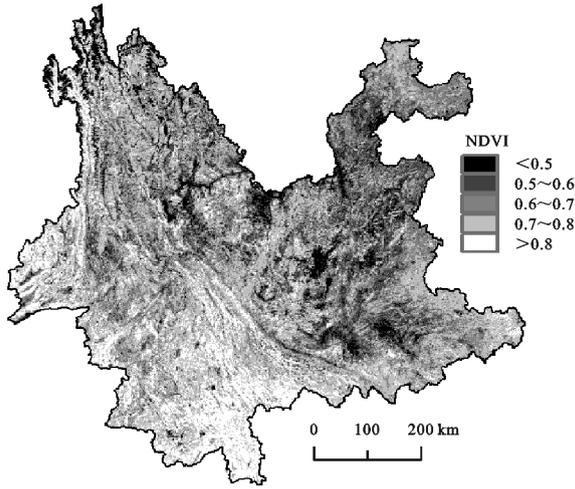


图 3 云南省 NDVI 空间分布

3.2 NDVI 动态变化特征

3.2.1 NDVI 变化趋势 整体上,2001—2019 年云南植被 NDVI 呈改善趋势。显著改善面积占比为 45.7%,主要位于中东部。显著退化为 2.4%,主要位

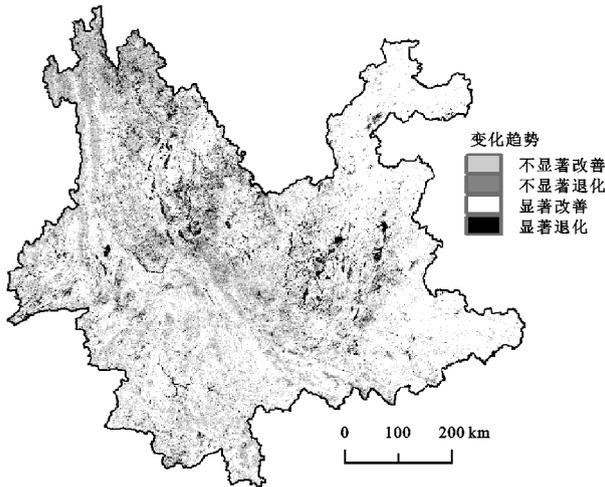


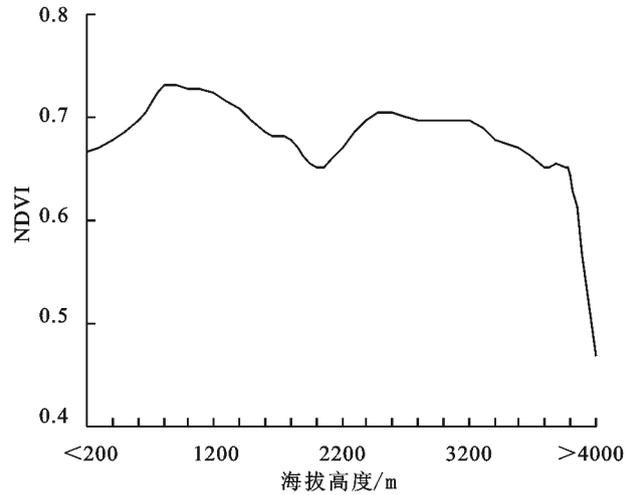
图 4 2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化趋势

3.2.2 未来趋势预测 云南 Hurst 指数 H 均值为 0.52。整体上,未来植被 NDVI 变化趋势将持续改善。持续改善和持续退化的面积占比分别为 58.4% 和 9.9%,变化趋势发生反转的为 31.7%,其中未来退化的为 27.5%。不同土地覆盖类型,林地、耕地和居民地的 $H > 0.5$,表明未来变化趋势继续的可能性强,即林地、耕地将持续改善,居民地将持续退化;草地和灌木林的 $H < 0.5$,表明未来变化趋势可能由改善转变为退化(图 5)。需要对于这些区域的变化持续关注。

