

# 横断山区植被覆盖时空变化及其驱动因素

陶敏<sup>1,2</sup>, 雒苑婷<sup>1,2</sup>, 罗曼<sup>1,2</sup>, 杨存建<sup>1,2</sup>

(1.四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室,  
四川 成都 610068; 2.四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610068)

**摘要:** [目的] 探讨横断山区植被覆盖的时空变化特征和影响因子, 为掌握横断山区植被覆盖时空变化特征提供科学依据。[方法] 采用 Theil-Sen 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验法, 分析 2002—2022 年横断山区 NDVI 的月际和年际变化以及空间上的整体变化情况; 运用偏相关分析方法, 研究温度和降水对植被覆盖度的影响; 最后结合土地覆盖数据, 探讨人类活动对植被覆盖的影响。[结果] ①横断山区 21 a 间 NDVI 呈波动中上升趋势, 3 月最低, 9 月最高; ②空间上植被覆盖增加的区域占 83.78%, 主要分布在东南、西南和北部区域; 减少的区域占 15.87%, 主要分布在中部、南部、西北部和东北部, 整个研究区呈现出较好的植被增加趋势; ③温度和降水与 NDVI 在月尺度上均为正相关, 而在年尺度上, 温度与 NDVI 呈正相关关系, 降水与 NDVI 呈弱负相关关系, 且温度与 NDVI 的相关性强于降水。④21 a 间农用地面积大幅度减少, 林地面积增加幅度很大, 草地面积小幅度减少, 城市和建筑用地、水域面积变化不大。横断山区 21 年间 NDVI 增加重要原因为林地面积的大幅增长。[结论] 横断山区植被覆盖在时间和空间上都存在着较大的差异, 温度和降水都是影响植被覆盖的因素, 土地利用也是植被覆盖变化的推动力。

**关键词:** 植被覆盖; 时空变化; 气候变化; 土地利用; 横断山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0183-10

中图分类号: Q948

**文献参数:** 陶敏, 雒苑婷, 罗曼, 等. 横断山区植被覆盖时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 183-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.020; Tao Min, Luo Yuanting, Luo Man, et al. Spatial and temporal changes in vegetation cover and its driving factors in Hengduan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 183-192.

## Spatial and Temporal Changes in Vegetation Cover and Its Driving Factors in Hengduan Mountains

Tao Min<sup>1,2</sup>, Luo Yuanting<sup>1,2</sup>, Luo Man<sup>1,2</sup>, Yang Cunjian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Southwest Land Resources Evaluation and Monitoring,

ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610068, China;

2. School of Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610068, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal properties of vegetation cover in the Hengduan Mountains and the variables that influence them was investigated in order to provide the scientific basis to understand this topic. [Methods] The Theil-Sen trend analysis and Mann-Kendall test were used to analyse the inter-monthly and inter-annual variability of the normalized difference vegetation index (NDVI) in the Hengduan mountains from 2002 to 2022, as well as spatially overall. Using partial correlation analysis, the effects of temperature and precipitation on vegetation cover were examined. Finally, the impact of human activities on vegetation cover was explored combining with land cover data. [Results] ① The NDVI in the Hengduan mountains area showed an increasing fluctuating trend over 21 years, at its lowest in March and highest in September. ② The spatial vegetation cover increased by 83.78%, primarily in the southeastern, southwestern, and northern regions, and decreased by 15.87%, primarily in the central, southern, northwestern, and northeastern regions, with a good trend of increasing vegetation cover throughout the

收稿日期: 2024-03-06

修回日期: 2024-05-30

资助项目: 国家重点研发计划项目“全球目标网格系统构建与网格化位置服务”(2018YFB0505303); 四川省科技厅重点研发项目“基于遥感影像的国土地物状态动态监测关键技术研究”(2020YFG0146)

第一作者: 陶敏(2001年—), 女(汉族), 四川省乐山市人, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感与GIS应用研究。Email: ttaommin@163.com。

通信作者: 杨存建(1967年—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 教授, 主要从事遥感与GIS应用研究。Email: yangcj2008@126.com。

study area. ③ The NDVI showed a strong positive correlation with both temperature and precipitation on the monthly scale, while on the annual scale, it showed a weak negative correlation with precipitation and a positive correlation with temperature. ④ During the 21-year period, there was a significant decrease in the area of agricultural land, a large increase in the area of forestland, a slight decrease in the area of grassland, and little change in the areas of urban and built-up land and water. One of the reasons for the increase in the NDVI throughout the 21-year period in the Hengduan Mountains region is the large increase in forested land area. [Conclusion] There were significant temporal and spatial variations in vegetation cover in the Hengduan Mountains. Temperature and precipitation influenced both vegetation cover and land use as driving factors of vegetation cover change.

**Keywords:** vegetation cover; spatial and temporal variability; climate change; land use; Hengduan Mountains

地表植被是陆地生态系统中重要的组成部分<sup>[1]</sup>, 对于全球气候变化、固碳减排、水土保持等具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。Cao Yipeng 等<sup>[4]</sup>基于两套高分辨率气候数据集与卫星遥感资料, 揭示了中国近 20 a 来的植被变绿可以减缓近地面气温上升, 而干旱/半干旱地区的植被恢复也能在缓解极端高温事件中产生额外的气候效益, 为未来生态工程的实施提供了新的思路。Reyers 等<sup>[5]</sup>量化了南非小卡鲁地区土地覆被变化对生态系统服务造成的局部影响, 发现植被覆盖减少会导致生态系统服务大幅减少(20%~50%)。归一化植被指数(Normalized differential vegetation index, NDVI)可以用来表征地表植被覆盖度和植被生长状态, 对某一区域而言, NDVI 值越高, 表明该区的植被覆盖率越高<sup>[6]</sup>。

研究<sup>[7]</sup>表明, 地表植被覆盖的变化受到诸多气候因子的综合影响, 其中以气温和降水为主。同时, 人为因素对植被生长的作用也日益引起人们的重视, 植被受到的人为影响常常是两方面的。一方面, 城市化进程加快, 建设用地加剧扩张、森林乱砍滥伐等是植被退化的主要原因; 另一方面, 政府出台退耕还林、森林资源保护等政策, 使得植被覆盖得到积极改善<sup>[8]</sup>。目前, 国内外学者利用 NDVI 数据对不同地区的植被覆盖进行了多时空尺度的分析, 并分析了各地区 NDVI 的变化规律、演化趋势及其对主要因素的响应。Wei Yuanyuan 等<sup>[9]</sup>基于 MODIS NDVI 数据、温度和降水数据, 研究了中国及其 7 个亚区域 NDVI 的变化和对温度、降水的响应, 发现降水的影响程度大于温度的影响程度。Lin X. 等<sup>[10]</sup>基于 GIMMS-MODIS 数据, 分析了 1982—2018 年中国北方地区归一化差异植被指数的时空演变特征, 揭示了 NDVI 与气温、降水以及人造林存在内在联系。Bao Gang 等<sup>[11]</sup>运用 NDVI 在生物群落尺度上深入研究了蒙古的植被动态及其对区域气候变化的响应, 结果表明, 在整个生长季, 归一化差异植被指数与温度呈正相关, 与降水呈负相关; 而在草原生态系统中, 归一化差

