

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)5 - 669 - 12

DOI:10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000458

横断山区植被绿度的时空变化特征及其成因

胡 实¹, 占车生^{1*}, 赵茹欣², 刘梁美子^{1,3}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 科学认识植被绿度变化的时空格局及驱动因子是生态系统管理的基础。横断山是我国西南地区的重要生态屏障, 对我国中西部地区的气候及生态环境有着深远影响。本文基于 MODIS *NDVI* 数据, 采用趋势分析法、偏相关分析及复相关分析等方法, 系统分析了 2001—2016 年横断山区植被 *NDVI* 的变化特征及其驱动因子。研究结果显示: 2001—2016 年横断山区 *NDVI* 年均值呈增加趋势, 年均增长率为 $4.4 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 。除夏季 *NDVI* 均值表现为降低趋势外, 其它季节 *NDVI* 均值均为增长趋势, 增速冬季 > 春季 > 秋季。海拔 4000 m 以下植被 *NDVI* 年均值介于 0.45 ~ 0.55, 其增速的海拔梯度差异较小 ($\pm 0.001 \text{ a}^{-1}$); 海拔 4000 m 以上随海拔梯度的增加, *NDVI* 年均值降低而其增速升高。横断山区植被 *NDVI* 变化受气候因子影响的面积仅为 16%, 大部分地区 *NDVI* 变化受 CO_2 浓度增加及土地利用变化等人类活动的影响。研究结果为横断山区生态保护和可持续发展提供参考依据。

关键词: 横断山区; 偏相关分析; 复相关分析; 均一化植被指数

中图分类号: K903

文献标志码: A

作为地球系统的重要组成部分, 植被影响着地表植被状况、水碳循环过程及近地层气候状况^[1-2]。同时, 气候变化诸如辐射、温度和降雨的变化, 通过改变植物生长可获取的能量和水分, 对植物的碳积累过程、水循环过程及土壤有机碳分解转换等过程产生影响, 进而影响植物的生长进程及分布格局^[3]。研究植被对气候变化的响应, 探讨气候因素的驱动作用, 已成为当前全球变化研究的主要内容之一, 对评价陆地生态系统质量、调节植被生态水文过程具有重要的理论和实际意义。

植被生长与气候变化密切相关。在较大的尺度上, 水热变化决定着植被变化的空间异质性^[4-5]。

在中国, 温度升高对植被生长整体上具有正效应^[6-7]; 而降雨对植被生长的作用具有明显的地理差异, 干旱区降雨对植被生长具有正效应^[8-9], 而在湿润区, 降雨增加不利于植被生长^[10]。除水热因子外, 植被变化还受到地形的影响^[11-13]。例如, 在太行山区, 低海拔处植被改善主要得益于降雨的增加, 而温度升高是高海拔地区植被改善的主要原因^[14]。在祁连山, 海拔 2500 ~ 3100 m 处, 降雨增加无法抵消温度升高带来的干旱化趋势, 植被生长受到抑制; 随着海拔的增加, 温度升高对植被的影响逐渐转为正效应^[15]。由此可见, 在区域尺度上, 尤其是山区这种具有复杂地形的区域, 综合考虑地形效应能更

收稿日期 (Received date): 2019 - 05 - 08; 改回日期 (Accepted date): 2019 - 11 - 15

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2015CB452701), 国家自然科学基金项目 (41571019) [National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2015CB452701); National Natural Science Foundation of China (41571019)]

作者简介 (Biography): 胡实 (1982 -), 女, 湖北咸宁人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态水文研究。[HU Shi (1982 -), female, born in Xianning, Hubei province, Ph. D., research assistant, research on ecohydrology] E-mail: hus.08b@igsnr.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 占车生 (1975 -), 男, 湖北黄冈人, 博士, 研究员, 主要从事流域水循环模拟研究。[ZHAN Chesheng (1975 -), male, born in Huanggang, Hubei province, Ph. D., professor, specialized in water cycle simulation of river basin] E-mail: zhancs@igsnr.ac.cn

好地揭示气候变化对植被的影响。

遥感信息是监测植被动态变化的重要数据源,被广泛运用于生态系统评价和全球气候变化研究中^[16-17],其中均一化植被指数 *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*) 更是被视为探测植被生长状况和年际变化的有效工具,在区域及全球尺度得到了广泛应用^[18-19]。大量研究显示,北半球中高纬度地区植物生长季有延长的趋势,植被绿度逐渐增加^[20]。自 20 世纪 80 年代以来,我国植被绿度总体上呈现增加趋势^[10,21-23]。气候及地形的综合作用使得山地植被生长具有显著的地形效应。例如,在亚龙藏布大峡谷自然保护区,植被的绿化趋势随海拔的升高而降低^[24];在北半球,北坡接收的太阳辐射少于东坡,植被生长受到抑制,因此新墨西哥北部雷东多 (Redondo) 北坡的森林覆盖度低于东坡^[25]。山区植被往往呈现显著的垂直地带性及地形差异,地形要素通过影响山区气候条件以及土壤状态,进而影响水分、能量的再分配和植被格局。

横断山区位于青藏高原东南缘,是我国长江上游重要的生态屏障区。横断山地形复杂,水分、温度和植被分布的垂直地带性差异显著^[26],湿润、干旱、干热等气候分区明显,是我国重力侵蚀高发区。2000 年以来,横断山区植被净初级生产力 (Net

Primary Productivity, *NPP*) 整体上呈现增加趋势^[27],但中北部等局部地区的森林覆盖度呈现退化趋势^[28-29]。目前,针对横断山区,结合地形要素对植被变化进行定量分析尚不多见。鉴于上述原因,本文拟采用 MODIS *NDVI* 数据,揭示横断山区 2000 年以来植被绿度变化的时空差异及其地形效应,并结合同期气象数据分析其成因,以为横断山区生态保护和可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

横断山区 (24.5°N ~ 34°N, 97°E ~ 104.5°E) 位于亚热带气候区,跨四川西部、西藏东南部以及云南西北部,总面积约 50.6 万 km²。横断山区岭谷高差极大,海拔介于 400 ~ 7500 m,地势北高南低、西高东低 (图 1),4000 m 以下以耕地、灌丛和针叶林为主,4000 m 以上多为高寒灌丛和草甸。研究区受西风环流、印度洋西南季风和西太平洋东南季风控制,年均温 14 ~ 16 °C,年降雨量 580 ~ 740 mm,沿海拔梯度升高分布着热带、亚热带、温带和高山寒带等气候类型。