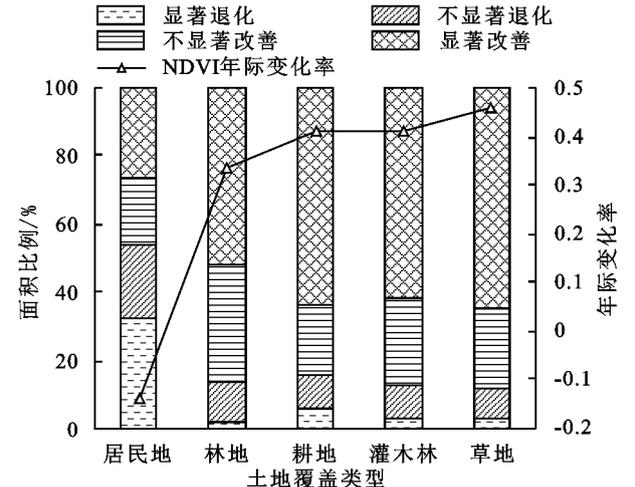
3.3 植被 NDVI 与气候因子的响应

3.3.1 气候因子年际变化特征 近 19 年云南气温变化率为 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ($p = 0.01$),降水为 $-2.67 \text{ mm}/\text{a}$

和气候条件的限制,使得植物数量骤减,NDVI 急剧下降(图 3)。



于城镇等地。不同土地覆盖类型,除居民地植被 NDVI 变化为退化趋势外,其余为改善趋势。植被 NDVI 年际变化率从大到小的排序依次为:草地、灌木林、耕地、林地(图 4)。



($p = 0.6$)。4 个季节的气温均表现为升高的变化趋势,春、秋季的变化率大于夏、冬季,春季气温升高趋势最大,冬季则最小;春、夏季的降水为减少趋势,秋、冬季为增加趋势,春、冬季的变化趋势大于夏、秋季,春季降水变化最大,秋季最小(图 6)。

3.3.2 NDVI 与气候因子相关分析 NDVI 与年平均气温和降水的相关系数分别记作 R_t 和 R_r 。 $|R_t|$ 均值为 0.26。 $R_t > 0$ 的面积占比为 64.22%, $R_t > 0.3$ 的占 26.3%, $R_t < -0.3$ 占 11.9%,显著相关为 14.24%。其中,显著正相关为 9.06%,主要位于西部、西南部和东南部的湿润、半湿润地区,这些地区降水充沛,气温升高对植被生长有利;显著负相关为 9.06%,主要位于西部和东部,这些地区多为云南干旱频发区,热量

好,气候干燥。温度过高易加剧水分蒸发,引起土壤缺墒,植被受旱。 $|R_r|$ 均值为 0.21, $R_r > 0$ 的面积占比为 61.51%, $R_r > 0.3$ 占 20.30%, $R_r < -0.3$ 占 7.39%,显著相关的面积占比为 8.65%。显著正相关为 7.07%,主要位于金沙江、元江、怒江和红河等干热河谷地区,这些地区往往极干燥,降水对对植被生长