异植被指数与温度、降水的相关性呈相反趋势, 此外, 气候变量对植被生长的时滞效应在不同的生物群落中是不同的, 大多为 1~4 个月的滞后效应, 而且不同气候变量和不同月份的滞后效应也各不相同。Yan Xin 等<sup>[12]</sup>运用 NDVI 数据探讨了 1981—2015 年中国湿地植被 NDVI 对气候变化的响应, 研究发现, 在限水区, 湿地植被 NDVI 与降水呈正相关; 而在限温区, 湿地植被 NDVI 与温度呈正相关。Verbyla 等<sup>[13]</sup>以 MODIS NDVI 数据作为最大生长季光合作用活动的替代指标, 研究了美国阿拉斯加和加拿大育空地区的高纬度山脉 NDVI 2002—2017 年的年际模式, 与海拔、7 月气温和 7 月降水量等级的关系。

横断山区位于青藏高原东南部, 是连接云贵高原与青藏高原的重要桥梁。其境内山川南北纵贯, 岭谷高差悬殊, 形成了多变的气候。这种气候多样性为生物提供了丰富多样的栖息地, 使其成为中国最重要的生物多样性热点之一。同时, 横断山区还是多个山脉的交会点和河流的发源地, 不仅维护了区域生态平衡和气候稳定, 还滋养了下游地区并为中国能源开发和交通建设起到支撑作用。已有学者对横断山区的干旱变化<sup>[14]</sup>、生态治理<sup>[15]</sup>、地质灾害等<sup>[16]</sup>方面做了深入研究, 但是以往的研究对于横断山区长时间序列的植被覆盖特征和趋势动态以及影响因子等方面的探讨还相对薄弱, 仅有少量研究利用 NDVI 来研究该区域植被的时空特征和影响因素<sup>[17-18]</sup>。然而, 这些研究侧重于探讨自然因子如气候、地形等对植被的影响, 并未考虑人为因素。因此, 本研究以横断山区为研究对象, 基于 MODIS NDVI 数据, 研究横断山区 2002—2022 年地表植被覆盖的时空变化特征, 并分析气候变化、人类活动对植被的影响, 以期为横断山区生态环境保护和管理提供理论基础。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

横断山区<sup>[19]</sup>(24.5°—34.5°N, 93.5°—104.5°E)是

西藏东南缘、四川西缘和云南北缘的一系列南北走向山脉的总称,面积 421 246 km<sup>2</sup>,是青藏高原的一部分。该地区海拔在 318~6 623 m 之间,地势呈现出西北高,东南低的特点,跨越中国第一和第二级两大阶梯。横断山区在高空西风环流、印度洋和太平洋季风环流的共同作用下,夏季湿润,冬季干旱,具有明显的干湿交替特征。全年中 5—10 月为雨季,该段时间的降水量占全年降水量的 80% 以上,并且多集中在 6—8 月;从 10 月至次年 5 月为旱季,降雨少,日照时间长,蒸发量大。研究区气温变化明显,年平均气温在 -5~12 °C 之间,最高温出现在 6—8 月,最低气温出现在 12 月和 1 月。研究区的土地利用类型多样,北部主要以草地为主,而南部和东部以林地为主,其中低海拔地区主要为常绿阔叶林,高海拔地区则主要为常绿针叶林。

## 1.2 数据源与数据处理

本研究采用的数据集包括 NDVI 数据、气温数据、降水数据和土地利用数据。2002—2022 年的 NDVI 数据来源于 MODIS 传感器 250 m 分辨率的 MOD13Q1 产品,时间分辨率为 16 d。该产品是通过 16 d 内每天的地表反射率计算得来的,可以有效地降低云层、大气及传感器自身的观测角以及太阳高度角等因素的影响<sup>[20]</sup>。本研究共下载覆盖研究区的 483 期影像,平均每年 23 期影像。

通过 MODIS 重投影工具(MRT),对 MOD13Q1 产品进行 NDVI 波段的提取、镶嵌、投影、数据格式转换等操作,在 ArcGIS 10.4 软件中对其进行裁剪,得到研究区的 NDVI 数据。NDVI 的值范围为 -1~1,另外还包含一个异常值。数值愈趋近 1,则代表植被覆盖愈多,愈趋近 0,代表植被覆盖愈少,负值表示无植被,如土壤、岩石、水体等。因此本研究去除负值和异常值,提取出 NDVI 值大于 0 的像素。采用最大值合成法(maximum value composite, MVC),根据 MOD13Q1 产品每期时间,除原始日期为 10 月 16 日即当年的第 19 期影像外,其余均按当月 2 期影像取最大值代表该月的 NDVI 值,得到 2002—2022 年的月度 NDVI 数据,对 21 a 内的各个相同月份的 NDVI 进行均值计算,得到月平均 NDVI 值,从而反映出该月的总体植被覆盖情况;对各年 12 个月的 NDVI 取均值,得到年度 NDVI 值。

气象数据为 2002—2022 年研究区 1 km 分辨率的逐月平均气温数据集和逐月降水量数据集,来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/home>)<sup>[21-24]</sup>。用研究区边界将气温数据和降水数据裁剪,并且重采样至 250 m × 250 m,以便分析

NDVI 和降水、温度之间的关系。

土地利用数据为 MODIS 传感器 MCD12Q1 地表覆盖类型产品,分辨率为 500 m。选取 2002 年和最新一期(2021 年)覆盖整个横断山区的影像,采用其中应用最广泛的国际地圈生物圈计划全球植被分类计划(IGBP)。该数据集包含 17 种土地利用类型,其中有 11 种自然植被类型、3 种土地利用和土壤镶嵌类型和 3 种无植被生长类型。本研究将土地利用数据重采样至 250 m × 250 m,并且将 17 种土地利用类型概括为 6 种类型:“林地”,“草地”,“农用地”,“城市及建筑用地”,“水域”,“其他”。

## 1.3 研究方法

研究流程如图 1 所示。

### 1.3.1 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

本研究采用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验相结合来对研究区 NDVI 定量描述,首先使用 Theil-Sen 趋势法来分析研究区 NDVI 的年内变化情况。Theil-Sen 趋势法,也称为 Sen 斜率估计,它可以有效地消除离群点和异常值对趋势的影响,是一种非常有效的非参数统计推断方法,在长期的趋势研究中有着重要的应用价值。其原理是从数据样本中选取所有的点对,计算各点对的斜率,取所有斜率的中位数(排除异常值干扰)作为数据集的斜率估计。计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (2002 \leq i < j \leq 2022) \quad (1)$$

式中: $\beta$  表示数据集的斜率;Median 表示取中值; $x_j$  和  $x_i$  是序列数据; $\beta > 0$  表示 NDVI 增加, $\beta < 0$  表示 NDVI 减少。