1.2 数据

本研究中采用的数据包括遥感数据、气象数据

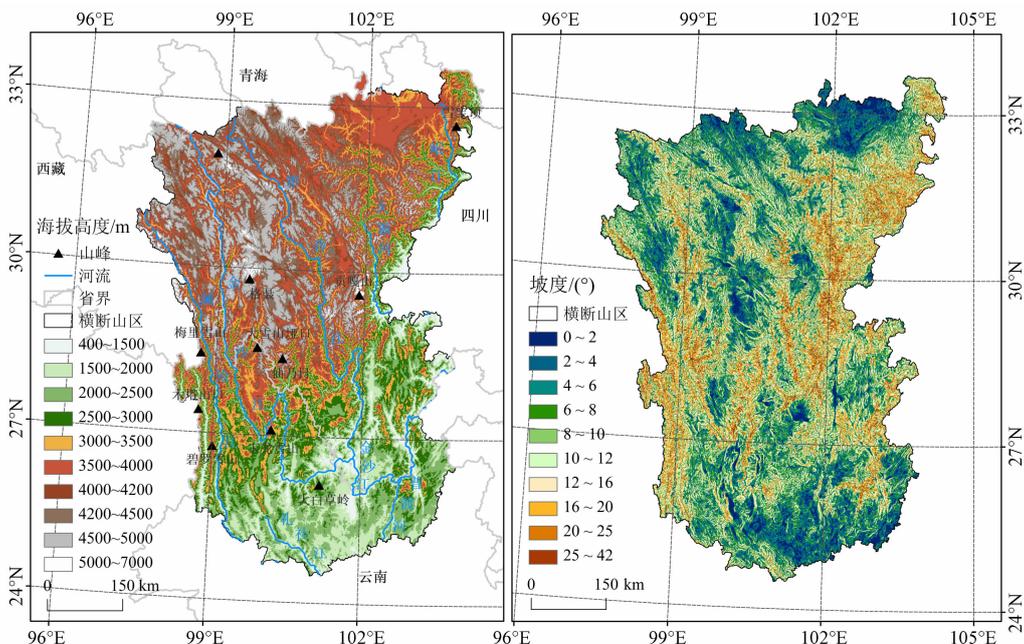


图 1 横断山区高程 (DEM) 及坡度分布

Fig. 1 Spatial pattern of elevation and slope gradient in the Hengduan Mountains Region

和地理信息数据。遥感数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的 EOS/MODIS 数据 (<https://modis.gsfc.nasa.gov>)。采用 2001—2016 年的 MOD13A2 产品 (NDVI), 时间分辨率为 16 天, 空间分辨率为 1 km。由于 MODIS NDVI 合成数据会受到气溶胶、冰雪、太阳光照角度及传感器观测视角等因素的影响, 出现数据异常及缺失。为保证获取较为准确的 NDVI 时序数据, 在采用 S-G (Savtzyk-Golay) 滤波法^[30]对 NDVI 数据进行平滑滤波处理的基础上, 采用最大合成法 (Maximum Synthesis Method) 得到月尺度 NDVI 数据。年均 NDVI 值为 12 个月 NDVI 的平均值, 季均 NDVI 分别为 3 月—5 月 (春季)、6 月—8 月 (夏季)、9 月—11 月 (秋季) 和 12 月—2 月 (冬季) 三个月 NDVI 的平均值。

2001—2016 年的气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 的地面降水、气温月值格点数据集, 该数据集经由全国 2416 个台站观测值插值获取, 空间分辨率为 0.5°, 本研究中采用双线性降尺度方法将其尺度下延至 1 km。

地理信息数据包括数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 和土地利用的数据。DEM 数据由中国科学院计算机网络信息中心国际科学与技术数据镜像站点 (<http://www.gscloud.cn>) 提供, 空间分辨率为 90 m, 采用最邻近法重采样至 1 km。基于 DEM, 采用 ArcGis10.0 提取横断山区的坡度信息。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/>), 空间分辨率为 30 m, 采用最大面积占比法重采样至 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

基于像元尺度, 采用一元线性回归趋势分析法^[31]对研究区 NDVI 的时间变化趋势进行分析。

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, θ 为 NDVI 的变化趋势, $\theta > 0$ 表示植被有绿化趋势, $\theta < 0$ 表示植被有退化趋势; n 为时间序列; $NDVI_i$ 表示第 i 年的 NDVI 值。

采用 F 检验确定 θ 的显著性:

$$F = \frac{U}{Q} \times (h - 2) \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^h (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^h (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

式中, U 为误差平方和; Q 为回归平方和; y_i 表示第 i 年 NDVI 观测值; \hat{y}_i 为 NDVI 的回归值; \bar{y} 为 NDVI 的平均值; h 为年份数。

1.3.2 相关性分析

为了确定植被 NDVI 变化的驱动因子, 偏相关分析和复相关分析^[23]均被用于分析 NDVI 与气象要素之间的相关关系。偏相关分析是在消除其他变量影响的前提下计算某两个变量之间的相关性, 本文在像元尺度上采用偏相关分析法分别研究了气温和降水量对植被 NDVI 变化的影响。为了计算偏相关系数, 首先计算相关系数如下:

$$r_{xw} = \frac{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (w_i - \bar{w})^2}} \quad (5)$$

其中, r_{xw} 为 x 与 w 的相关系数; x_i 和 \bar{x} 分别表示第 i 年的 NDVI 值和多年均值; w_i 和 \bar{w} 分别表示第 i 年的年均温 (或年降雨量) 和其多年平均值, s 为样本数。

偏相关系数计算如下:

$$r_{xw \cdot z} = \frac{r_{xw} - r_{xz}r_{wz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) + (1 - r_{wz}^2)}} \quad (6)$$

其中, r_{xw} 表示 x 与 w 的相关系数; r_{xz} 表示 x 与 z 的相关系数; r_{wz} 表示 w 与 z 的相关系数; $r_{xw \cdot z}$ 为 z 不变时 x 与 w 的偏相关系数。如果 $r_{xw \cdot z} > 0$, 则表示在排除 z 的影响下, x 与 w 具有正相关关系。

采用 t 检验法检验偏相关系数的显著性:

$$t = \frac{r_{xw \cdot z}}{\sqrt{1 - r_{xw \cdot z}^2}} \sqrt{s - m - 1} \quad (7)$$

其中, $r_{xw \cdot z}$ 为 x 与 w 的偏相关系数; s 和 m 分别表示样本数和自由度。

复相关分析主要用于研究多个要素 (w, z) 与特定要素 (x) 间的相关关系。变量 x 与变量 w, z 之间的复相关系数 $r_{x \cdot wz}$ 计算如下:

$$r_{x \cdot wz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xw}^2) + (1 - r_{xz \cdot w}^2)} \quad (8)$$