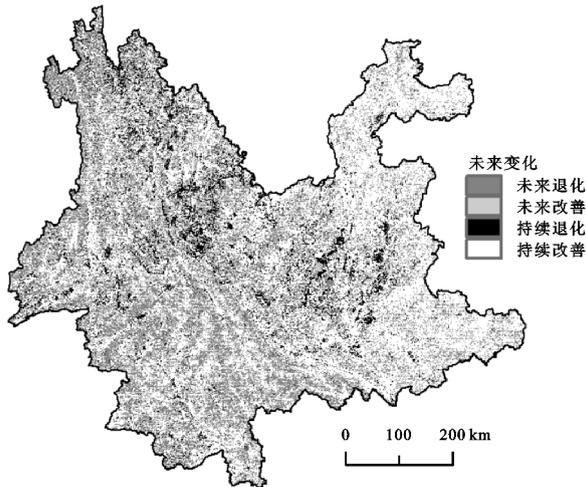


图 5 NDVI 未来变化趋势预测

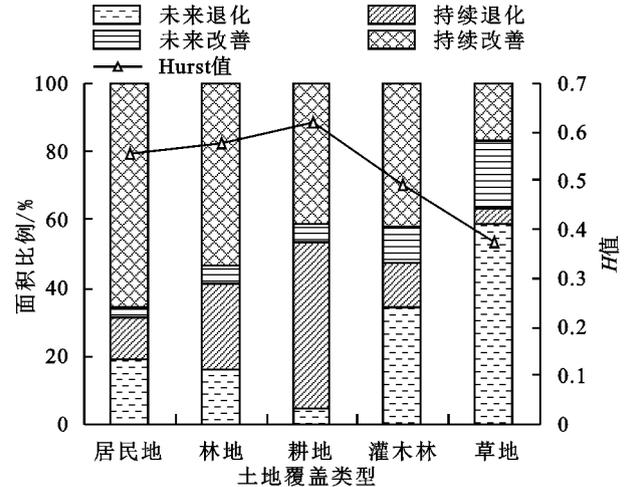


图 5 NDVI 未来变化趋势预测

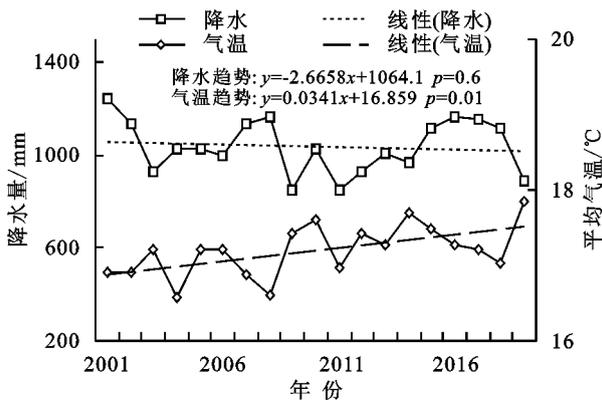


图 6 云南省 2001—2019 年平均气温和降水量变化趋势

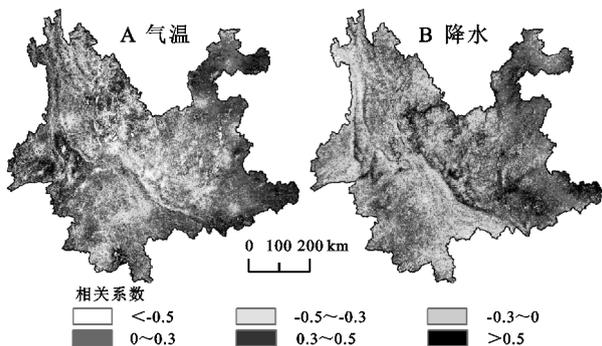


图 7 NDVI 与气温和降水的相关系数分布

3.3.3 植被与气候的滞后响应 本文分别计算植被 NDVI 与当前月、前推 1—3 月的气温和降水的相关系数。将相关系数绝对值最大值对应时间作为 NDVI 对气温和降水响应的滞后时间,从而分析植被对气候滞后响应的空间差异^[14]。植被与气温和降水响应的滞后时间平均值分别是 1.9 个月和 1.5 个月。短

雨十分有利;显著负相关为 1.63%,主要位于西北部,降水过多,会影响光热条件,抑制植被生长。特别是对于地质灾害风险区,易引发山洪、滑坡、泥石流等地质灾害。整体上,云南植被 NDVI 与年平均气温和年降水量呈正相关关系,气温对植被的影响大于降水(图 7)。

期内,植被对降水变化的响应时间更短、更敏感。植被对气候的响应有着明显的地域差异,西南部地区滞后期长于东北部,气温和降水滞后期 0 个月的地区面积占比为 5.4% 和 8.4%,主要位于阴冷多雨的东北部和寒冷的西北部,对气候变化较为敏感。滞后期 3 个月的为 27.6% 和 18.2%,主要位于西南部,森林覆盖率较高,高温多雨,较为湿润,对气候响应时间较迟。不同植被类型的滞后时间存在明显差异。林地和灌木林的滞后时间长于耕地和草地,森林植被最不易受短期气候变化的影响(图 8)。

4 结论和讨论

4.1 讨论

已有关于云南植被覆盖时空分布的研究与本文的研究结果基本一致^[5,8-9,22]。但有研究^[23]认为云南植被 NDVI 值 3 月最小,11 月最大;四季的植被均呈增加趋势,秋季变化趋势最显著。部分结论不一致的原因主要在于研究时段以及植被 NDVI 时序数据处理方法的不同。