之后,再用 Mann-Kendall 检验来分析变化趋势的显著性。Mann-Kendall 检验是一类极具代表性的非参数检验法,与其他检验方法相比,M-K 检验不需要样本服从正态分布,且不受离群点的影响。现在 M-K 检验在水文、植被、气候等方面都有了大量成功的应用,用于判断气温、降水、植被、径流等变化趋势的显著性。公式为:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S$  为检验统计量; $x_j$  和  $x_k$  为序列数据; $n$  为样本数。方差为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

当  $n \geq 8$  时, $S$  呈现近似正态分布,其方差由以下

公式计算：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S>0) \\ 0 & (S=0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S<0) \end{cases} \quad (5)$$

Z 为标准化后的检验统计量,在给定的置信水平  $\alpha$  上,若  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,则序列数据上升或下降趋势显著。对于统计量 Z,Z 值大于 0 时表示上升,小于 0 时表示下降。在本研究中, $|Z|$  大于或等于 1.65, 1.96,2.58 时,分别表示通过了 90%,95%,99% 的显著性检验。

1.3.2 偏相关分析 本研究通过逐像元偏相关分析,探索 NDVI 与温度和降水之间的相关性。计算公式为：

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih} \cdot r_{jh}}{\sqrt{(1-r_{ih}^2)(1-r_{jh}^2)}} \quad (6)$$

式中: $r_{ij}$  为变量  $r_i$  与  $r_j$  的简单相关系数; $r_{ih}$  是变量  $r_i$  与  $r_h$  的简单相关系数; $r_{jh}$  是变量  $r_j$  与  $r_h$  的简单相关系数。 $r_{ij \cdot h}$  为控制变量  $h$  后  $i$  和  $j$  的相关系数,其为正(负),表示 2 个变量之间呈正(负)偏相关关系,且绝对值越大,2 个变量的相关性就越强。本研究中, $i,j$  和  $h$  分别表示温度、降水和 NDVI。

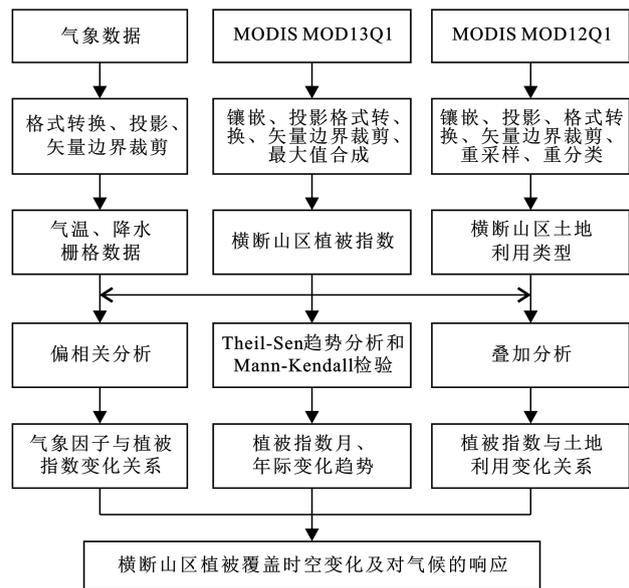


图 1 研究路线流程图

Fig.1 Research route flowchart

## 2 结果与分析

### 2.1 时间变化特征

2.1.1 年平均 NDVI 变化 图 2 所示为横断山区 2002—2022 年年平均 NDVI 变化趋势。通过一元线

性回归方程模拟变化趋势,趋势线的斜率表示年平均增长率。由图 2 可知,横断山地区 2002—2022 年 NDVI 的变化范围为 0.41~0.52,总体上呈波动增长的趋势,年平均增长率为 0.003/a。2005 年中国西南片区遭遇洪涝、滑坡、泥石流等多灾并发,植被受灾严重,该年横断山区 NDVI 显著下降;2008 年南方持续遭受强降雨,并且还伴随暴雨洪涝灾害,给农作物造成重大损失;2012 年西南受冰冻雨雪灾害影响,以及暴雨洪涝威胁,植被生长受限;2014 年西南地区遭遇历史罕见高温干旱,随后又遭遇持续强降雨,极端天气使得整体 NDVI 降低;2018 年南方汛期出现大范围连续强降雨,给农作物带来了巨大损失,导致 NDVI 显著降低。

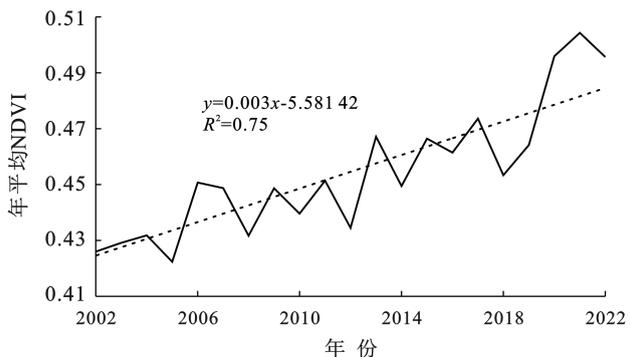


图 2 2002—2022 年横断山区归一化植被指数年际变化趋势  
Fig.2 Inter-annual trend of normalized vegetation index (NDVI) in Hengduan Mountains during 2002—2022

2.1.2 月平均 NDVI 变化 利用 2002—2022 年 21 a 间同月的 NDVI 均值代表该月的 NDVI。从图 3 可以看出,1—3 月 NDVI 值都是处在低位的,在 3 月是最低的,说明在冬季植被盖度很低,植被活力也很低;从 3 月份开始,植被迅速生长,NDVI 逐渐升高,8 月份最大,此时植被的生命力是最强的;9 月后 NDVI 开始下降,一直持续到次年 3 月才有回升的趋势。

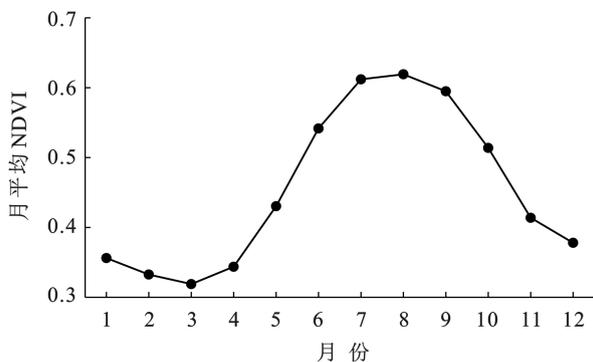


图 3 2002—2022 年横断山区归一化植被指数月变化趋势  
Fig.3 Monthly trend of normalized vegetation index (NVI) in Hengduan Mountains during 2002—2022

### 2.2 空间变化特征

根据各年 NDVI 数据求均值获得 2002—2022 年期间横断山区 NDVI 多年平均值的分布(图 4)。由图 4 可知,从整个研究区来看,NDVI 多年平均值的分布大致是南高北低。横断山区南部和东南部区域,如云南省泸水市、云南省永平县和四川省会东县、四川省盐边县等地区,NDVI 多年平均值基本在 0.47 以上,主要植被类型为林地、农用地;西北部大部分区域 NDVI 多年平均值都在 0.35 以下,其中西藏自治区八宿县、西藏自治区左贡县等地,NDVI 多年平均值大致在 0.2 以下,NDVI 值较低的这些区域主要植被类型为积雪和荒地;北部和中部区域 NDVI 多年平均值大多在 0.35~0.47 之间,其中四川省石渠县和四川省德格县的 NDVI 多年平均值在 0.2~0.34 之间,主要植被类型为草地;东北部区域 NDVI 多年平均值变化范围较大,四川省茂县和四川省雅江县 NDVI 多年平均值在 0.47 以上,四川省阿坝县和四川省金川县 NDVI 多年平均值在 0.35~0.47 之间,四川省泸县和四川省理县局部区域 NDVI 多年平均值在 0.2 以下,主要植被类型为林地和农用地。