复相关系数的显著性检验采用 F 检验法:

$$F = \frac{r_{x \cdot wz}^2}{1 - r_{x \cdot wz}^2} \times \frac{s - k - 1}{k} \quad (9)$$

其中, x 为因变量; w 和 z 为自变量; s 和 k 分别表示

样本数和自变量个数。根据偏相关分析的 t 检验和复相关分析的 F 检验结果,横断山区 $NDVI$ 变化驱动因素划分标准如表 1 所示^[32]。当同时满足表 1 中某一行要求时,认为 $NDVI$ 变化的驱动因素为其对应驱动类型。

表 1 横断山区 $NDVI$ 驱动要素分区标准

Tab. 1 Regionalization rule of $NDVI$ driving factors in the Hengduan Mountains Region

驱动类型	$r_{NDVI \cdot P \cdot T}$	$r_{NDVI \cdot T \cdot P}$	$r_{NDVI \cdot P \cdot T}$
降雨驱动	$t > t_{0.01}$		$F > F_{0.01}$
气温驱动		$t > t_{0.01}$	$F > F_{0.01}$
气温、降雨驱动	$t < t_{0.01}$	$t < t_{0.01}$	$F > F_{0.01}$
非气候因子驱动			$F < F_{0.01}$

注: P 代表降雨; T 代表气温; $r_{NDVI \cdot P \cdot T}$ 表示降雨与 $NDVI$ 的偏相关系数; $r_{NDVI \cdot T \cdot P}$ 表示温度与 $NDVI$ 的偏相关系数; $r_{NDVI \cdot P \cdot T}$ 表示 $NDVI$ 与温度、降雨的复相关系数。

2 研究结果

2.1 $NDVI$ 的空间格局

横断山区 2001—2016 年植被 $NDVI$ 多年均值的空间格局如图 2 所示,植被 $NDVI$ 整体上呈由北向南的增加趋势。横断山区北部地区,植被 $NDVI$ 较低,大部分地区的值不高于 0.45,由西向东逐渐

增加;南部地区,植被 $NDVI$ 平均值整体上相对较高,大部分地区的 $NDVI$ 均值在 0.5 以上。此外,在横断山区的高山峡谷地区, $NDVI$ 呈现明显的岭谷差异。西面独龙江、怒江、澜沧江峡谷以及东部大渡河峡谷、雅砻江峡谷地区, $NDVI$ 均表现为河流谷底高,逐渐向山岭减小,而在中部金沙江流域则是河流谷底的 $NDVI$ 比较低,然后沿河岸山脉先增加后减小。总体而言,横断山区 4000 m 以下多为耕地、灌丛及针叶林^[26],植被 $NDVI$ 均值的差异较小;4000 m 以上依次为高寒灌丛、草甸、草原带及冰雪带^[26], $NDVI$ 随海拔梯度的增加而降低。

2.2 $NDVI$ 的年际变化

2001—2016 年横断山区 $NDVI$ 年均值呈增加趋势($P = 0.49$),年均增长率为 $4.4 \times 10^{-4} a^{-1}$,其中增长速度冬季 > 春季 > 秋季,夏季呈降低趋势(图 3)。 $NDVI$ 年均值变化率介于 $\pm 0.015 a^{-1}$ 间,呈现显著的空间分异性,52% 的区域呈增加趋势,其中 23.5% 的区域增加趋势显著,19% 的区域呈显著减少趋势(图 4)。 $NDVI$ 年均值呈增加趋势的区域主要集中在研究区北部以及南部的东侧地区,其中云南的巧家—会泽地区,大渡河、金沙江峡谷、雅砻江峡谷地区等地的年增长率较大,超过 $0.01 a^{-1}$,而 $NDVI$ 年均值呈减少趋势的区域主要集中在研究区东北部的汶川—映秀以及南部的攀枝花等地区。

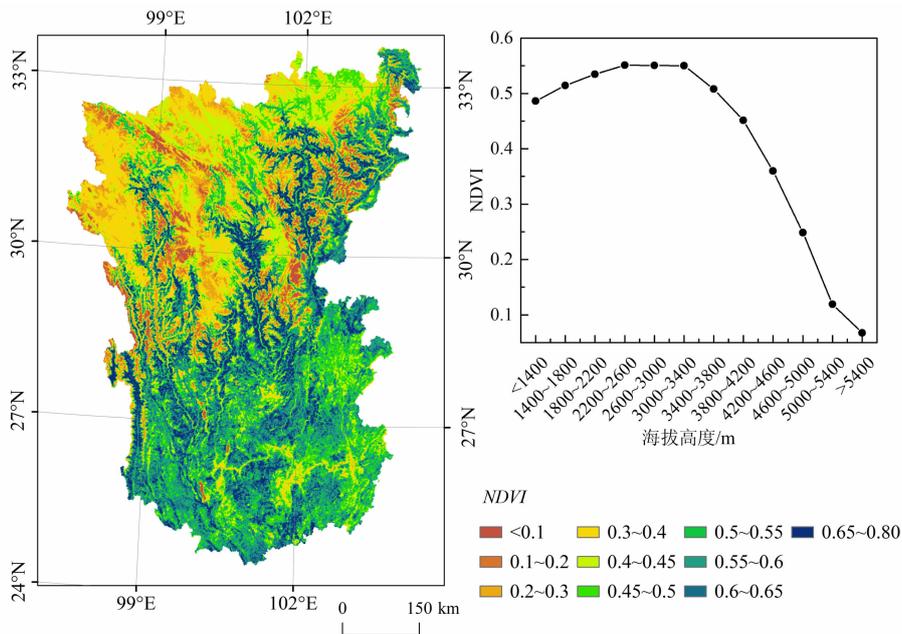


图 2 2001—2016 年横断山区 $NDVI$ 年均值的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of annual mean $NDVI$ in the Hengduan Mountains Region from 2001 to 2016

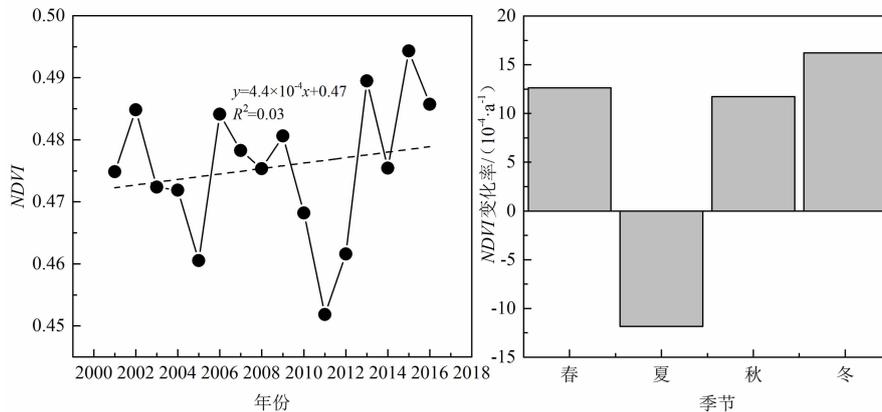


图 3 2001—2016 年年均 NDVI 及不同季节 NDVI 的多年变化趋势

Fig. 3 Trend of averaged NDVI at annual scale and seasonal scale from 2001 to 2016