总体上,近 19 a 云南省气温显著增加、降水不显著减少的“暖干化”的变化趋势,植被 NDVI 表现为改善趋势。其中 2009—2014 年云南出现的严重干旱,这一时期植被 NDVI 出现明显下降,可见植被与气候具有较好的相关性。云南大部地区年平均气温升高和降水增多有利植被生长,气温对植被的影响大于降水。另一方面,植被对气候变化存在 1~2 个月

“时滞效应”,时间响应有着明显的地域差异。中部的干旱、半干旱地区干湿季分明、热量条件充足,冬春干旱频发,温度升高会增加地表蒸发,加剧土壤缺墒,抑制植被生长。西部较为湿润的地区,降水充沛,但光照条件一般,特别是西北部高海拔地区,降水的增加

使得光热条件变差,不利于植被生长。在一些高山峡谷地区,降水增多还会提升地质灾害的风险,对生态植被有一定破坏作用。从气候变化响应时间上看,阴冷潮湿东北部和寒冷干燥的西北部地区比温暖湿润且森林覆盖率较高的西南部更为敏感。

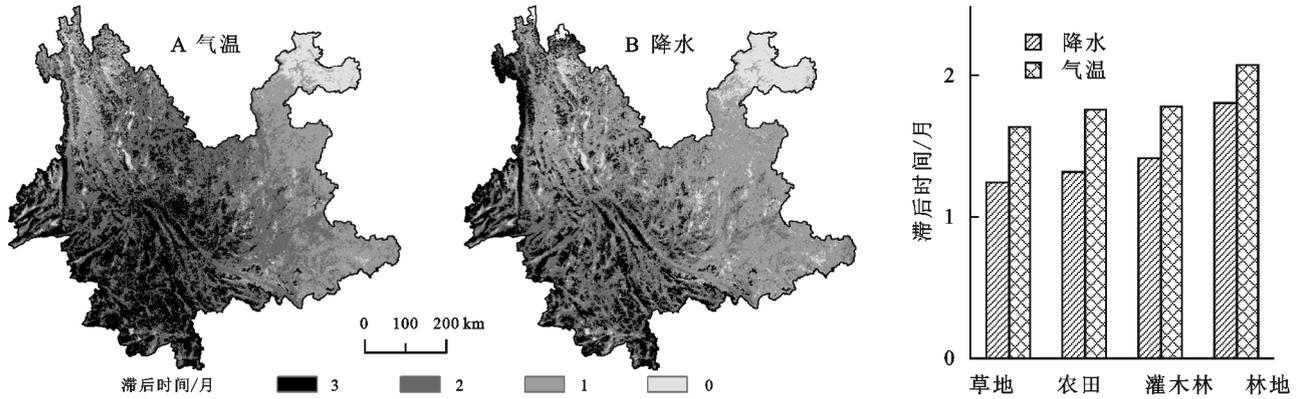


图 8 NDVI 与气温和降水响应的滞后时间分布

本文仅分析了气候对云南省植被的影响,没有考虑人为活动、社会经济等因素以及干旱、低温等极端气候事件与植被之间的关系。同时现有云南植被覆盖的研究中,定量评估人类活动影响、以及植被变化对气候的影响等方面研究尚比较缺乏,因此有必要借鉴新方法和新理论进行更一步的研究。

4.2 结论

(1) 2001—2019 年云南植被 NDVI 均值为 0.68, 西高东低、南高北低的空间分布。NDVI 值随海拔升高增加,在海拔 800 m 和 2 600 m 区域出现两个峰值。年内 3 月 NDVI 值最小,8 月、9 月则最大。4 个季节的 NDVI 值,秋、夏季大于冬、春季,秋季最大,春季最小。

(2) 2001—2019 年 NDVI 均值介于 0.66~0.73, 变化率 0.37% /a ($p < 0.001$), 显著改善面积占比为 45.7%。不同土地覆盖类型,除居民地植被 NDVI 变化为退化趋势外,其余为改善趋势。