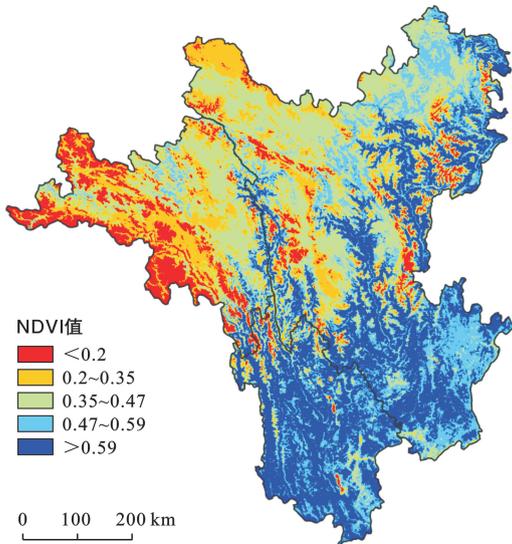


图 4 2002—2022 年横断山区 NDVI 多年平均值空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of multi-year mean NDVI in Hengduan Mountains during 2002—2022

研究基于 ArcGIS 和 Matlab 软件对横断山区 NDVI 进行了 Theil-Sen 趋势分析以及 Mann-Kendall

显著性检验,根据显著性检验结果,研究将 NDVI 变化趋势划分为极显著增加( $\beta > 0, |Z| \geq 2.58$ ),显著增加( $\beta > 0, 1.96 \leq |Z| < 2.58$ ),微显著增加( $\beta > 0, 1.65 \leq |Z| < 1.96$ ),不显著增加( $\beta > 0, |Z| < 1.65$ ),不显著减少( $\beta < 0, |Z| < 1.65$ ),微显著减少( $\beta < 0, 1.65 \leq |Z| < 1.96$ ),显著减少( $\beta < 0, 1.96 \leq |Z| < 2.58$ ),极显著减少( $\beta < 0, |Z| \geq 2.58$ ),无变化( $\beta = 0$ )共 9 大类别。结合图 5 和表 1 可见,2002—2022 年,横断山区有 83.78% 的区域植被呈增加趋势,增加的范围分布十分广泛,主要分布在东南、西南及北部区域,其中 48.04% 的区域增加极其显著,分布在四川省昭觉县、云南省宁蒗彝族自治县和西藏自治区卡若区等地,政府在这些生态脆弱地区实施了诸如退耕还林、生态公益林建设等措施,促进了植被恢复;10.75% 的区域增加显著;有 15.87% 的区域呈减少趋势,主要分布在南部、中部、西北部和东北部区域,其中 9.74% 的区域减少极其显著,分布在四川省西昌市、云南省大理市等地,可能是因为旅游业发展占修建大量服务设施,草地和林地转换为建设用地;1.15% 的区域减少显著。在整个研究区内,植被增加的区域面积远远大于减少的区域面积,植被增加趋势良好,植被覆盖整体表现为增长趋势,印证了横断山区 20 a 来生态环境往好的方向发展。

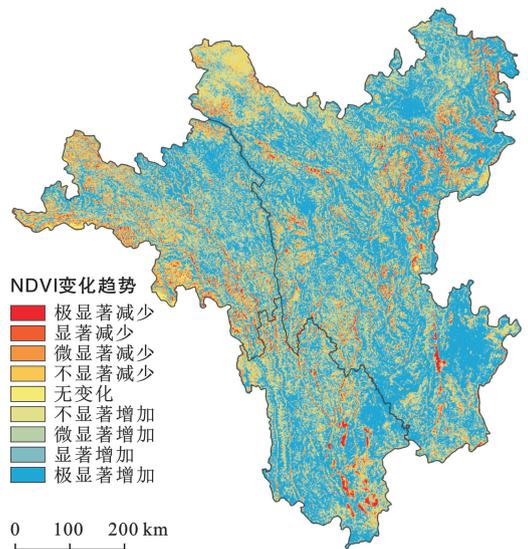


图 5 2002—2022 年横断山区植被覆盖空间变化趋势  
Fig.5 Spatial trend of vegetation cover in Hengduan Mountains during 2002—2022

表 1 2002—2022 年横断山区 NDVI 空间变化统计

Table 1 Statistics of spatial variation in NDVI in Hengduan Mountains during 2002—2022

项目	NDVI 增加区域				NDVI 减少区域			
	极显著	显著	微显著	不显著	极显著	显著	微显著	不显著
比例/%	48.0%	10.75	4.53	20.46	9.74	1.15	2.24	2.75

### 2.3 气候因素对植被覆盖的影响

温度和降水是影响植被覆盖的 2 个极其重要的因素<sup>[26-27]</sup>。横断山区的降水量在 12 月最少,次年 1 月开始逐渐增加,直到 7 月达到最大值,之后呈现递减的趋势;全年月平均温度与降水的变化趋势相似,均是先升高后降低,7 月是全年最高气温,全年温度在 -6~15℃ 波动(图 6)。从图 6 可以看出,NDVI 随气温、降水量的变化呈先上升后下降的趋势,但因存在“时滞效应”<sup>[28]</sup>,NDVI 的最大值出现在最高温度和最高降水之后的 8 月。

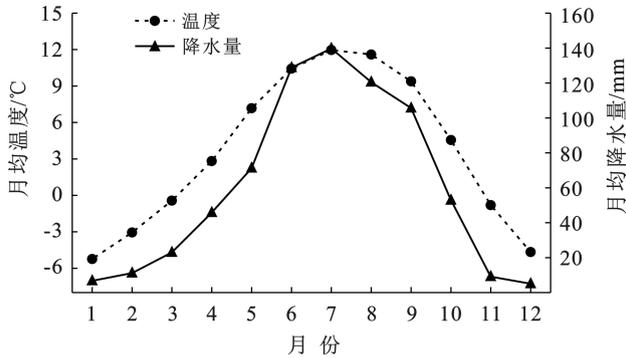


图 6 2002—2022 年横断山区均温度和降水月变化趋势  
Fig.6 Monthly trends in mean annual temperature and precipitation in Hengduan Mountains during 2002—2022

2.3.1 温度对植被覆盖的影响 运用月平均 NDVI 和月平均温度数据,进行非线性曲线拟合(图 7)。从图 7 可以看出,在月尺度上,拟合优度  $R^2$  值接近于 1,说明 NDVI 与气温的相关性较强,且随着气温的升高而上升;进一步地,运用年平均 NDVI 和年平均温度数据进行拟合(图 8)。从图 8 可以看出,在年尺度上,年平均 NDVI 与年平均温度呈正相关关系,但  $R^2$  值较小,说明二者相关性不强。通过对比,可以发现月尺度上的相关性明显大于年尺度上的相关性。