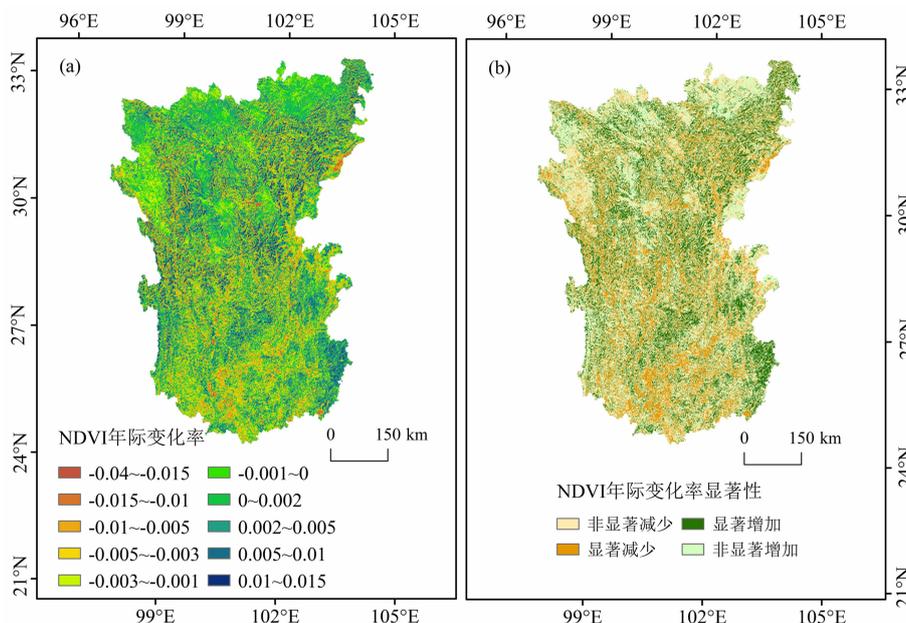


图 4 横断山区年均 NDVI 变化率及其显著性的空间格局: (a) NDVI 的年均变化率; (b) NDVI 年均变化率的显著性

Fig. 4 Spatial pattern of annual NDVI trend and its significance level in the Hengduan Mountains Region

(a) trend of annual NDVI; (b) significance level of annual NDVI trend

NDVI 的年均变化率具有显著的地形效应:海拔 4000 m 以下,50% 左右的像元 NDVI 年均值呈增加趋势,其增速介于 $\pm 0.001 \text{ a}^{-1}$ 间;海拔 4000 m 以上,随海拔梯度的升高,年均 NDVI 呈增加趋势的像元比例及其平均增长率逐渐升高;在海拔 5000 m 时,90% 的区域 NDVI 呈增加趋势,年均增长率高达 0.003 a^{-1} ;由于海拔 5500 m 以上研究区多为冰雪覆盖,NDVI 的增速略微下降(图 5)。由于水土条件,日照辐射等差异,年均 NDVI 变化率表现出显著的坡度效应:在坡度小于 6° 时,55% 以上的区域 NDVI 呈增加趋势,其年均增长率为 0.001 a^{-1} ;随着

坡度的增加,年均 NDVI 呈增加趋势的像元比例及其平均增长率逐渐降低;当坡度大于 26° 时,不足 40% 的区域 NDVI 呈增加趋势,其中呈显著增长趋势的像元只有 20%,年均 NDVI 呈减少趋势,年均变化率为 -0.0013 a^{-1} (图 6)。

2.3 NDVI 与气候因子的相关分析

2.3.1 气候因子的变化趋势

2001—2016 年横断山区气温呈上升趋势,区域年均温变化率为 $0.146 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,接近于李宗省等^[33]对横断山区(5 月—10 月)气温变化的研究结果($0.117 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)。研究区气温变化呈现显

