

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.009.

卞梨交, 李景吉, 徐彬妮, 等. 气候变化下珠穆朗玛峰自然保护区南北坡植被变化差异[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 164-172.

BIAN Lijiao, LI Jingji, XU Binni, et al. Differentiation of Vegetation Changes in the South and North Slopes of Mount QNNP Under Climate Change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 164-172.

气候变化下珠穆朗玛峰自然保护区 南北坡植被变化差异

卞梨交¹, 李景吉^{1,3}, 徐彬妮², 向莹¹

(1.成都理工大学 生态环境学院, 成都 610059; 2.成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059;

3.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059)

摘要:在全球气候变化背景下,为探究珠穆朗玛峰自然保护区南北坡植被变化差异,采用样方调查数据,MODIS/NDVI数据和气候数据,基于TS趋势分析和偏相关分析研究了珠峰保护区2000—2018年南北坡植被变化及其对气候变化的响应,并预测了其未来植被变化。结果表明:(1)总体上,保护区植被NDVI在2000—2009年呈下降趋势,2009—2018年呈上升趋势,且年内NDVI与温度相关性强于降水。(2)南坡地区NDVI值大于0.6且变化稳定,主要分布着喜马拉雅冷杉(*Abies spectabilis*)等高大乔木;北坡地区NDVI值小于0.4且易波动,主要分布着苔草(*Artemisia younghusbandii*)等灌草丛。(3)南坡地区NDVI在整个2000—2018年均呈轻微上升趋势;北坡地区NDVI在2000—2009年下降,在2009—2018年上升,且Hurst指数预测未来NDVI变化不稳定,大部分区域可能会出现下降趋势。(4)南坡地区NDVI与气候因子相关性弱,北坡地区NDVI与温度呈负相关,与降水呈正相关;北坡定日和定结县居民地附近区域植被对人类活动较为敏感。研究为当地可持续发展和保护区生态环境建设提供了新的思路。

关键词:NDVI; 气候变化; 偏相关分析; 珠峰保护区; 南北坡

中图分类号:X87

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0164-09

Differentiation of Vegetation Changes in the South and North Slopes of Mount QNNP Under Climate Change

BIAN Lijiao¹, LI Jingji^{1,3}, XU Binni², XIANG Ying¹

(1.College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The distribution of vegetation in the Mount Qomolangma National Nature Preserve region (Hereinafter referred to as QNNP) differs in the southern and northern slope areas. Survey data, MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) data, and climate data were used to study the difference of vegetation changes and their responses to climate change in the south and north slopes of the QNNP region from 2000 to 2018, as well as predict future changes in vegetation. The results are as follows. (1) In general, NDVI decreased from 2000 to 2009 and increased from 2009 to 2018, and the correlation between NDVI and temperature was stronger than that of precipitation during the year. (2) In the southern slope area, tall trees such as *Abies spectabilis* were common; NDVI was greater than 0.6 and showed little spatial variation. In the northern slope area, shrubs and grasses such as *Artemisia younghusbandii* were common; NDVI ranged from 0.1 to 0.4 and showed high spatial variation. In the southern slope area, NDVI slightly increased from 2000 to 2018. (3) By contrast,

收稿日期:2021-12-14

修回日期:2022-04-09

资助项目:国家重点研发项目“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0307)

第一作者:卞梨交(1998—),女,四川乐山人,硕士研究生,环境科学与工程专业,主要从事生态环境监测与评价。E-mail:bianlijiao@163.com

通信作者:李景吉(1983—),男,江苏徐州人,博士,讲师,主要从事生物多样性与生态系统服务研究。E-mail:lijingji2014@cdut.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

NDVI decreased from 2000 to 2009 and increased from 2009 to 2018 in the northern slope area. Hurst exponent calculations predicted future fluctuations in vegetation in the study area, and vegetation status might change from good to poor level in most regions. (4) The correlation between NDVI and climatic factors was weak in the southern slope area, while the NDVI in the northern slope area was negatively correlated with temperature and positively correlated with precipitation. Dingri and Dingjie counties on the north slope are more sensitive to human activities. Generally, the results of this study can provide new insights that can be used to aid local sustainable development and improve the ecological environment in the QNNP.

Keywords: NDVI; climate change; partial correlation analysis; QNNP; southern and northern slopes

气候变化对生态系统的影响和反馈已成为国内外学者关注的重要生态学问题之一^[1-2],全球气候变暖背景下的极端气候事件将更加剧烈和频繁,这将严重威胁植被分布^[3-6]。开展长期观测和模型模拟,阐明植被对气候变化的响应,是当前全球气候变化研究的热点问题之一^[7-10]。

植被是指示陆地生态系统的重要指标^[11-12],植被生长与气候变化密切相关^[13],研究植被变化对全球气候变化响应的时空动态特征,对预测未来生态系统动态至关重要^[14]。归一化植被指数(NDVI)是表征植被覆盖度和植被变化的重要指标之一^[15-16],与植被覆盖度呈正相关,能够直观指示植被覆盖度和植被生长状态^[17],已成熟应用在全区不同地区的植被对气候变化响应关系研究中^[15-16]。Kalisa 等^[15]分析了东非地区 NDVI 在不同的空间格局上的断裂点以及 NDVI 趋势的系统性变化;Xu 等^[14]基于 AVHRR NDVI 数据讨论了 1982—2011 年中国的植被生长动态及其与气候因子的关系;Zhou 等^[13]基于 NDVI 探讨了中国植被的历史动态变化,并基于多元回归模型构建了植被的预测模型。

青藏高原是全球气候变化的“敏感区”和“响应器”^[18-21],是研究陆地生态系统对气候变化的响应的最理想地区之一^[22]。已有研究发现,青藏高原气候变化程度超过北半球大部分地区甚至整个世界的气候变化^[23-24]。近年来,青藏高原已成为国内外学者研究全球气候变化的热点地区,不同学者分别选择雅鲁藏布江流域^[25]、西藏地区^[26]、藏北高寒草原^[27]、珠峰保护区等^[28]青藏高原典型区,开展植被 NDVI 动态变化研究,以尝试揭示全球高原植被变化对气候变化的响应机制,但对受地形条件限制下空间异质性强烈的复杂地理单元植被动态对气候变化的差异性响应机制的解释尚缺乏实际证据。珠穆朗玛峰国家级自然保护区(以下简称“保护区”)位于青藏高原南缘,平均海拔约 4 200 m,南北坡地形、气候和植被差异非常大,南坡以深切峡谷地貌为主,气候类型以亚热带、