(3) 全省 Hurst 指数 H 均值为 0.52, 未来植被 NDVI 变化趋势将持续改善。持续改善和持续退化的面积占比分别为 58.4% 和 9.9%, 变化趋势发生反转的为 31.7%, 其中未来退化的为 27.5%。不同土地覆盖类型,林地、耕地和居民地的 $H > 0.5$, 未来变化趋势继续的可能性强,即林地、耕地将持续改善,居民地将持续退化;草地和灌木林的 $H < 0.5$, 表明未来变化趋势可能由改善转变为退化。

(4) 年 NDVI 值与气温和降水的相关程度均值分别是 0.26 和 0.21, 大部分地区表现为正相关。显著相关面积占比分别为 14.24% 和 8.65%。总体上,气温对植被的影响大于降水。气温和降水的植被滞

后响应时间的均值分别是 1.9 月和 1.5 月。月尺度上植被对降水的响应更敏感。滞后期在空间上有着明显的地域差异,西南部大于东北部。相对其他植被类型,森林植被受气候变化的影响更小。

参考文献:

- [1] 谢慧君,张廷斌,易桂花,等.川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J].水土保持通报,2020,40(4):286-294.
- [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.
- [3] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(18):3519-3535.
- [4] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 1994,50(1):1-17.
- [5] 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.
- [6] 孙应龙,钱拴,延昊,等.2000—2018 年云南省典型矿区植被生态时空变化特征:以临沧市为例[J].生态环境学报,2019,28(12):2381-2389.
- [7] 邱成,胡金明,杨飞龄.基于 NDVI 的云南省自然保护区保护成效分析[J].生态学报,2020,40(20):7312-7322.
- [8] 刘珊珊,王建雄,牛超杰,等.基于 NDVI 的云南省植被覆盖变化趋势分析[J].湖北农业科学,2017,56(11):2037-2040.
- [9] 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.
- [10] 谷雷,岳彩荣,赵勋,等.基于 Google Earth Engine 的云南省 1999—2018 年植被覆盖度变化分析[J].西部林业科学,2020,49(5):74-80.
- [11] 曹云,钱永兰,孙应龙,等.基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J].生态环境学报,2020,29(5):857-865.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 赵桔超,朱彦辉,段国辉,等.基于 MOD13Q1 数据分析 2001—2015 年西双版纳植被变化特征[J].生态学杂志,2019,38(4):1083-1092.
- [16] 何云玲,熊巧利,余岚,等.基于 NDVI 云南地区植被生态系统对气候变化的适应性分析[J].生态科学,2019,38(6):165-172.
- [17] 陈宗瑜.云南气候总论[M].北京:气象出版社,2001.
- [18] 吴征镒,朱彦丞.云南植被[M].北京:科学出版社,1987.
- [19] Bian J, Li A, Song M, et al. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter[J]. Journal of Remote Sensing, 2010,14(4):725-741.
- [20] Stow D, Petersen A, Hope A, et al. Greenness trends of Arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007,28(21):4807-4822.
- [21] John R, Chen J, Lu N, et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(5):2018-2032.
- [22] 刘世梁,田韞钰,尹洁洁,等.云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对于旱的响应[J].生态学报,2016,36(15):4699-4707.
- [23] 何云玲,李同艳,熊巧利,等.2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J].生态学报,2018,38(24):8813-8821.

(上接第 161 页)

- [16] Cai H, Yang X, Xu X. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects [J]. Ecological Engineering, 2015,83:112-119.
- [17] Liu Y, Zhang Z, Tong L, et al. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe[J]. Ecological Indicators, 2019,106:105504.
- [18] Liang W, Yang Y, Fan D, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,204:22-36.
- [19] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013,110(1):52-57.
- [20] Liang X, Samanta A, Costa M H, et al. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought [J]. Geophysical Research Letters, 2011,38, L07402, doi:10.1029/2011 GL046824.
- [21] Zhou W, Gang C, Zhou L, et al. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China [J]. Acta Oecologica, 2014,55:86-96.
- [22] Gang C, Zhao W, Zhang Y, et al. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau. Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2018,645:827-836.
- [23] Verdoodt A, Evan R. Environmental assessment tools for multi-scale land resources information systems: A case study of Rwanda [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006,114(2):170-184.