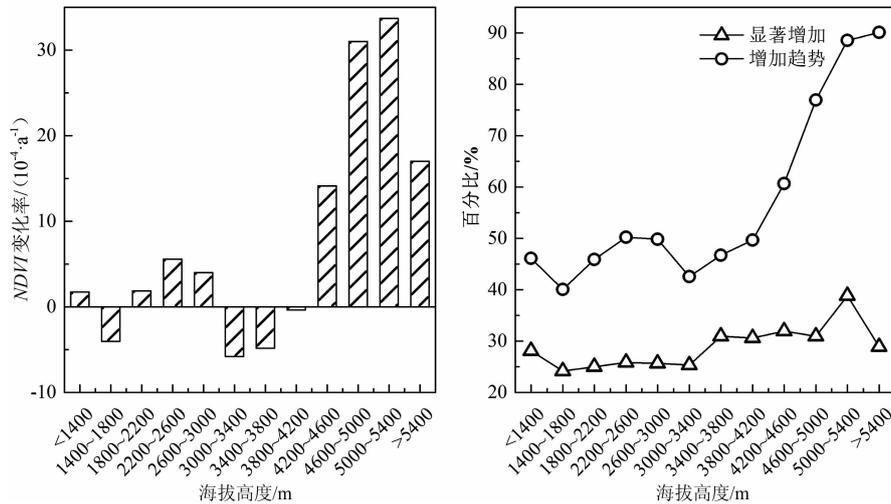


图5 NDVI年际变化率的海拔梯度效应

Fig. 5 Interannual change trend of NDVI in different elevation gradients

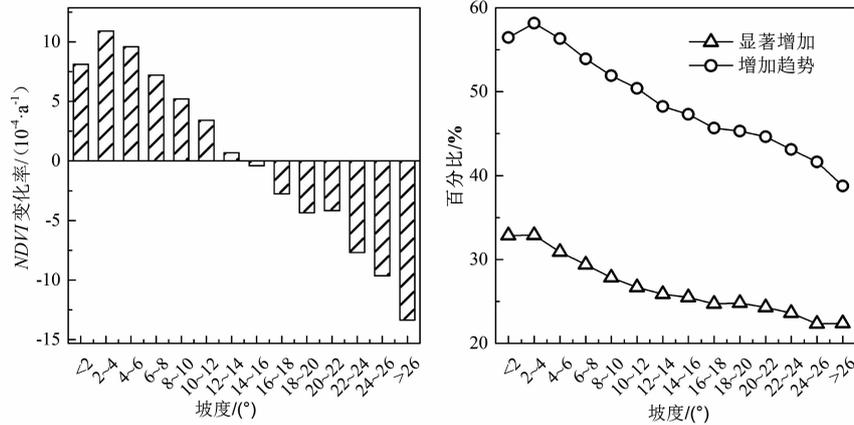


图6 年均NDVI变化率的坡度效应

Fig. 6 Interannual change trend of NDVI at different slope gradients

著的季节差异和空间分异性,气温变化率呈现春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季的趋势。春季和夏季气温呈增加趋势,其年均增长率分别为 0.069 和 $0.052 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; 冬季和秋季气温呈降低趋势,其年均变化率分别为 -0.005 和 $-0.057 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。横断山区年均温变化率介于 $-0.4 \sim 0.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,北部及中南部地区气温呈增加趋势,占研究区面积的 75% 以上,西南部及东部边缘地区温度下降显著(图 7)。横断山区降雨量呈微弱的减少趋势,区域年均值变化率为 $-2.6\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其变化率呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季的趋势,其中夏季、秋季、春季和冬季的年均变化率分别为 2.89 、 -3.64 、 -16.4 和 $-28.4\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。由东北向西南,年降雨量由增加趋势逐渐转变为减少趋势,其中年降雨量增加

区域占研究区面积的 45%。总体而言,横断山北部地区气温和降雨均呈增加趋势,中南部地区温度增加,降雨减少,而东南和西南部地区温度降低,降雨增加(图 7)。

2.3.2 NDVI 与气候因子的偏相关分析

横断山区植被 NDVI 与年均温的偏相关性系数介于 $-0.9 \sim 0.87$ 之间,正相关区域主要集中于北部的阿坝地区,占研究区面积的 46%,其中只有 2% 的区域相关性通过了 95% 的显著性检验;负相关区域主要集中于南部的攀枝花、昆明、凉山彝族自治州地区,4.5% 的区域负相关性显著 ($P > 95\%$)。69% 的区域春季 NDVI 与温度变化呈现正相关(表 2),说明温度升高有利于植被的恢复;55% 的区域夏季 NDVI 与温度变化呈现负相关(显著负相关比例为

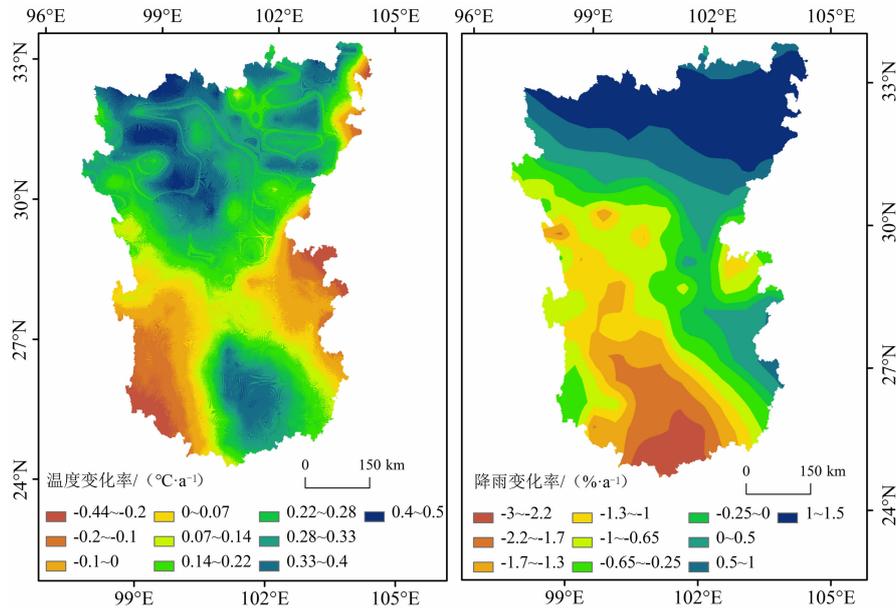


图 7 2001—2016 年横断山区气温、降雨变化趋势的空间格局

Fig. 7 Spatial patterns of interannual variation of temperature and precipitation in the Hengduan Mountains Region from 2001 to 2016

7.97%)，说明夏季温度的升高限制了植被生长。

横断山区植被 *NDVI* 与年降雨量的偏相关性系数介于 $-0.89 \sim 0.93$ 之间，正相关区域主要集中于西部的察雅—贡觉县、中部香格里拉一带、南部的永胜—宾川—祥云以及东南部边缘，占研究区面积的 50% (4.2% 的区域相关性显著)；负相关区域主要集中于研究区东北部、西部的怒江及中部的攀枝花、丽江等地，2.9% 的区域负相关性显著。秋季，66.5% 的区域降雨变化与 *NDVI* 呈正相关 (5.78% 的区域相关性显著)，说明秋季降雨的减少对植被生长的限制作用较为明显。

值得注意的是 *NDVI* 与气温、降水的偏关系数在横断山区东北部的阿坝、红原、马尔康、壤塘及金川地区以及南部的会理、元谋等地存在正负相关性互补现象。整体而言，横断山区 2001—2016 年植被 *NDVI* 与气温、降水的偏相关系数的平均值分别为 -0.003 和 0.004 ，植被 *NDVI* 与气温、降水量相关性的特征并不明显。

2.3.3 *NDVI* 变化驱动因子的空间分布

横断山区 *NDVI* 变化驱动因素分区显示 (图 9)，横断山大部分地区 (84%) 属于非气候因素驱动区域，以气温为主要驱动因素的区域约占研究区面积的 4.97%，分布在南部的攀枝花、昆明以及北部的阿坝地区；有 6.86% 区域以降雨为主要驱动因素，主要集中在研究区东北部地区；受气温、降雨共

表 2 *NDVI* 与气候因子的偏相关关系的季节差异 (%)

Tab. 2 The seasonal differences in partial correlations coefficient between *NDVI* and climatic factors (%)

气候因子	季节	格点所占比例/%			
		显著正相关	非显著正相关	显著负相关	非显著负相关
温度	春	15.81	53.50	3.31	27.37
	夏	3.89	41.43	7.97	46.71
	秋	3.56	66.16	0.34	29.89
	冬	4.90	46.45	4.04	44.60
降雨	春	4.35	43.98	6.23	45.43
	夏	1.71	30.17	8.70	59.40
	秋	5.78	60.85	0.78	32.60
	冬	2.09	34.70	6.24	56.97