温带湿润气候为主,植被分布具有明显的“三向地带性”^[29];北坡多为高原地貌类型,气候类型为干旱、半干旱气候,植被分布以高原灌丛、草甸和草原为主。珠峰保护区是研究复杂地理单元植被动态对气候变化的差异性响应典型区,目前对该区南北坡植被 NDVI 与气候响应差异的研究鲜有报道。鉴于此,本研究基于趋势分析和相关性分析,研究近 20 年来(2000—2018 年)保护区南北坡植被动态变化及其对气候变化的差异性响应特征,对解释复杂地貌单元植被动态对气候变化的差异性响应机制具有重要意义。

1 研究区概况

保护区地处我国西藏与尼泊尔交界处,位于 84°27′—88°E,27°48′—29°19′N,分布海拔 1 448~8 844 m,全区面积约 3.4×10^4 km²,辖定日、吉隆、聂拉木和定结 4 县(图 1)。保护区南、北坡气候、植被差异显著,南坡受印度洋温暖气流影响,降水充沛,形成山地森林生态系统,年均气温 7~10℃,年降水量大于 1 000 mm;北坡受“雨影区”影响,气候干燥,具有大陆性高原气候特点,形成半干旱灌丛、草原生态系统,年均气温 2~5℃,年均降水小于 300 mm。

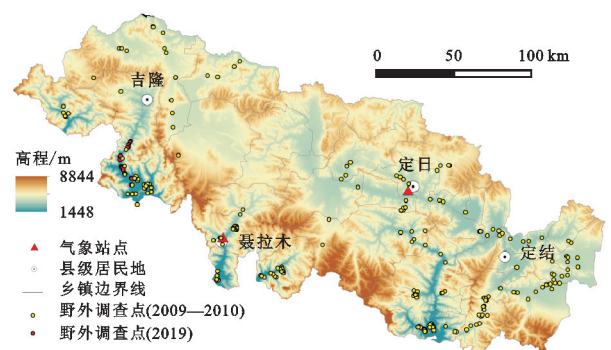


图 1 研究区地理位置

2 数据与方法

2.1 数据源

MODIS 传感器能够在宏观格局上提供植被信息^[30],本文获取的 NDVI 数据为 MODIS 13A3 产

品,该产品是由美国国家航空航天局(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)提供,空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$,时间分辨率为 30 d ,本次下载了 2000 年 2 月—2018 年 12 月的所有影像。

保护区 2000—2018 年气温、降水栅格数据^[31]来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),月平均气温和月累计降水数据是来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html)的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”,并通过计算统计得到。高程数据采用 ASTER GDEM 30 M 分辨率数字高程数据,来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/home>)。讨论人类活动影响中的人工生态系统数据是基于中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),并根据 Google Earth 高分历史影像和野外调查数据调整,并将农田和聚落生态系统合并为人工生态系统以表示人类活动区域。

野外调查数据为 2009 年、2010 年、2019 年对保护区植被调查数据,共计 278 个样方(图 1),用于讨论不同 NDVI 值区间对应分布的主要植被种类。调查方法为:在已设的调查样线基础上,以样方调查为主,同一植被类型做 3 个重复样方,调查记录:群落生境、乔木层建群种、郁闭度等;灌木层建群种、丛数、盖度等;草本层建群种、盖度、高度;样方布设根据群落的特点,乔木林群落设置 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的调查样方;灌木林群落 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的调查样方;草本群落 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的调查样方。

2.2 方法

通过最大值合成法(MVC)处理 NDVI 数据,在 30 d 的 NDVI 的基础上得到年最大 NDVI(NDVI_{max}),用来表征当年植被生长的最佳状况,并将 NDVI<0 的值设置为 nodata 并处理为 0~1^[32]。把 2000—2018 年按等时间间隔分为 2000—2009 年和 2009—2018 年两个时间段进行分析,采用 Theil-Sen(TS)趋势分析估算进行趋势分析,Mann-Kendall 检验法进行检验,对两个时间段温度、降水和 NDVI 栅格数据进行趋势分析,并采用 Hurst 指数法结合 TS 趋势分析来预测未来植被变化趋势。将研究区两个气象站点(聂拉木、定日)分别做 1 km 缓冲区,统计出 2000 年 2 月—2018 年 12 月缓冲区内各月平均 NDVI,将 2000 年 02 月至 2018 年 12 月平均气温、降水量分别与月均 NDVI 做 Person 偏相关分析,结果见表 1,并基于像元对 2000—2018 年 NDVI_{max} 与温度、降水栅格数据进行偏相关分析,

student t 检验法进行检验。

2.2.1 趋势分析 Theil-Sen(TS)中位数趋势分析和 Mann-Kendall(MK)检验可以结合在一起用于分析长期植被序列的变化趋势,该方法不受样本分布方式的影响,也不受少数异常值的干扰,是检验时间序列趋势的有效方法^[33-35]。TS 公式为:

$$\beta_{\text{NDVI}} = \text{median}\left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}\right) \quad 0 < i < j < n \quad (1)$$

当 $\beta_{\text{NDVI}} > 0$ 时,NDVI 呈现上升趋势,否则 NDVI 呈现下降趋势。

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验方法,标准统计量 Z 值用于指示趋势的强度。

对于 NDVI_{*j*} 时间序列,

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

$$\text{其中: var} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1 & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:NDVI_{*i*}、NDVI_{*j*} 分别代表第 i 年和第 j 年的 NDVI 值,而 n 代表时间序列的长度。若 $|Z| > 1.96$,则表明 NDVI 时间序列在 0.05 水平上有显著变化; $|Z| < 1.96$,则表明 NDVI 时间序列不显著变化。因此,本文将植被覆盖趋势可分为 4 种类型:在 0.05 水平上显著增加($\beta_{\text{NDVI}} > 0, |Z| > 1.96$);不显著增加($\beta_{\text{NDVI}} > 0, |Z| < 1.96$);不显著减少($\beta_{\text{NDVI}} < 0, |Z| < 1.96$);在 0.05 水平上减少($\beta_{\text{NDVI}} < 0, |Z| > 1.96$)。