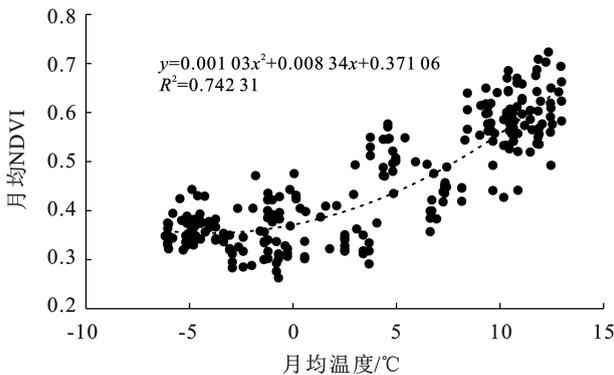


图 7 横断山区月均温度与月均 NDVI 的关系  
Fig.7 Relationship between monthly mean temperature and monthly mean NDVI in Hengduan Mountains

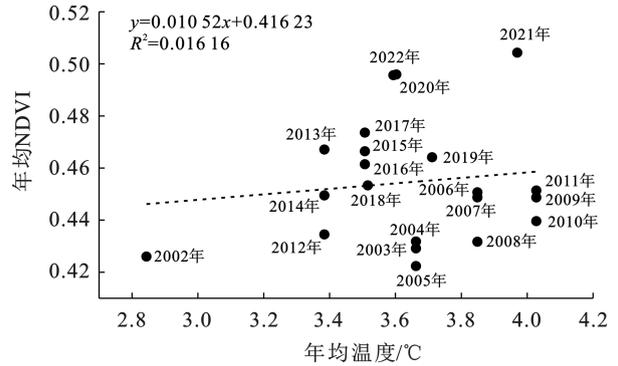


图 8 横断山区年均温度与年均 NDVI 的关系  
Fig.8 Relationship between annual mean temperature and annual mean NDVI in Hengduan Mountains

运用年平均 NDVI 和年平均温度数据进行偏相关分析,计算偏相关系数。偏相关系数为正时,年平均 NDVI 和年平均温度呈正相关关系;反之,呈负相关关系(图 9)。从图 9 可以看出,并非整个研究区的 NDVI 都与温度呈正相关关系,呈正相关的区域仅占研究区的 56.57%,主要分布在北部的四川省石渠县和东北部的四川省红原县等地;43.43% 的区域 NDVI 与温度呈负相关关系,主要分布在西部的西藏自治区左贡县和南部的云南省云龙县等地。综上,随着温度升高,NDVI 可能会上升,也可能会下降。这种不同的关系表明温度并不是影响 NDVI 的唯一因素,在不同的区域、气候和生态条件下,其他因素可能会占主导地位,影响植被的生长和分布。

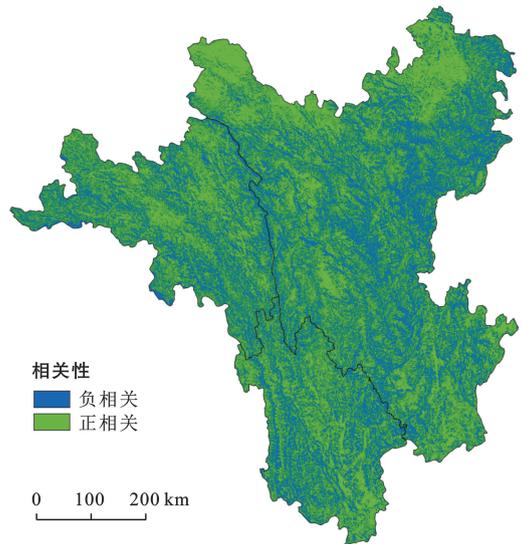


图 9 2002—2022 年横断山区植被覆盖与年均温度相关性置信水平分析  
Fig.9 Confidence level analysis of correlation between vegetation cover and mean annual temperature in Hengduan Mountains during 2002—2022

2.3.2 降水对植被覆盖的影响 与温度相似,将月平均 NDVI 和月平均降水数据,年平均 NDVI 和年平均

降水数据进行拟合。从图 10 可以看出,NDVI 与降水量在月尺度上的拟合优度  $R^2$  值接近于 1,说明两者存在较强的相关性,且月尺度上植被对降水具有饱和效应,约为 220 mm。当降水量低于 220 mm 时,NDVI 与降水呈正相关关系;当降水量高于 220 mm 时,NDVI 与降水呈负相关关系。根据图 11 可知,在年尺度上 NDVI 随降水量的增加逐渐下降,拟合优度  $R^2$  值较小,说明两者存在微弱负相关关系。对比图 8 与图 11 可知,在年尺度上,温度与 NDVI 的相关性要大于降水与 NDVI 的相关性,也就是说,在这一地区,温度对植被的生长和覆盖的影响大于降水。

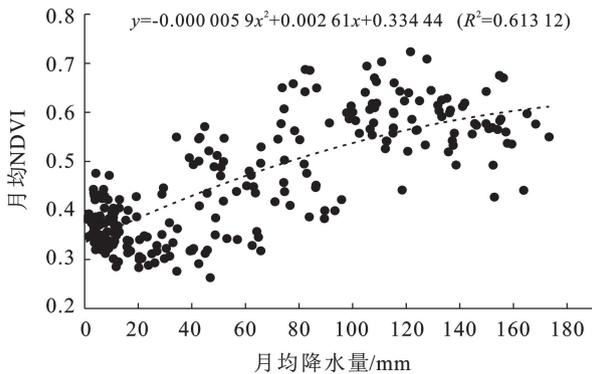


图 10 横断山区月均降水与月均 NDVI 关系

Fig.10 Relationship between monthly mean precipitation and monthly mean NDVI in Hengduan Mountains

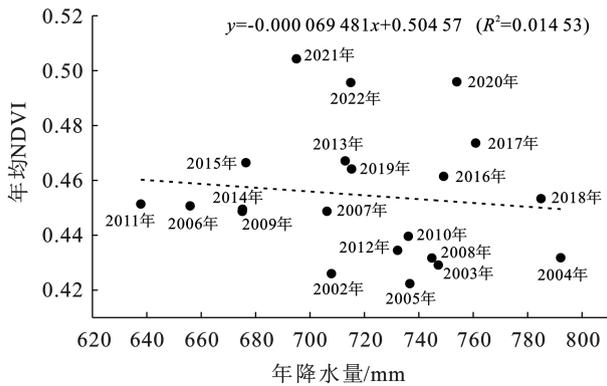


图 11 横断山区年降水与年均 NDVI 关系

Fig.11 Relationship between annual precipitation and annual mean NDVI in Hengduan Mountains