注：表中数据表示 *NDVI* 与气象因子的相关性满足不同显著性水平下的格点占研究区全部格点的比例。

同作用驱动的区域主要集中在横断山区南部的丽江、楚雄、攀枝花以及阿坝的北部地区，面积约占研究区面积的 4.25%，说明气候因素变化不是横断山区植被 *NDVI* 变化的主要驱动因素。

3 讨论和结论

3.1 讨论

2001—2016 年横断山区 *NDVI* 整体呈现增加

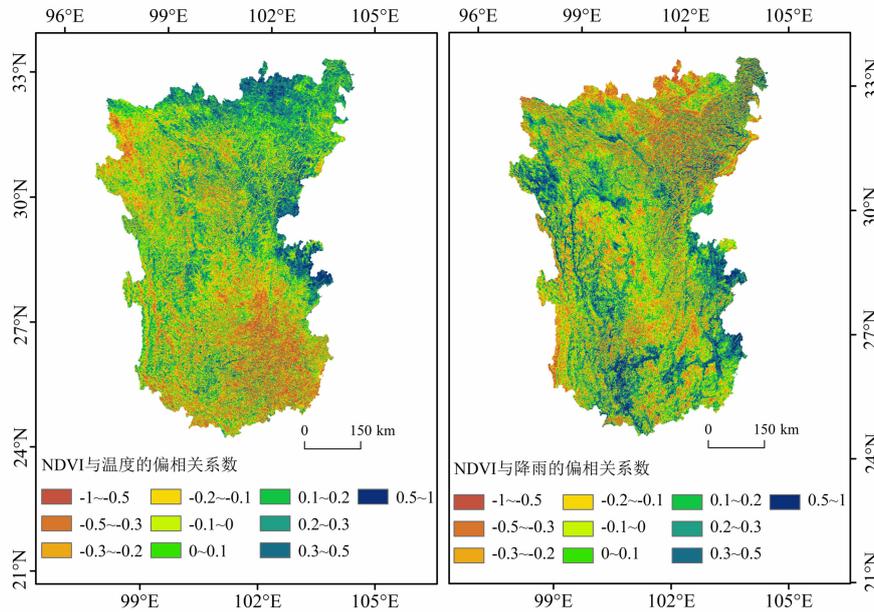


图 8 横断山区植被 *NDVI* 与气温、降雨偏相关系数的空间格局

Fig. 8 Spatial pattern of partial correlation coefficients between *NDVI* and temperature, *NDVI* and precipitation in the Hengduan Mountains Region

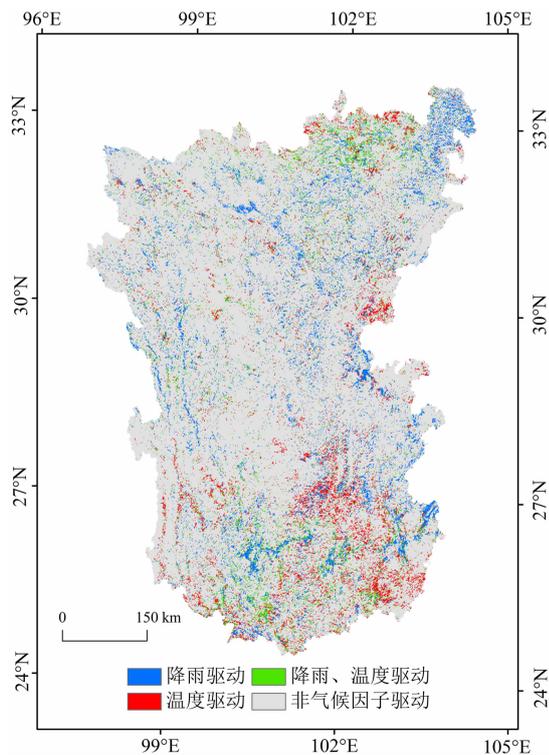


图 9 横断山区植被 *NDVI* 变化驱动因子的空间格局

Fig. 9 Spatial patterns of *NDVI* driving factors in the Hengduan Mountains Region

我国 *NDVI* 增速春季最显著、秋季最不显著的特征有所差异^[10]。1960 年以来研究区冬季的温度显著上升^[35], 有利于 *NDVI* 的快速增加, 虽然春季温度增幅较慢^[35], 但春季植物开始返青, 升温可以显著提高植物叶片内叶绿素含量、光合作用酶活性及植物净光合速率, 进而促进植被生长, 说明春季温度的上升对植被生长至关重要。研究表明在北半球的中高纬度地区, 春季和秋季 *NDVI* 的变化与温度显著相关^[36]。我国华北地区、呼伦贝尔草原、科尔沁沙地、浑善达克沙地的等地也发现生长季初期温度的上升有利于植被的生长^[37-40]。

植被生长受环境及人类活动的共同影响, 降水和温度是气候环境中影响植被生长最重要的两个要素。在我国大部分地区, 温度升高或降水增多会引起 *NDVI* 增加^[10], *NDVI* 与气候的相关系数自南向北, 自东南向西北逐渐增加^[41]。横断山区位于我国西南, 大部分地区 (84%) 属于非气候因素驱动区域, 只有 16% 的地区 *NDVI* 变化主要由气象要素变化引起。针对全球的研究表明, 气象要素变化只能解释 1982—2009 年全球叶面积指数 8% 的变化, CO_2 增加是引起全球 LAI 增加的主要因素^[42]。开放式 CO_2 浓度升高实验 (FACE) 的结果也显示, CO_2 浓度升高极大地提高了作物的生产力^[43]。横断山

趋势, 与全球及我国其他各地的变化趋势一致^[34, 21-23]。横断山区 *NDVI* 的变化存在显著的季节差异, 冬季与春季增速最快, 夏季则呈降低趋势, 与

区以耕地、灌丛和针叶林为主,大部分为 C3 植物,更易受 CO₂ 浓度升高的影响。此外,土地利用也是引起植被 *NDVI* 变化的一个主要因素。海拔 4000 m 以下,年均 *NDVI* 的增速介于 $\pm 0.001 \text{ a}^{-1}$ 间,而海拔 4000 m 以上,随海拔梯度的升高,年均 *NDVI* 平均增长率呈增加趋势,年均 *NDVI* 增长率呈增加趋势的像元的比例也逐渐升高(图 5)。高海拔地区,草地和草甸的比例逐渐增加^[44],受封山育林,退耕还林还草等政策的影响,一方面部分草地转为灌丛,另一方面一些未利用土地转为草地,使得草地面积持续增加^[45],使得高海拔地区植被 *NDVI* 快速增长。