2.2.2 相关性分析 为了探讨 NDVI_{max} 与气候因子的关系,在像元尺度上采用了偏相关系数法^[36]。偏相关系数^[37]是研究多元变量的相关性的一种方法,该变量用来度量在其他变量控制下两个变量直接线性相关性^[38-39]。根据定义,在的影响保持不变的情况下,变量和变量的偏相关系数计算为:

$$r_{xz}^{xy} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中: r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} 分别表示 3 个变量和 z 的 Pearson 相关系数。Pearson 相关系数的计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x)\text{var}(y)}} = \frac{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2\right]\left[\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2\right]}}$$

(7)

式中: N 是总年份数; x_t 是第 t 年的 x 变量的值; y_t 是第 t 年的 y 变量的值; \bar{x} 是所有年份的平均值; \bar{y} 是所有年份的平均值。

本研究的偏相关系数的显著性是通过使用 Student t 检验在 0.05 显著性水平上来检验各像元 NDVI 与气温和降水的偏相关系数,并将相关程度分为以下 4 类:在 0.05 水平上显著正相关、不显著正相关、不显著负相关和在 0.05 水平上负相关。

2.2.3 Hurst 指数趋势预测 本研究采用 Hurst 指数法^[40-41]结合 TS 趋势分析来预测珠峰保护区植被未来变化趋势,并将其分为 5 种变化类型:持续增加、由增到减、持续减少、由减到增、独立变量($H=0.5$)。用 H 表示 Hurst 指数值,当 $0<H<0.5$,表示未来该序列趋势与过去趋势相反,且 H 越接近 0 代表反持续性越强;当 $0.5<H<1$,表示未来该序列趋势与过去的趋势持续相同,且 H 越接近 1 代表持续性越强;当 $H=0.5$,表示时间序列信息是一个相互独立的随机序列,其未来变化趋势不确定^[42]。

3 结果与分析

3.1 NDVI 随时间变化特征

3.1.1 NDVI 年际趋势 6 分析近 20 a 来(2000—2018 年)保护区 NDVI 年际变化趋势发现(图 2),保护区年均 NDVI 呈波动上升趋势,平均增长率为 0.000 8/年($R^2=0.15, p=0.100\ 7$)。2000—2009 年的年平均 NDVI 呈波动下降趋势,平均为-0.001 9/年($R^2=0.15, p<0.001$),2009—2018 年 NDVI 以 0.003 0/年的平均增率呈显著上升趋势($R^2=0.16, p<0.001$)。

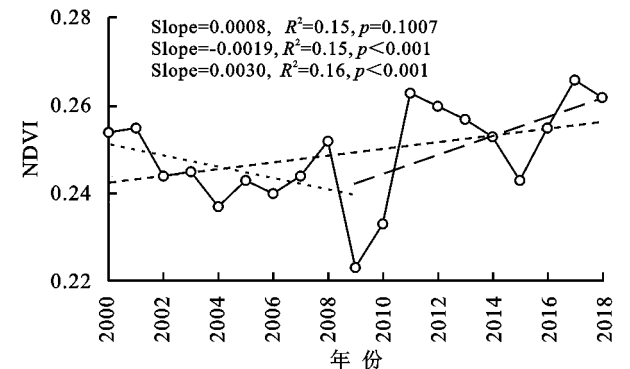


图 2 2000—2018 年年均 NDVI 变化

3.1.2 年内 NDVI 与气候变化的线性相关性 保护区月际 NDVI 与温度的相关性大于与降水的相关性(表 1)。在聂拉木 1 km 缓冲区内,以降水为控制变

量时,NDVI 与气温的偏相关系数为 0.853 ($p<0.01$);以气温为控制变量时,NDVI 与降水未表现出显著相关性。在定日站 1 km 缓冲区内,以降水为控制变量时,NDVI 与气温的偏相关系数为 0.401 ($p<0.01$);以气温为控制变量时,NDVI 与降水的偏相关性系数为 0.134 ($p<0.05$)。

表 1 2000—2018 年月际温度和降水与 NDVI 的偏相关系数

| 气象站(1 km 缓冲区) | 聂拉木 | 定日 |
|---------------------|----------|----------|
| $R_{\text{NDVI-T}}$ | 0.853 ** | 0.401 ** |
| $R_{\text{NDVI-P}}$ | 0.004 | 0.134 * |

注:* 和 ** 分别代表 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 。

3.2 NDVI 空间变化特征

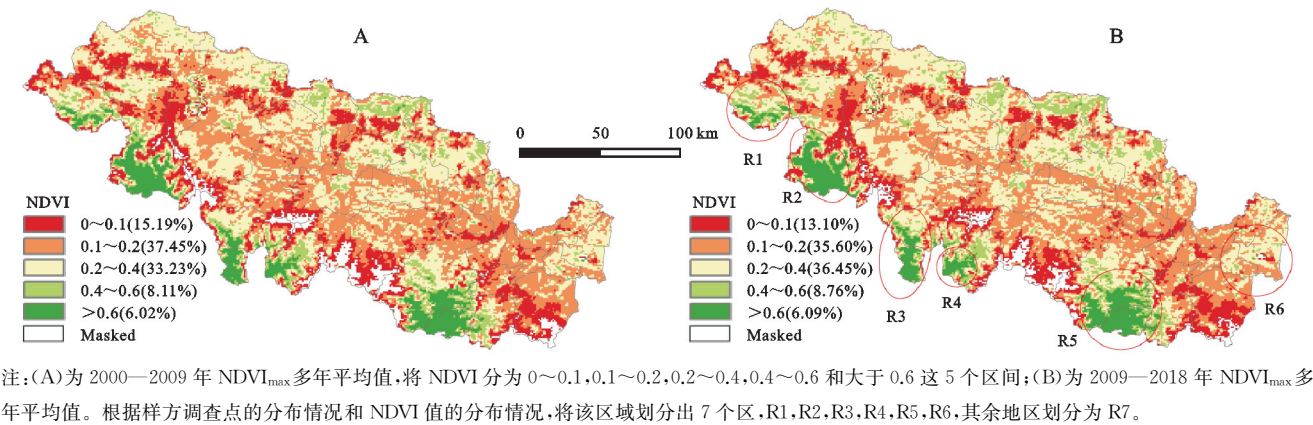
3.2.1 NDVI 分布格局 NDVI 值大于 0.6 的地区主要分布在保护区南坡,主要位于陈塘镇、曲当乡、绒辖乡、樟木镇、聂拉木镇和吉隆镇,少量分布在贡当乡、宗噶镇和日屋镇的南部(图 3B 中 R2, R3, R4, R5 区域),植被类型以乔木为主,优势物种包括:糙皮桦(*Betula utilis*)、乔松(*Pinus griffithii*)、尼泊尔桉木(*Alnus nepalensis*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia* Smith)、喜马拉雅冷杉(*Abies spectabilis*)等。NDVI 值范围为 0.1~0.4 的地区主要分布在保护区北坡(图 3B 中 R1 和 R7 区域),植被类型以灌草丛为主,优势物种包括:杜鹃(*Rhododendron* spp.)、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、蔷薇(*Rosa* spp.)、金露梅(*P. fruticosa*)、苔草(*Carex* sp.)等;NDVI 值范围为 0.4~0.6 的地区主要分布在北坡的加措乡中部的盆吉乡、琐作乡、差那乡和折巴等地的北部海拔较低区域,NDVI 值在 0.1 以下的区域主要分布在海拔高的区域(表 2)。