运用年平均 NDVI 和年平均降水量数据进行偏相关分析,得到图 12。从图 12 可以看出,NDVI 与降水量之间的相关关系在空间上存在着显著的差异。在研究区的中、西部地区,如四川省理塘县、云南省维西傈僳族自治县等地,NDVI 与降水量存在负相关关系,而在东北、东南部区域的四川省若尔盖县和金阳县,则存在正相关关系。有 66% 的区域植被盖度与降水量呈负相关,这说明降水也仅在一定程度上影响

研究区植被覆盖情况。总体来看,气温、降水量与 NDVI 在月、年两个时间尺度上的相关关系存在差异,这种差异与研究区地理位置的特殊性有关。横断山区受到高空西风环流、印度洋和太平洋季风环流的影响,有显著的干湿季节特征,同时有明显的温度梯度,且植被对雨水易于饱和,使得 NDVI 与温度之间存在着较强的相关关系。

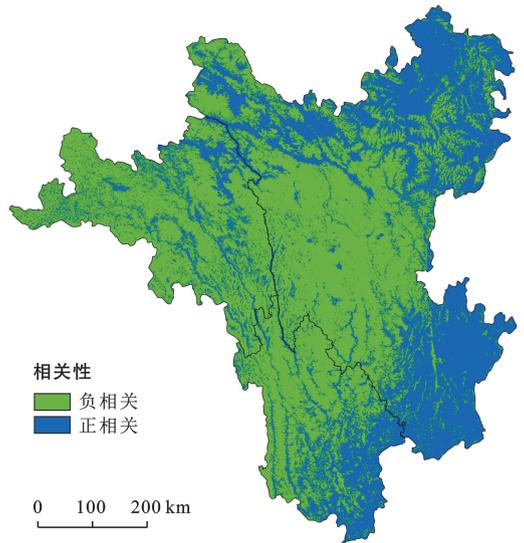


图 12 2002—2022 年横断山区植被覆盖与年降水相关性置信水平分布

Fig.12 Distribution of confidence levels for correlation between vegetation cover and annual precipitation in Hengduan Mountains during 2002—2022

### 2.4 土地利用对植被覆盖的影响

除了气候因子之外,人类活动引起的土地利用变化也会对植被产生显著的影响。横断山区是世界上物种多样性最为丰富的地区,也是中国生态保护的优先区域之一,该地区的植被状况对于维护生态安全和可持续发展具有极其重要的意义。20 世纪 90 年代至今,中国在横断山区开展了一系列重大的生态恢复和建设工程,森林保护法律法规不断完善,以常绿针叶林为代表的植被面积不断增加。本研究着眼于 2002,2021 年土地利用方式及土地覆盖,基于 MCD12Q1 数据集,采用 IGBP 土地覆盖分类方案构建两个时期的土地利用和覆盖变化图以及转移矩阵。由图 13 可知,研究区南部、西南地区的林地扩张幅度较大,此外,土地利用转移较为明显的为研究区中部的林地到草地的变化,及南部的农用地到草地的变化。由表 2 可知,在这一时期,有 27 199.292 km<sup>2</sup> 的草地转换为林地,同时有 7 971.866 km<sup>2</sup> 的林地转换为草地,农用地转换为草地的面积为 5 155.935 km<sup>2</sup>,3 类用地间的转移率分别为 6.91%, 11.25% 和

46.42%，农用地面积减少幅度较大，林地面积增加幅度大，草地面积略有减少；该研究时段内，城市和建筑用地、水域面积均无明显变化。在 2002 和 2021 年 MODIS NDVI 植被最佳长势月数据集即第 15 期和 452 期影像中各自选取林地、草地和农用地区域，计算其 NDVI 平均值，比较不同植被类型 NDVI 的差异。

结果发现，横断山区 2002 年林地、草地和农用地在植被最佳长势情况下 NDVI 分别为 0.653 8, 0.579 和 0.582, 2021 年分别为 0.818, 0.689 和 0.717, 即在同样的环境和气候条件中, 2002 和 2021 年林地的 NDVI 高于草地和农用地。总体来看, 横断山区在研究时段内 NDVI 升高的一个主要原因是大面积的草地林地化。

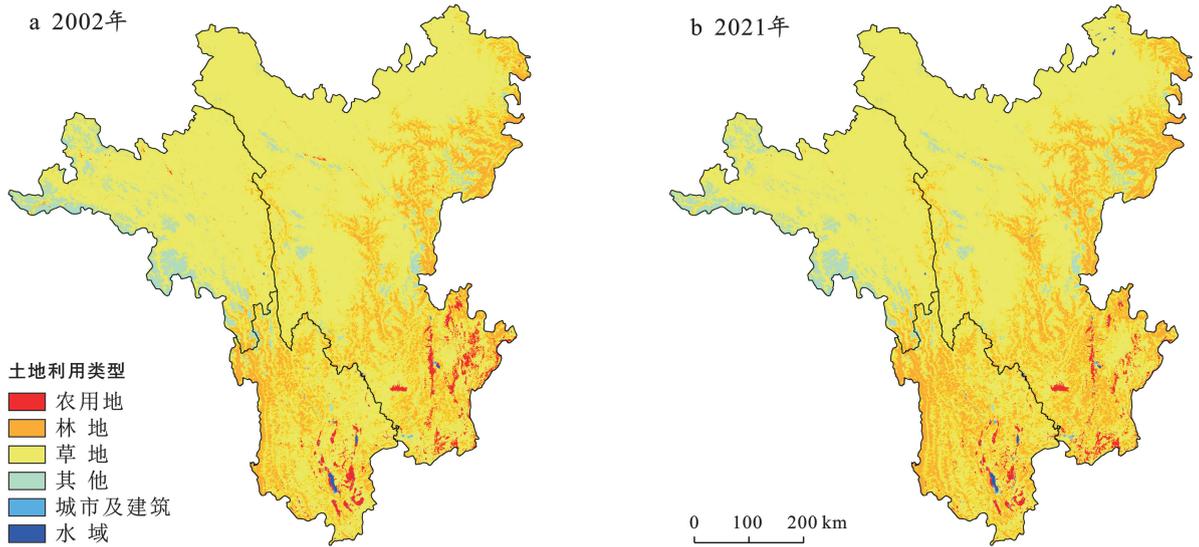


图 13 2002 年和 2021 年横断山区土地利用分布

Fig.13 Land use distribution of Hengduan Mountains in 2002 and 2021

表 2 横断山区 2002—2021 年土地利用类型间面积及转移率矩阵

Table 2 Matrix of area and transfer rates between land use types in Hengduan Mountains during 2002—2021

类型	农用地		林地		草地		其他		城市及建筑		水域		总计/ km <sup>2</sup>
	面积转移/ km <sup>2</sup>	转移率/ %											
农用地	5 801.977	—	96.844	0.87	5 155.935	46.42	7.241	—	33.818	0.30	10.275	0.09	11 106.091
林地	2.793	0	62 847.988	—	7 971.666	11.25	2.470	—	0.006	0	6.179	0.01	70 831.101
草地	2 849.005	0.72	27 199.292	6.91	361 550.328	—	1 919.729	—	29.603	0.01	209.252	0.05	393 757.210
其他	0.001	—	0.948	—	3 493.355	—	14 504.187	—	0.000	—	13.296	—	18 011.786
城市及建筑用地	5.656	0.83	0.242	0.04	11.255	1.65	0.000	—	663.632	—	0.174	0.03	680.958
水域	5.716	1.75	35.064	18.21	370.213	76.44	24.182	—	0.237	0.15	436.061	—	871.473
总计	8 665.148		90 180.377		378 552.752		16 457.809		727.296		675.237		495 258.619