3.2 结论

气候变化背景下,科学认识横断山区植被 *NDVI* 变化的时空格局,能够为横断山区生态系统的可持续发展及我国中西部地区环境保护提供依据。本文基于 MODIS *NDVI* 数据,系统分析了横断山区 2001—2016 年 *NDVI* 变化的时空格局,并结合偏相关和复相关分析法,分析了 *NDVI* 变化的驱动因子。研究结果显示:

(1) 受植被分布和气候条件的影响,海拔 4000 m 以下,横断山区植被多年 *NDVI* 均值较高且变化较小;海拔 4000 m 以上,受土地利用变化及温度升高的影响,年均 *NDVI* 增速随海拔的升高而增加。

(2) 受增温的季节差异影响,横断山区 *NDVI* 增速表现为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的趋势,春季温度的升高有利于植被 *NDVI* 的快速增加。

(3) 横断山区植被 *NDVI* 变化受温度和降雨变化影响的面积仅为 16%,对于大部分地区(84%)而言,由人类活动带来的 CO₂ 浓度增加、土地利用变化是植被 *NDVI* 增加的主要原因。

由于横断山区气候及地势条件复杂,今后的研究应当更加注重气候变化对植被影响的机理,以及不同地势条件下植被对气候变化响应的差异。

参考文献 (References)

- [1] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity [J]. *Nature*, 2015, **520** (7545): 45–50.
- [2] STERLING S M, DUCHARNE A, POLCHER J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. *Nature Climate Change*, 2012, **3**(4): 385–390.
- [3] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(9): 2016–2022. [LIU Junhui, GAO Jixi. Effects of climate and land use change on the changes of vegetation coverage in farming-pastoral ecotone of Northern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(9): 2016–2022.]
- [4] CRAMER W, BONDEAU A, WOODWARD F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(4): 357–373.
- [5] THEURILLAT J P, GUISAN A. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review [J]. *Climatic Change*, 2001, **50**(1–2): 77–109.
- [6] SONG Y, MA M. A statistical analysis of the relationship between climatic factors and the Normalized Difference Vegetation Index in China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, **32** (14): 3947–3965.
- [7] XU G, ZHANG H, CHEN B et al. Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's landmass from 1982 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(4): 3263–3283.
- [8] FENSHOLT R, LANGANKE T, RASMUSSEN K et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**(2): 144–158.
- [9] KAWABATA A, ICHII K, YAMAGUCHI Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using *NDVI* and its relationships to temperature and precipitation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(7): 1377–1382.
- [10] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (*NDVI*) in China from 1982 to 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, **108**(D14): ACL 1–1.
- [11] BROWN D G. Comparison of vegetation-topography relationships at the alpine treeline ecotone [J]. *Physical Geography*, 2013, **15** (2): 125–145.
- [12] FU C, HUA X, LI J, et al. Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: geometric constraints, area and climate effects [J]. *Echography*, 2006, **29**(6): 919–927.
- [13] ZHANG J T, XU B, LI M. Vegetation patterns and species diversity along elevational and disturbance gradients in the Baihua Mountain Reserve, Beijing, China [J]. *Mountain Research & Development*, 2013, **33**(2): 170–178.
- [14] 王飞宇. 太行山区不同垂直带的植被生态水文过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017, 37–38. [Wang Feiyu. Ecohydrological Processes on Altitudinal Vegetation Belts in Taihang Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 37–38.]

- [15] DENG S F, YANG T B, Zeng B, et al. Vegetation Cover Variation in the Qilian Mountains and its Response to Climate Change in 2000 – 2011 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(6): 1050 – 1062.
- [16] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, **300**(5625): 1560 – 1563.
- [17] PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al. Using the satellite-derived *NDVI* to assess ecological responses to environmental change [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, **20**(9): 503 – 510.
- [18] GOWER S T, KUCCHARIK C J, NORMAN J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, *fAPAR*, and net primary production of terrestrial ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**(1): 29 – 51.
- [19] FENSHOLT R, SANDHOLT I, RASMUSSEN M S. Evaluation of MODIS LAI, *fAPAR* and the relation between *fAPAR* and *NDVI* in a semi-arid environment using in situ measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(3–4): 490 – 507.
- [20] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature (London)*, 1997, **386**(6626): 698 – 702.
- [21] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强 [J]. *中国科学 (C 辑: 生命科学)*, 2003, **33**(6): 554 – 565. [FANG Jingyun, PIAO Shilong, HE Jinsheng, et al. Vegetation dynamic is enhanced in China in recent twenty years [J]. *Science in China (Series C)*, 2003, **33**(6): 554 – 565]
- [22] 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 等. 2000 – 2013 年三江源植被 *NDVI* 变化趋势及影响因素分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2016, **18**(12): 1707 – 1716. [SUN Qingling, LI Baolin, XU Lili, et al. Analysis of *NDVI* change trend and its impact factors in the Three-River Headwater Region from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2016, **18**(12): 1707 – 1716]
- [23] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001 – 2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2012, **67**(9): 1255 – 1268. [MU Shaojie, LI Jianlong, CHEN Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001 – 2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(9): 1255 – 1268]
- [24] LI Haidong, JIANG Jiang, CHEN Bin, et al. Pattern of *NDVI*-based vegetation greening along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and its response to global warming [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(3): 186.
- [25] ZAPATA-RIOS X, BROOKS P D, TROCH P A, et al. Influence of terrain aspect on water partitioning, vegetation structure and vegetation greening in high-elevation catchments in northern New Mexico [J]. *Ecohydrology*, 2016, **9**(5): 782 – 795.
- [26] 刘伦辉, 余有德, 张建华. 横断山自然植被垂直带的划分 [J]. *云南植物研究*, 1984, **6**(2): 205 – 216. [LIU Lunhui, YU Youde, ZHANG Jianhua. The division of vertical vegetation zone in Hengduanshan [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1984, **6**(2): 205 – 216]
- [27] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004 – 2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(9): 3084 – 3095. [WANG Qiang, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 3084 – 3095]
- [28] 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. [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 & Resources*, 2017, **29**(3): 128 – 136]
- [29] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化 [J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(4): 723 – 731. [WU Bingfang, YUAN Quanzhi, YAN Changzhen, et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010 [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(4): 723 – 731]
- [30] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality *NDVI* time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(3–4): 332 – 344.
- [31] STOWD, DAESCHNER S, HOPE A, et al. Variability of the seasonally integrated Normalized Difference Vegetation Index across the north slope of Alaska in the 1990s [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(5): 1111 – 1117.
- [32] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983 ~ 1992 年中国陆地 *NDVI* 变化的气候因子驱动分析 [J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(6): 716 – 720. [CHEN Yunhao, LI Xiaobing, SHI Peijun. Variation in *NDVI* driving by climate factors across China, 1983 – 1992 [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 716 – 720]
- [33] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960 – 2008 年气温和降水时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(5): 563 – 579. [LI Zongxing, HE Yuanqing, XIN Huijuan, et al. Spatio-temporal Variations of Temperature and Precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960 – 2008 [J]. 2010, **65**(5): 563 – 579]
- [34] BAO G, QIN Z H, BAO Y H, et al. *NDVI*-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(9): 8337 – 8358.
- [35] XU Fei, JIA Yangwen, PENG Hui, et al. Temperature and precipitation trends and their links with elevation in the Hengduan Mountain region, China [J]. *Climate Research*, 2018, **75**(2): 163 – 180.