2000—2009 年保护区内整体植被覆盖率低,大部地区 NDVI 值均在 0.1~0.4,对气候变化比较敏感;其中 NDVI 值 0.1~0.2 的区域面积占比最大(达 37.45%),NDVI 值为 0.2~0.4 的区域面积占比为 33.23%;NDVI 值大于 0.6 的地区面积占比仅为 6.02%,;NDVI 值为 0.4~0.6 的区域面积占比为 8.11%,主要分布在北坡的加措乡中部,盆吉乡、琐作乡、差那乡和折巴乡的北部。2009—2018 年保护区 NDVI 分布情况与 2000—2009 年基本一致,但 NDVI 总体上有所上升。表现为:NDVI 值范围在 0~0.1,0.1~0.2 的区域均有减少,NDVI 值范围在 0.2~0.4,0.4~0.6,0.6~1 的区域均有增加(图 3)。

3.2.2 NDVI 变化趋势及其预测分析 2000—2009 年,保护区 NDVI 总体呈下降趋势,变化速率为 0.001 7/a 速率;其中 70.88% 的区域 NDVI 下降,显著下降区面积占比 5.05%;29.11% 的区域 NDVI 增加,显著增加区面积占比仅有 1.47%;退化区主要分布在北坡地

区,改善区主要分布在南坡地区。2009—2018 年,保护区 NDVI 总体呈上升趋势,变化速率为 0.003 0/a,有 77.92%的区域 NDVI 增加,显著增加区域面积占

比为 7.06%;退化区主要分布在东北部,改善区全域零散分布,其中显著增加区主要零星分布在折巴乡、差那乡及保护区中部(图 4)。



注:(A)为 2000—2009 年 NDVI_{max} 多年平均值,将 NDVI 分为 0~0.1,0.1~0.2,0.2~0.4,0.4~0.6 和大于 0.6 这 5 个区间;(B)为 2009—2018 年 NDVI_{max} 多年平均值。根据样方调查点的分布情况和 NDVI 值的分布情况,将该区域划分出 7 个区,R1,R2,R3,R4,R5,R6,其余地区划分为 R7。

图 3 NDVI 空间分布图

表 2 主要植被类型分布及其对应的 NDVI 值

| 区域 | 植被类型 | 优势物种 | 对应 NDVI |
|----|---------|--|---------|
| R1 | 乔木 | 糙皮桦(<i>Betula utilis</i>)、乔松(<i>Pinus griffithii</i>)、圆柏(<i>Juniperus chinensis</i> Linnaeus)等 | >0.6 |
| | 灌木 | 西藏锦鸡儿(<i>Caragana spinifera</i> Kom.)、杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、栒子(<i>Cotoneaste</i> spp.)、忍冬(<i>Lonicera japonica</i> Thunb.)、蔷薇(<i>Rosa</i> spp.)等 | 0.2~0.6 |
| | 高山草原与草甸 | 白蒿(<i>Artemisia younghusbandii</i>)、点地梅(<i>Androsace</i> sp.)等 | 0.2~0.4 |
| R2 | 乔木 | 尼泊尔桤木(<i>Alnus nepalensis</i>)、高山栎(<i>Quercus semicarpifolia</i> Smith)、乔松(<i>P. griffithii</i>)、喜马拉雅冷杉(<i>Abies spectabilis</i>)、长叶云杉(<i>Picea smithiana</i>)等 | >0.6 |
| | 灌木 | 西藏锦鸡儿(<i>C. spinifera</i>)、杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、岩须(<i>Cassiope selaginoides</i> Hook. f. et Thoms.)、垂枝柏(<i>Sabina recurva</i>)、金露梅(<i>Potentilla fruticosa</i>)、栒子(<i>Cotoneaste</i> spp.)、忍冬(<i>L. japonica</i>)、绣线菊(<i>Spiraea salicifolia</i> L.)、蔷薇(<i>Rosa</i> spp.)等 | |
| | 草本层 | 细叶蒿草(<i>K. capillifolia</i>)、野草莓(<i>Fragaria vesca</i> L.)等 | |
| R3 | 乔木 | 尼泊尔桤木(<i>A. nepalensis</i>)、高山栎(<i>Q. semicarpifolia</i>)、喜马拉雅冷杉(<i>A. spectabilis</i>)等 | >0.6 |
| | 高山灌木 | 杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、扫帚岩须(<i>Cassiope fastigiata</i>)、金露梅(<i>P. fruticosa</i>)等 | 0.4~0.6 |
| R4 | 乔木 | 糙皮桦(<i>B. utilis</i>)、高山栎(<i>Q. semicarpifolia</i>)、喜马拉雅冷杉(<i>A. spectabilis</i>)、圆柏(<i>J. chinensis</i>)、铁杉(<i>Tsuga dumosa</i>)等 | >0.6 |
| | 灌木层 | 箭竹(<i>Fargesia setosa</i>)、杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、金露梅(<i>P. fruticosa</i>)、匍枝栒子(<i>C. adpressus</i>)、忍冬(<i>L. japonica</i>)等 | |
| | 草本层 | 嵩草(<i>Kobresia</i> spp.)、蛇莓(<i>Duchesnea indica</i> (Andr.) Focke)、唐松草(<i>Thalictrum alpinum</i>)等 | |
| R5 | 乔木 | 糙皮桦(<i>B. utilis</i>)、喜马拉雅冷杉(<i>A. spectabilis</i>)、尼泊尔桤木(<i>A. nepalensis</i>)等 | >0.4 |
| | 灌木 | 杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、垂枝柏(<i>S. recurva</i>)、箭竹(<i>F. setosa</i>)、牛奶子(<i>Elaeagnus umbellata</i>)、蔷薇(<i>Rosa</i> spp.)、香柏(<i>S. pingii</i>)、节枝柳(<i>Salix dalungensis</i>)、滇藏方枝柏(<i>S. wallichiana</i>)、扫帚岩须(<i>C. fastigiata</i>)等 | |
| | 草本层 | 老鹳草(<i>Geranium sibiricum</i>)、蛇莓(<i>D. indica</i>)、嵩草(<i>Kobresia</i> spp.)等 | |
| R6 | 灌草丛 | 金露梅(<i>P. fruticosa</i>)、杉叶藻(<i>Hippuris vulgaris</i>)、斑唇马先蒿(<i>Pedicularis longiflora</i> var. <i>tubiformis</i>)、藏北嵩草(<i>Kobresia littledalei</i>)、点地梅(<i>Androsace</i> sp.)、矮苔草(<i>Carex</i> sp.)、海乳草(<i>Glauca maritima</i>)等 | 0.2~0.4 |
| | | | |
| R7 | 小乔木 | 肋果沙棘林(<i>Hippophae neurocarpa</i>) | 0.2~0.6 |
| | 灌草丛 | 高山柏(<i>Sabina squamata</i>)、杜鹃(<i>Rhododendron</i> spp.)、匍枝栒子(<i>C. adpressus</i>)、毛茛(<i>Ranunculus japonicus</i> Thunb.)、景天(<i>Rhodiola</i> sp.)、矮马先蒿(<i>Pedicularis</i> sp.)、西藏锦鸡儿(<i>C. spinifera</i>)、紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i>)、垫状点地梅(<i>Androsace tapete</i>)、藓状雪灵芝群系(<i>Arenaria bryophylla</i>)、嵩草(<i>Kobresia</i> spp.)、苔草(<i>Carex</i> sp.)、金露梅(<i>P. fruticosa</i>)等 | <0.4 |