### 3 讨论

(1) 横断山区植被覆盖的时空特征。从年际尺度看, 横断山区植被覆盖呈波动中上升趋势, 这与张顾萍<sup>[29]</sup>对横断山区 2000—2018 年植被变化的研究成果一致, 波动主要是由于洪涝等自然灾害引起的涨落; 在月尺度上, 植被生长具有显著的“时滞效应”。植被覆盖在空间上也呈现出明显的差异, 改善、退化并存, 整体以改善为主, 其中改善的范围非常广泛, 主要分布在东南、西南和北部区域, 退化区域主要分布在中部、南部、西北部 and 东北部, 最突出的区域集中在人口

密集的城镇及其周边, 这可能受到城市扩张的影响<sup>[30]</sup>。研究表明, 虽然 MODIS NDVI 数据的空间分辨率较低, 但因其覆盖范围广、时间跨度大、时间分辨率高, 对植被覆盖的监测仍具有重要意义, 能揭示研究区植被覆盖的变化情况。

(2) 气候对横断山区植被覆盖的影响。横断山区温度在不同时间尺度上都与 NDVI 显著正相关, 而降水仅在月尺度上与 NDVI 呈正相关关系, 在年尺度上呈微弱的负相关关系, 且 NDVI 对降水具有饱和性。无论是月尺度还是年尺度, 温度与 NDVI 的相关性都比降水与 NDVI 的相关性更强。

(3) 土地利用对横断山区植被覆盖的影响。空间上研究区的植被不仅受气候条件的影响,2002—2021年农用地面积急剧减少,而林地面积明显增大,这表明除气候因子之外,人类活动引起的土地利用变化也是其主要的驱动因素,反映了《全国生态保护“十一五”规划》中提出坚持实施天然植被恢复、退耕还林等生态治理工程,以及山水林田湖草生态保护修复工程、修建高黎贡山国家级自然保护区等国家重点生态恢复工程都对横断山区植被改善起到了巨大作用。

(4) 区域生态协同的治理建议。本研究揭示了横断山区 2002—2022 年气候和土地利用对植被覆盖的影响,这对针对性的区域恢复生态植被具有参考价值。在气候变化对植被生长造成威胁的区域,我们需要进行系统的气候监测,努力削弱极端气候对植被的潜在危害。针对因城市化进程中占用林地、导致植被覆盖面积减少的区域,我们应当结合当地特有的生态环境特点,采取有效措施,以最小化城市发展对植被生长的负面影响。总之,要实现区域生态的恢复与发展,就必须密切关注气候因素以及土地利用方式对植被生长的重要影响。

与低时间分辨率的数据集相比,多时相的MODIS NDVI 数据能够更地监测研究时段内植被覆盖的变化。本研究对横断山区 2002—2022 年植被覆盖与气候因子之间的关系进行了探讨,在此基础上,还可增加其他因子,如 DEM 等,或延长研究时段。由于数据的限制,本研究使用的土地覆盖数据集最新一期为 2021 年,未来可采用更新的土地数据集。同时,下一步可继续探讨城市扩张对于植被覆盖的影响。

## 4 结论

(1) 2002—2022 年横断山区植被覆盖整体以增加为主,局部减少。增加的区域面积占 83.78%,分布在东南、西南和北部区域;减少的区域面积占 15.87%,主要分布在南部、中部、西北和东北部。

(2) 温度和降水是影响横断山区植被覆盖的重要因素,但相关关系在不同尺度上存在差异。土地利用类型也是一个很重要的驱动因素,大面积草地林地化促进了植被覆盖的增加。

(3) 以 NDVI 作为植被覆盖指标,采用时间和空间两个维度对横断山区 2002—2022 年植被覆盖进行研究,全面分析横断山区植被覆盖的时空演变,采用偏相关分析等方法,明确植被覆盖的影响因子,为植被保护和生态修复提供新思路,是本研究的核心突破。

## 参考文献 (References)

- [1] Sarkar S, Kafatos M. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(2): 268-280.
- [2] 甘春英,王兮之,李保生,等.连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J].*地理科学*, 2011, 31(8): 1019-1024.  
Gan Chunying, Wang Xizhi, Li Baosheng, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 years in Lianjiang River watershed [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [3] 刘雯霞,赵瑞东,邵鹏,等.近 15 年黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].*干旱区地理*, 2018, 41(1): 99-108.  
Liu Minxia, Zhao Ruidong, Shao Peng, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015 [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(1): 99-108.
- [4] Cao Yipeng, Guo Weidong, Ge Jun, et al. Greening vegetation cools mean and extreme near-surface air temperature in China [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2023, 19(1): 014040.
- [5] Reyers B, O'Farrell P J, Cowling R M, et al. Ecosystem services, land-cover change, and Stakeholders: Finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity Hotspot [J]. *Ecology and Society*, 2009, 14(1): 38.
- [6] 李晶晶,闫庆武,胡苗苗.基于地理加权回归模型的能源“金三角”地区植被时空演变及主导因素分析[J].*生态与农村环境学报*, 2018, 34(8): 700-708.  
Li Jingjing, Yan Qingwu, Hu Miaomiao. Spatial-temporal evolution of vegetation and dominant factors in “energy golden triangle” region based on geographically weighted regression model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(8): 700-708.
- [7] 刘艳,聂磊,杨耘.2001—2015 年天山地区草地 NDVI 时空演变和气候驱动特征分析[J].*生态环境学报*, 2018, 27(5): 802-810.  
Liu Yan, Nie Lei, Yang Yun. Spatio-temporal evolution and climatic driving characteristics of grassland in Tianshan Mountain area in 2001—2015 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 802-810.
- [8] Singh P, Sarkar Chaudhuri A, Verma P, et al. Earth observation data sets in monitoring of urbanization and urban heat island of Delhi, India [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 1762-1779.
- [9] Wei Yuanyuan, Sun Shougang, Liang Dong, et al. Spatial-temporal variations of NDVI and its response to climate in China from 2001 to 2020 [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1463-1484.