- [36] ICHII K, KAWABATA A, YAMAGUCHI Y. Global correlation analysis for *NDVI* and climatic variables and *NDVI* trends: 1982 – 1990 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23** (18): 3873 – 3878.
- [37] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2011, **66**(1): 47 – 58. [ZHANG Geli, XU Xingliang, ZHOU Caiping, et al. Response of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir Grassland in past 30 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(1): 47 – 58]
- [38] 孙艳玲, 郭鹏. 1982 – 2006年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 7 – 12. [SUN Yanling, GUO Peng. Variation of vegetation coverage and its relationship with climate change in north China from 1982 to 2006 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 7 – 12]
- [39] 马龙, 王静茹, 刘廷玺, 等. 2000 – 2012年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(4): 162 – 172. [MA Long, WANG Jingru, LIU Tingxi, et al. Response relationship between vegetation and climate factors in Horqin Sandy Land from 2000 to 2012 [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, **47**(4): 162 – 172]
- [40] 元志辉, 包刚, 银山, 等. 2000 – 2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J]. *草业学报*, 2016, **25**(1): 33 – 46. [YUAN Zhihui, BAO Gang, YIN Shan, et al. Vegetation changes in Otindag sand country during 2000 – 2014 [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(1): 33 – 46]
- [41] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 *NDVI* 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(3): 379 – 382. [LI Xiaobing, SHI Peijun. Sensitivity analysis of variation in *NDVI*, temperature and precipitation in typical vegetation types across China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(3): 379 – 382]
- [42] ZHU Z, PIAO S, MYNENI R B, et al. Greening of the Earth and its drivers [J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(8): 182.
- [43] LONG S P, AINSWORTH E A, LEAKEY A D B, et al. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations [J]. *Science*, 2006, **312**(5782): 1918 – 1921.
- [44] 胡实, 赵茹欣, 贾仰文, 等. 中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素[J]. *自然杂志*, 2018, **40**(1): 12 – 16. [HU Shi, ZHAO Ruxin, JIA Yangwen, et al. The characteristic of vegetation vertical zonality and the influential factors in typical mountains in China [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, **40**(1): 12 – 16]
- [45] 金芳芳, 辛良杰. 中国闲置耕地的区域分布及影响因素研究[J]. *资源科学*, 2018, **40**(4): 719 – 728. [JIN Fangfang, XIN Liangjie. Spatial distribution and impact factors of farmland abandonment [J]. *Resources Science*, 2018, **40**(4): 719 – 728]

Detecting Changes and Causes of Vegetation Greenness in Hengduan Mountains Region, China

HU Shi¹, ZHAN Chesheng^{1*}, ZHAO Ruxin², LIU Liangmeizi^{1,3}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Beijing Normal University, College of Water Sciences, Beijing 100875, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Attributing variation of vegetation greenness to climate change and human activities is important, because it provide fundamental information for ecosystem management. The Hengduan Mountains is an essential ecological barrier for southwestern China, and exerts profound influences on the climate and ecological environment of Midwestern China. Based on the Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) data, the spatial-temporal variation of vegetation greenness from 2001 to 2016 was detected in Hengduan Mountains Region. With the aid of partial correlation analysis and multiple correlation analysis, *NDVI* variation was attributed to climate change and human activities. Results showed that regional averaged annual *NDVI* increased from 2001 to 2016, with an averaged increasing rate of $4.4 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$. Except for summer, the seasonal averaged *NDVI* showed increasing trend. The highest increasing rate was found in winter, followed by those in spring and autumn. Below 4000 m,

averaged annual *NDVI* ranged from 0.45 to 0.55, with interannual change rate between $\pm 0.001 \cdot a^{-1}$, indicating there was slight difference in interannual variation of *NDVI* along altitude. Above the altitude of 4000 m, annual *NDVI* decreased with the altitude, whereas the interannual increasing rate of *NDVI* increased with altitude. The partial correlation analysis and multiple correlation analysis showed that *NDVI* variation principally controlled by the variation of precipitation and temperature in 16% areas of Hengduan Mountains Region, whereas human activities, such as carbon dioxide enrichment and land use change, were the dominant factors impact *NDVI* variation in most study area. This study can provide scientific reference for ecological protection and sustainable development in Hengduan Mountains Region.

Key words: Hengduan Mountains Region; partial correlation analysis; multiple correlation analysis; *NDVI*

会讯:

“变化环境下的山地未来” ——2019 年中国地理学大会山地分会场

2019 年 11 月 1 日至 3 日,2019 年中国地理学大会暨中国地理学会成立 110 周年纪念活动在北京举行。大会特邀了 11 位中外著名地理学家做大会报告,并设立了 61 个分会场进行专题学术交流。中国地理学会山地分会承办了第 31 分会场学术交流活动。

第 31 分会场的主题为“变化环境下的山地未来”,采取学术沙龙的形式,邀请了国内四位专家做主题引导发言。分会场由中国地理学会山地分会主任委员邓伟研究员主持,北京大学蔡运龙教授、云南财经大学明庆中教授、中科院地理资源所李秀彬研究员、中科院西北研究院丁永建研究员等分别作了“山地系统变化的人文视角”“山—海战略:国家区域发展战略的衔接与拓展”“转型期农地贬值与山区发展”“冰冻圈与全球变化”的主题报告,从不同学科领域认识山地生态系统,并结合自然和社会发展等变化环境,探讨了未来山地研究的发展方向。

本届大会以“创新发展 再创辉煌——中国地理学理论与实践”为主题,旨在搭建学术交流与国际合作平台,引领全国地理学人以地理学基础研究、应用基础研究为核心,不断提升中国地理学的理论、方法和技术水平,促进学科发展,服务国家和社会,使地理科学发展成为指导人类社会可持续发展的重要基础学科。

(中国地理学会山地分会 供稿 2019-11-11)