利用 Hurst 指数和趋势分析预测保护区未来 NDVI 变化趋势发现(图 5),保护区未来 NDVI 变化

不稳定,趋势不一致的像元占总像元的 70.29%,且 58.68%的区域可能会出现 NDVI 下降趋势。

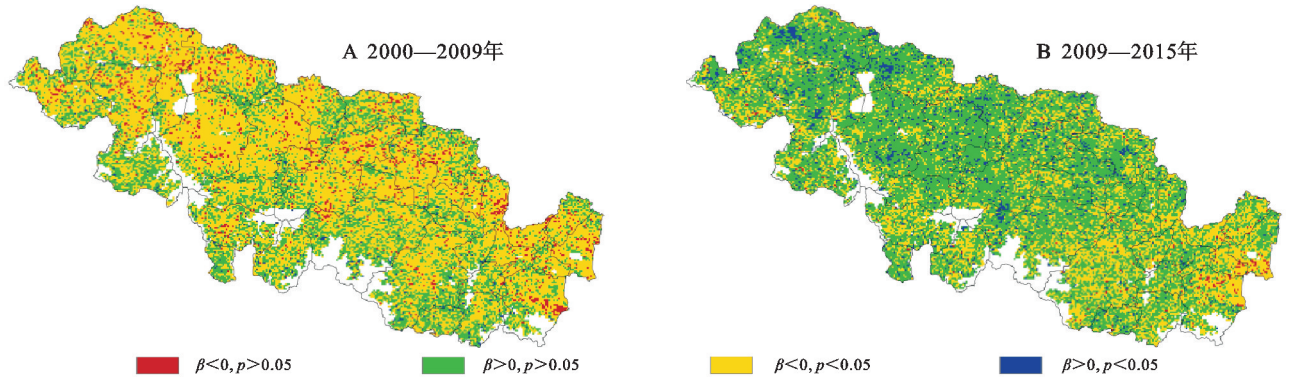


图 4 NDVI 趋势变化空间异质图

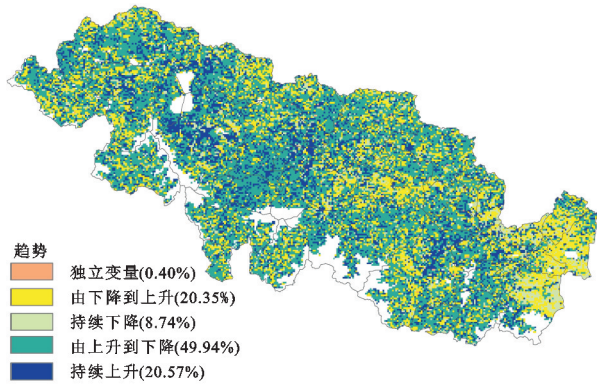


图 5 趋势预测类别空间分布

3.3 NDVI 与气候因子的关系

对气候因子变化的趋势分析发现,保护区气温在 2000—2009 年呈增加趋势,2009—2018 年呈下降趋势。2000—2009 年北坡聂拉木县和定日县降水呈上升趋势,其他地区呈下降趋势;2009—2018 年降水在大部分地区呈上升趋势,而定日县和定结县的南部呈下降趋势(图 6)。

对保护区 NDVI 与气候因子相关性分析发现,NDVI 与降水的相关性大于与温度的相关性(图 7)。保护区周缘区 NDVI 与温度表现出正相关性,聂拉木县中部 NDVI 与温度表现出高的负相关;59.02%的区域 NDVI 与温度呈现出正相关,其中显著正相关区域面积占比仅为 1.79%;40.98%的区域 NDVI 与温度呈现出负相关,显著负相关区域面积占比为 14.57%,主要分布在北坡地区。保护区大部地区 NDVI 与降水呈现出高的正相关性,尤其是在东部的定结县;62.13%的区域 NDVI 与降水呈现出正相关,显著正相关区面积占比为 8.21%;37.87%的区域 NDVI 与温度呈现出负相关,显著负相关区面积占比为 2.94%。