- [10] Lin X, Niu J, Berndtsson R, et al. NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in Northern China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4138.
- [11] Bao Gang, Bao Yuhai, Sanjjava A, et al. NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4293-4306.
- [12] Yan Xin, Wang Rui, Niu Zhenguo. Response of China's wetland NDVI to climate changes [J]. *Wetlands*, 2022, 42(6): 55.
- [13] Verbyla D, Kurkowski T A. NDVI-climate relationships in high-latitude mountains of Alaska and Yukon Territory [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2019, 51(1): 397-411.
- [14] 周钱璐, 周非飞, 郑壮鹏, 等. 树轮重建的过去千年横断山区干旱变化及其与强火山喷发的关联[J]. *中国科技论文*, 2023, 18(5): 518-525.  
Zhou Qianlu, Zhou Feifei, Zheng Zhuangpeng, et al. Relationship between strong volcanic eruptions and drought changes in the Transalpine region over the past millennium [J]. *China Sciencepaper*, 2023, 18(5): 518-525.
- [15] 李勋, 张艳. 川西横断山区高寒草甸生态治理与畜牧产业发展现状及建议[J/OL]. *现代农业研究*, 2023, 29(2): 126-129.  
Li Xun, Zhang Yan. Present Situation and suggestions of alpine meadow ecological management and animal husbandry development in Hengduan Mountain area of Western Sichuan [J]. *Modern Agriculture Research*, 2023, 29(2): 126-129.
- [16] 申泽西, 张强, 吴文欢, 等. 青藏高原及横断山区地质灾害易发区空间格局及驱动因子[J]. *地理学报*, 2022, 77(5): 1211-1224.  
Shen Zexi, Zhang Qiang, Wu Wenhuan, et al. Spatial pattern and attribution analysis of the regions with frequent geological disasters in the Tibetan Plateau and Hengduan Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1211-1224.
- [17] 杨靖, 戴君虎, 姚华荣, 等. 1992—2020 年横断山区植被分布与植被活动变化[J]. *地理学报*, 2022, 77(11): 2787-2802.  
Yang Jing, Dai Junhu, Yao Huarong, et al. Vegetation distribution and vegetation activity changes in the Hengduan Mountains from 1992 to 2020 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(11): 2787-2802.
- [18] 白玛曲西, 普布多吉, 卓永, 等. 基于 MODIS 的横断山区植被时空演变特征及地形效应分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(9): 1158-1169.  
Bai Maquxi, Pu Buduoji, Zhuo Yong, et al. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics and terrain effect of vegetation in Hengduan Mountains region based on MODIS [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(9): 1158-1169.
- [19] 张涛, 李宝林, 袁焯城, 等. 横断山区降水时空分布数据集(1998—2012) [J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2019, 3(2): 168-174, 215-221.  
Zhang Tao, Li Baolin, Yuan Yecheng, et al. Spatio-temporal precipitation dataset in Hengduan Mountains (1998—2012) [J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(2): 168-174, 215-221.
- [20] Gu Juan, Li Xin, Huang Chunlin, et al. A simplified data assimilation method for reconstructing time-series MODIS NDVI data [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(4): 501-509.
- [21] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Wen Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [22] Ding Yongxia, Peng Shouzhong. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [23] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Liu Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [24] Peng Shouzhong, Gang Chengcheng, Cao Yang, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [25] 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.
- [26] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 等. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.  
Song Fuqiang, Xing Kaixiong, Liu Yang, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363.
- [27] 田海静, 曹春香, 戴晟懋, 等. 准格尔旗植被覆盖度变化的时间序列遥感监测[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(1): 126-133.  
Tian Haijing, Cao Chunxiang, Dai Shengmao, et al. Analysis of vegetation fractional cover in Jungar Banner based on time-series remote sensing data [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(1): 126-133.

- spatial application of the water poverty index (WPI) in the state of Chihuahua, Mexico [J]. *Water Policy*, 2019, 21(1):147-161.
- [18] 冉启智,廖和平.西南地区水贫困测度和空间格局分析:以重庆市为例[J].*中国农业资源与区划*, 2021, 42(11): 109-120.  
Ran Qizhi, Liao Heping. Measurement and spatial pattern analysis of water poverty in South West China: A case study of Chongqing Municipality [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(11):109-120.
- [19] 孙才志,吴永杰,刘文新.基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J].*水资源保护*, 2017, 33(4):1-8.  
Sun Caizhi, Wu Yongjie, Liu Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(4):1-8.
- [20] 孙才志,王雪妮.基于 WPI-ESDA 模型的中国水贫困评价及空间关联格局分析[J].*资源科学*, 2011, 33(6): 1072-1082.  
Sun Caizhi, Wang Xueni. Research on the assessment and spatial correlation pattern of water poverty in China based on WPI-ESDA model [J]. *Resources Science*, 2011, 33(6):1072-1082.
- [21] 苟凯歌,蒋辉,刘兆阳.2000—2017 年中国农村水资源贫困与经济贫困的耦合协调状态及其影响因素[J].*水土保持通报*, 2021, 41(5):255-263.  
Gou Kaige, Jiang Hui, Liu Zhaoyang. Coupling coordination and influencing factors of rural water resource poverty and economic poverty in China during 2000—2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5):255-263.
- [22] 王淑贺,王利军.黄河流域水贫困与经济高质量发展的耦合协调关系[J].*水土保持通报*, 2022, 42(3):199-207.  
Wang Shuhe, Wang Lijun. Coupling and coordination between water poverty and high-quality economic development in Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):199-207.
- [23] 刘华军,刘传明,孙亚男.中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J].*中国工业经济*, 2015(5): 83-95.  
Liu Huajun, Liu Chuanming, Sun Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China [J]. *China Industrial Economics*, 2015(5):83-95.
- [24] 黄杰.中国能源环境效率的空间关联网络结构及其影响因素[J].*资源科学*, 2018, 40(4):759-772.  
Huang Jie. The spatial network structure of energy-environmental efficiency and its determinants in China [J]. *Resources Science*, 2018, 40(4):759-772.
- [25] 孙才志,马奇飞.中国省际水资源绿色效率空间关联网络研究[J].*地理研究*, 2020, 39(1):53-63.  
Sun Caizhi, Ma Qifei. Spatial correlation network of water resources green efficiency between provinces of China [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1):53-63.
- [26] 刘军.整体网分析:UCINET 软件实用指南[M].3 版.上海:格致出版社,2019.  
Liu Jun. Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET [M]. 3rd. Shanghai: Gezhi Publishing House, 2019.
- [27] 戴向前,周飞,杨彦明,等.关于水利领域发挥市场机制作用的思考[J].*水利发展研究*, 2023, 23(7):3-6.  
Dai Xiangqian, Zhou Fei, Yang Yanming, et al. Thoughts on the role of market mechanism in the field of water conservancy [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(7):3-6.
- [28] 白淑英,王莉,史建桥.长江流域 NDVI 对气候变化响应的时滞效应[J].*中国农业气象*, 2012, 33(4):579-586.  
Bai Shuying, Wang Li, Shi Jianqiao. Time lag effect of NDVI response to climatic change in Yangtze River basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4):579-586.
- [29] 张顾萍.近 20 年横断山区植被覆盖时空变化及驱动力研究[D].成都:成都理工大学,2021.  
Zhang Guping. Spatial-temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hengduan Mountains in past 20 years [D/OL]. Chengdu, Sichua; Chengdu University of Technology, 2021.
- [30] 徐勇,卢云贵,戴强玉,等.气候变化和土地利用变化对长江中下游地区植被 NPP 变化相对贡献分析[J].*中国环境科学*, 2023, 43(9):4988-5000.  
Xu Yong, Lu Yungui, Dai Qiangyu, et al. Assessment of the relative contribution of climate change and land use change on net primary productivity variation in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9):4988-5000.

(上接第 192 页)