4 讨论

4.1 NDVI 分布特征

研究发现保护区南坡 NDVI 值相对较高,主要

原因有两个方面:(1) 受印度洋暖气流的强烈影响,保护区南坡具有海洋性季风气候特征,区内主要分布山地森林生态系统^[28],多分布半常绿阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林、硬叶常绿阔叶混交林、落叶阔叶桦木林、高寒杜鹃灌丛和高寒常绿针叶灌丛^[43];(2) 受喜马拉雅地质隆升影响,南坡地区地形复杂、海拔落差大、坡度陡,受人类活动的干扰小^[28]。

北坡 NDVI 值相对较低,主要原因有:(1) 受喜马拉雅山脉的屏障作用,北坡形成“雨影区”,降水较少,受全球气候变化影响,北坡呈现干旱化趋势,土地沙化、盐碱化现象明显^[44],植被生长受到限制;(2) 北坡多为高原区,植被类型以高山草甸、草原为主,区内畜牧业相对发达,人类放牧和城镇化建设增加了对植被 NDVI 不利干扰^[28]。

4.2 NDVI 趋势及其预测

保护区南坡 NDVI 在 2000—2018 年总体上呈一定的上升趋势,该区多为保护区核心区,受人类活动影响小,大面积分布森林生态系统对气候变化具有较强的缓冲能力^[43];北坡地区 NDVI 在 2009—2018 年呈现上升趋势,这与 2002 年以来西藏自治区大力开展退耕还林、还草工程有关;在 2009 年之前,受生态工程时间较短影响,退耕还林、还草工程尚未发挥效果^[44],2009 年之后,生态工程的生态效益逐渐体现。Hurst 指数预测结果表明,未来珠峰保护区 NDVI 变化不稳定,NDVI 由增加到减少的面积占比最大,这意味着极端的气候条件可能将持续影响珠峰植被。

4.3 NDVI 对气候因子的响应

4.3.1 年内 NDVI 在时间上对气候因子的响应 本研究发现,2000—2018 年聂拉木站、定日站 1 km 缓冲区的月平均 NDVI 与气温均表现出了显著的相关性,高于月均 NDVI 与降水的相关性,说明区域年内植被生长受气温的影响显著于降水,结果与中国北方相关研究结果表现一致^[45]。

比较聂拉木站、定日站 1 km 缓冲区的月平均 NDVI 与气温相关性发现,聂拉木站大于定日站,这可能与区域降水差异性有关。已有研究表明,土壤水分含量相对高,降水充沛,温度的升高有利于植被生长季的延长和干物质量的积累,从而增强温度变化对植被的影响^[46-47];干旱区、半干旱区生长季升高的温度通常会增加地表水的蒸发,这对植被的生长有所限

制,尤其是灌木和稀疏植被的生长^[48-50]。聂拉木站 1 km 缓冲区月平均 NDVI 与降水并未表现出相关性,这可能与南坡足够充沛的降雨有关,且有关研究显示植被生长对降水的响应具有时滞性^[15-17];定日站 1 km 缓冲区 NDVI 与降水表现出一定相关性,说明干旱区、半干旱区的植被生长主要受生长季的降水量和蒸散发的影响,区域降水增加能够促进植被生长^[48]。

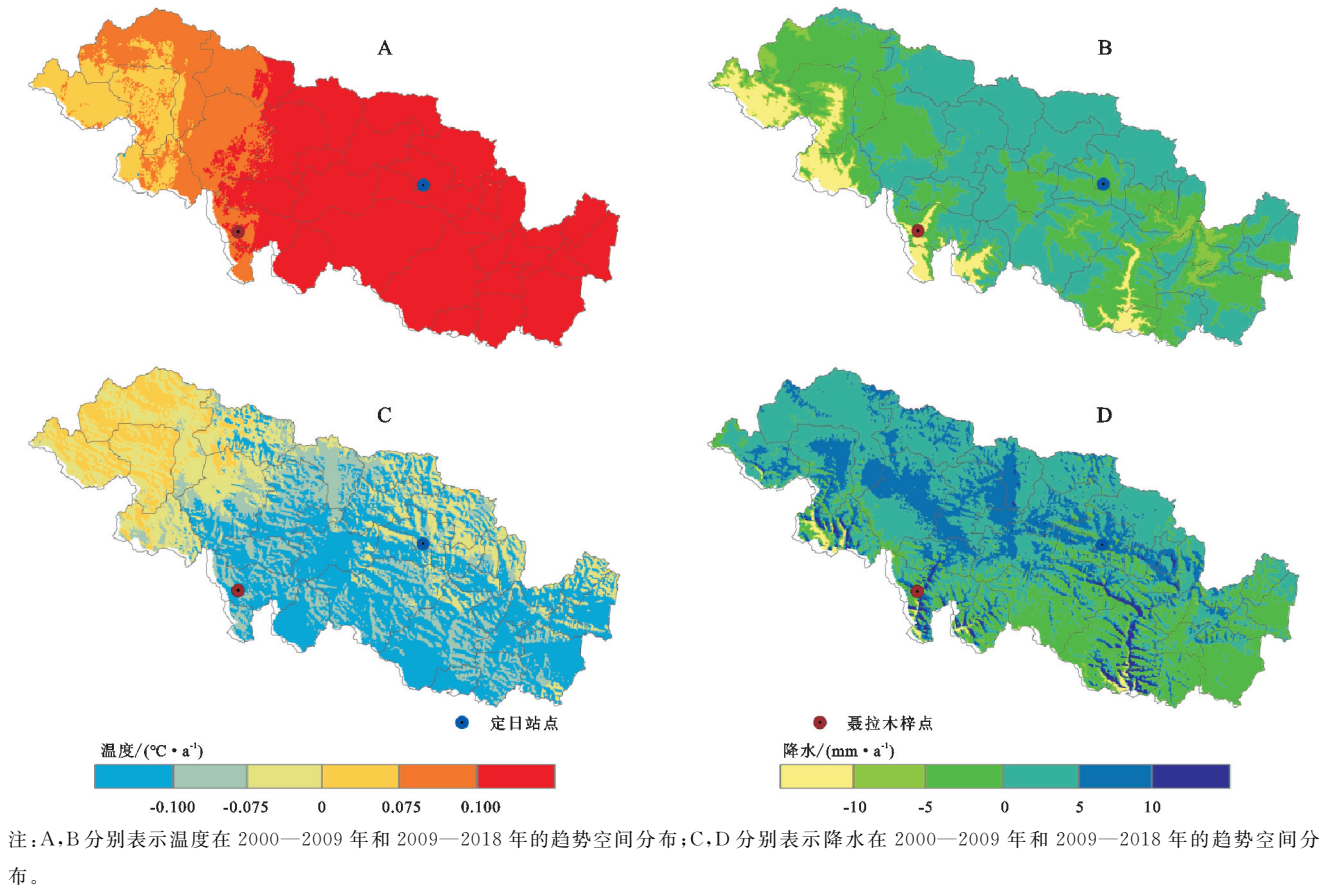
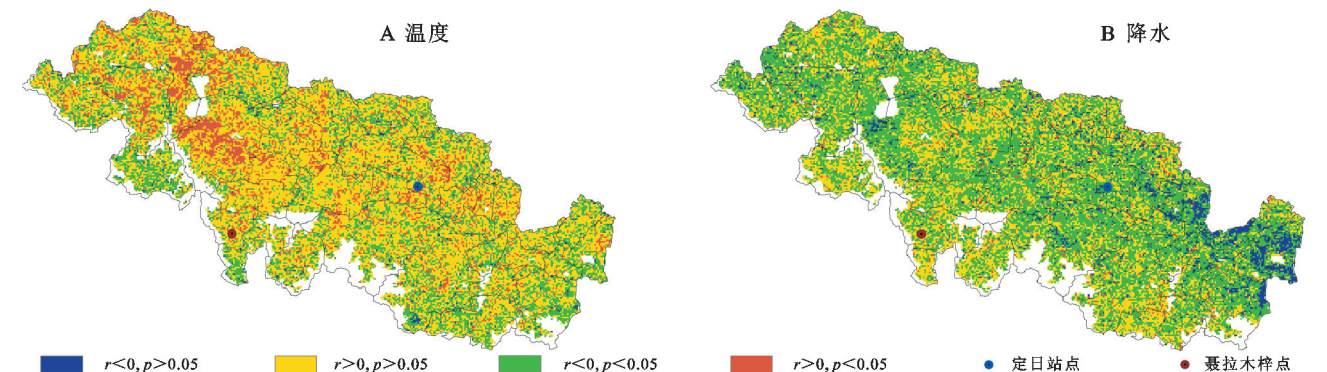


图 6 气候因子的趋势空间分布



4.3.2 年际 NDVI 在空间上对气候因子的响应 保护区南坡在 2000—2009 年温度上升、降水减少,2009—2018 年温度下降、降水增加,在 2000—2018 年温度、降水与 NDVI 呈现出的相关性均不显著,保护区 NDVI 在大部分地区呈现一定程度的增加趋

势,这一现象与自然植被分布和人类扰动较少有关。南坡主要分布山地森林生态系统^[28],植被自然恢复能力和对气候变化缓冲能力较强^[51],分布区域多为核心区,受人类活动的干扰小^[28]。

保护区北坡地区在 2000—2009 年气温上升,多

地降水量减少,NDVI 大部分地区有下降趋势;在 2009—2018 年气温总体下降,降水增加,NDVI 在多地有上升趋势;NDVI 与气温呈现负的相关性,与降水呈现正的相关性。这一现象与北坡植被对气候的敏感性较高有关,北坡气候干燥、降水量较少,温度增加促进降水蒸发,植被对气候变化较为敏感^[44]。

4.4 NDVI 对人类活动的响应

根据趋势分析结果,2000—2009 年保护区 NDVI 大部分地区呈现下降趋势。为明确保护区人类活动对 NDVI 影响程度,筛选该时间段内 NDVI 显著下降但与气温和降水相关性不显著的区域(图 8 筛选区),并叠加 2000 年、2010 年人工生态系统类型数据,发现橘黄色区域多零星分布在县域居民地附近(尤以北坡定日和定结县居民地附近最为明显),且与人工生态系统分布较为一致;此区域植被 NDVI 表现出显著退化趋势,但 NDVI 变化与气候因子的相关性较弱,且人工生态系统面积在此处明显增加,这说明人类活动是导致 2000—2009 年保护区 NDVI 退化的一个重要因素,区域植被 NDVI 对人类活动十分敏感。

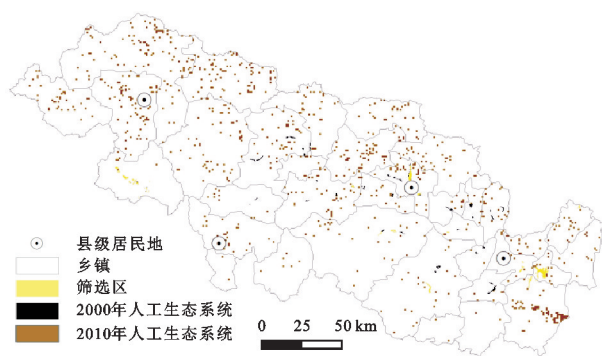


图 8 人类活动敏感区

5 结论

(1) 2000—2009 年,保护区植被 NDVI 总体呈下降趋势,2009—2018 年,呈上升趋势;年内 NDVI 与温度相关性强于降水。

(2) 保护区南北坡植被差异性明显,整体植被覆盖率低。南坡地区 NDVI 值基本大于 0.6 且变化稳定,主要分布着喜马拉雅冷杉(*A. spectabilis*)等高大乔木,对外界干扰具有较强的抵御力;北坡地区 NDVI 值基本保持在 0.1~0.4 且容易波动,主要分布着苔草(*Carex sp.*)等灌草丛,对气候变化比较敏感。

(3) 南坡地区 NDVI 在 2009 年前后两个时段总体上呈现上升趋势;北坡地区 NDVI 在 2000—2009 年呈下降趋势,在 2009—2018 年呈现上升趋势。Hurst 指数预测保护区未来 NDVI 变化不稳定,58.68% 的区域可能会出现下降趋势。

(4) 总体上,保护区年际 NDVI 与降水的相关性大于温度。南坡地区 NDVI 与气候因子的相关性弱,北坡地区 NDVI 与温度呈现负相关,与降水呈现正相关。NDVI 显著下降但与气温和降水相关性不显著的区域在北坡定日和定结县居民地附近分布最为明显,人类活动是导致此区域 NDVI 在 2000—2009 年退化的重要因素。

参考文献:

[1] Shen M, Piao S, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(30):9299-9304.

[2] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,169:156-173.

[3] 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, 1997,386(6626):698-702.

[4] Chen A, He B, Wang H, et al. Notable shifting in the responses of vegetation activity to climate change in China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2015,87:60-66.

[5] Yue S, Yang K, Lu H, et al. Distinct temperature changes between north and south sides of central-eastern Himalayas since 1970s [J]. International Journal of Climatology, 2020,40(9):4300-4308.

[6] Verrall B, Pickering C M. Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions[J]. Science of the Total Environment, 2020,748:141344.

[7] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial[J]. Ecosystems to Interannual Temperature Variability [J]. Science, 1997, 278 (5339):870-873.

[8] Zhou G, Wang Y. Global change and climate-vegetation classification[J]. Chinese Science Bulletin, 2000,45(7): 577-585.

[9] Alo C A, Wang G. Role of dynamic vegetation in regional climate predictions over western Africa [J]. Climate dynamics, 2010,35(5):907-922.

[10] Strengers B J, Müller C, Schaeffer M, et al. Assessing 20 th century climate-vegetation feedbacks of land-use change and natural vegetation dynamics in a fully coupled vegetation-climate model[J]. International Journal of Climatology, 2010,30(13):2055-2065.

[11] Cao M, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change

- [J]. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [12] Zhou Z, Ding Y, Shi H, et al. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: Past, present and future [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106642.
- [13] Zhang X, Wu S, Yan X, et al. A global classification of vegetation based on NDVI, rainfall and temperature [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(5): 2318-2324.
- [14] 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.
- [15] Kalisa W, Igbawua T, HENCHIRI M, et al. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015 [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-20.
- [16] Fang J, Piao S, He J, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999 [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2004, 47(3): 229-240.
- [17] Kong D, Miao C, Wu J, et al. Time lag of vegetation growth on the Loess Plateau in response to climate factors: Estimation, distribution, and influence [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140726.
- [18] Peng J, Liu Z, Liu Y, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 28-39.
- [19] Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo J. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(8): 745-753.
- [20] Yuke Z. Characterizing the spatio-temporal dynamics and variability in climate extremes over the Tibetan plateau during 1960-2012 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 397-414.
- [21] Chen J, Yan F, Lu Q. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000-2019) [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3150.
- [22] Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8.
- [23] Feng S, Tang M, Wang D. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(20): 1745-1749.
- [24] Liu X, Yin Z Y. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 183(3/4): 223-245.
- [25] 王塞, 王思诗, 樊风雷. 基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域(1985—2018)研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6863-6871.
- [26] 李磊磊, 范建容, 张茜戎, 等. 西藏自治区植被与气候变化的关系 [J]. *山地学报*, 2017, 35(1): 9-15. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000190.
- [27] Zhang X, Du X, Hong J, et al. Effects of climate change on the growing season of alpine grassland in Northern Tibet, China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01126.
- [28] 陈颖锋, 彭培好, 珠穆朗玛峰自然保护区地层地貌与植被覆盖变化关系的研究 [J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 91-94.
- [29] 李秦. 珠峰保护区晚中新世以来的古植被与古气候研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [30] Saleem A, Awange J L, Kuhn M, et al. Impacts of extreme climate on Australia's green cover (2003—2018): A MODIS and mascon probe [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142567.
- [31] Peng S, Ding Y, Liu W, 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.
- [32] Yuan J, Bian Z, Yan Q, et al. Spatio-temporal distributions of the land use efficiency coupling coordination degree in mining cities of western China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 5288.
- [33] Wan Z, Gao W. Changes in urban vegetation cover and analysis of the influencing factors: a case study of Harbin, Heilongjiang Province, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(19): 1-12.
- [34] Qiao Y, Chen H, Jiang Y. Quantifying the impacts of lithology on vegetation restoration using a random forest model in a karst trough valley, China [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 156: 105973.
- [35] Liu Z, Wang H, Li N, et al. Spatial and Temporal Characteristics and Driving Forces of Vegetation Changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2198.
- [36] Yan X, Li J, Shao Y, et al. Driving forces of grassland vegetation changes in Chen Barag Banner, Inner Mongolia [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(6): 753-769.
- [37] Linn R L, Werts C E. Assumptions in making causal inferences from part correlations, partial correlations, and partial regression coefficients [J]. *Psychological Bulletin*, 1969, 72(5): 307-310.

- Transformation in Beijing-tianjin-hebei Region in the New Millennium: Population-land-industry Perspective [J]. *Land Use Policy*, 2018, 79:595-608.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 成渝城市群发展规划[EB/OL]. (2016-05-04) [2020-12-07]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/ghs/sjdt/201605/t20160504_1170022.html.
- [25] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [26] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
- [27] 荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381.
- [28] 梁发超, 刘黎明. 景观格局的人类干扰强度定量分析与生态功能区优化初探: 以福建省闽清县为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(6): 1138-1144.
- [29] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [30] 高彬斌, 李琛, 吴映梅, 等. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [31] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [32] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [33] 王俊秀, 牟风云, 田甜, 等. 成渝城市群黑碳气溶胶的时空分异特征及其对土地利用/土地覆被变化(LUCC)的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6): 724-732.
- [34] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的尺度特征[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1432-1437.
- [35] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83.
- [36] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.

(上接第172页)

- [38] Tian M, Zhou J, Jia B, et al. Impact of three gorges reservoir water impoundment on vegetation-climate response relationship[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2860.
- [39] Zhang P, Cai Y, Yang W, et al. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation dynamics indicated by NDVI in a large dam-reservoir-river system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120477.
- [40] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [41] Wang Y Z, Li B, Wang R Q, et al. Application of the Hurst exponent in ecology[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(8): 2129-2131.
- [42] Barunik J, Kristoufek L. On Hurst exponent estimation under heavy-tailed distributions[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(18): 3844-3855.
- [43] 聂勇, 刘林山, 张懿铨, 等. 1982—2009年珠穆朗玛峰自然保护区植被指数变化[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 895-903.
- [44] 马飞, 李景吉, 彭培好, 等. 珠穆朗玛峰自然保护区南北坡植被覆盖变化[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1427-1432.
- [45] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [46] Chu H, 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]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [47] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.
- [48] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [49] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(012): 3567-3578.
- [50] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 967-980.
- [51] 阙媛珂, 王绪本, 高志勇, 等. 2000—2007年珠峰自然保护区植被时空变化与驱动因子[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1261-1271.