

川西高原植被 NDVI 动态变化特征及 对气候因子的响应

谢慧君¹, 张廷斌^{1,2}, 易桂花³, 秦岩宾¹, 李景吉^{2,4}, 别小娟³, 范馨¹

[1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 国家环境保护水土污染
协同控制与联合修复重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学
旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学 生态环境学院, 四川 成都 610059]

摘要: [目的] 分析川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 动态变化特征, 研究植被 NDVI 对气候因子的响应, 为区域水土保持和生态环境保护提供科学依据。[方法] 基于 MOD09A1 数据反演川西高原植被 NDVI, 结合中国气象科学数据共享服务网提供的气温和降水等资料, 利用 Theil-Sen media 趋势分析、Mann-Kendall 统计检验和 Hurst 指数等方法, 分析川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 的时空分布特征、变化趋势及持续性变化特征, 探讨川西高原植被 NDVI 变化对气候因子的响应。[结果] ① 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 均值为 0.486, 呈由西北向东南逐渐升高的趋势, 垂直分布上植被 NDVI 随高程增加呈现先增加后下降趋势; ② 近 17 a 川西高原植被 NDVI 整体以 0.01/10 a 的速率变化, 变化趋势以改善为主, 改善和退化面积分别占比 83.5% 和 16.5%; Hurst 指数研究表明, 川西高原植被 NDVI 总体变化持续性较强, 反持续性较弱; ③ 2001—2017 年川西高原气温呈上升趋势, 降水上升趋势不明显; 整体上植被 NDVI 对气候的响应存在空间差异, 研究区北部主要受气温和降水影响, 西南部主要受降水影响。[结论] 川西高原植被的生长受气候、地形和人类活动等因素影响, 植被 NDVI 呈现明显空间异质性。随着生态文明建设的持续推进, 近 17 a 植被 NDVI 改善面积持续增加, 且未来持续性较强。

关键词: NDVI; 趋势分析; Hurst 指数; 气候变化; 川西高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0286-08

中图分类号: S157.2, X87

文献参数: 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): 286-295. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.039; Xie Huijun, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Dynamic characteristics of NDVI values and its response to climatic factors in Western Sichuan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 286-295.

Dynamic Characteristics of NDVI Values and Its Response to Climatic Factors in Western Sichuan Plateau

Xie Huijun¹, Zhang Tingbin^{1,2}, Yi Guihua³, Qin Yanbin¹, Li Jingji^{2,4}, Bie Xiaojuan³, Fan Xin¹

[1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan

610059, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint

Remediation for Soil & Water Pollution (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059,

China; 3. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan

610059, China; 4. College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China]

Abstract: [Objective] The spatio-temporal characteristics of normalized difference vegetation index (NDVI) values and its response to climatic factors were analyzed from 2001 to 2017 in order to provide a scientific basis for ecological environment protection and regional soil and water conservation in the Western Sichuan Plateau. [Methods] The NDVI of the Western Sichuan Plateau was retrieved from the MOD09A1 data.

收稿日期: 2020-03-26

修回日期: 2020-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“气候变化与人类活动对若尔盖湿地景观格局影响的时空定量辨识”(41801099); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0307)

第一作者: 谢慧君(1995—), 女(汉族), 四川省资阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。Email: 2018020022@stu.cdut.edu.cn。

通讯作者: 张廷斌(1978—), 男(汉族), 山东省沂水县人, 博士, 教授, 主要从事资源与环境遥感研究。Email: zhangtb@cdut.edu.cn。

Combined with air temperature and precipitation data provided by China Meteorological Science Data Sharing Service Network, the spatio-temporal distribution, changing trends and continuous changing characteristics of the NDVI were analyzed by using the methods of Theil-Sen media trend analysis, Mann-Kendall statistical test and Hurst index, and the response of NDVI variations to climate factors was also explored. [Results] ① From 2001 to 2017, the mean value of NDVI in the Western Sichuan Plateau was 0.486, showing a trend of gradual increase from northwest to southeast. In vertical distribution, the NDVI mean value firstly increased and then decreased with the increasing of elevation; ② In nearly 17 years, the NDVI increased at the rate of 0.01/10 a in the Western Sichuan Plateau. The changing trends of NDVI were dominated by improvement, and improved and degraded areas accounted for 83.5% and 16.5%, respectively. According to the study of Hurst index, the overall change of NDVI in the Western Sichuan Plateau had a strong persistence, while its anti-persistence was weak. ③ From 2001 to 2017, the air temperature in the Western Sichuan Plateau showed an upward trend, and no significant trend in precipitation was obvious. On the whole, there were spatial differences in the response of NDVI to climate. The NDVI in the northern region of the study area was mainly affected by air temperature and precipitation, while the NDVI in the southwest region was mainly affected by precipitation. [Conclusion] Vegetation growth in the Western Sichuan Plateau was shown to be controlled by climate, topography and human activities. The NDVI presents obvious spatial heterogeneity. With the continuous progress of ecological civilization construction, the improved areas of NDVI continued to increase in nearly 17 years, and has strong sustainability in the future.

Keywords: NDVI; trend analysis; Hurst index; climate change; Western Sichuan Plateau

随着社会经济发展和全球气候发生显著变化,生态环境问题日益突出,生态系统的稳定在气候变化和人类活动干扰下受到影响^[1-2]。全球气候变化导致高原冰川消退、雪线上升以及湿地空间分布发生改变、草地退化、土地沙化等一系列生态环境问题^[2-5],给草原生态带来严重的破坏。川西高原处于我国地势第一阶梯向第二阶梯过渡地带,是我国西部重要的生态屏障,也是四川省重要的生态保护红线区^[6]。区内自然环境独特,生物多样性丰富,具有水源涵养、水土保持和气候调节等重要生态功能^[6-7]。同时,由于其特殊的地理环境,区域内植被类型多样,生态环境脆弱,对气候变化响应敏感^[7-9]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,影响着全球的物质循环和能量交换,对维持气候系统、碳循环、水资源和生态环境的稳定发挥着重要作用^[10-12]。植被的改善有助于提高水源涵养和水土保持功能^[13]。因此,准确掌握川西高原植被动态变化特征,探索植被对气候变化的响应关系^[14],对指导区域生态环境建设和水土保持具有重要意义。

归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对气候变化极为敏感,是评价植被生长状况的重要指标^[15-18]。利用 NDVI 在不同时间和空间尺度上评估植被变化特征及其对气候变化的响应已成为全球研究热点之一^[19-21]。宋怡等^[22]基于 NDVI 数据对中国寒旱区植被变化特征进行了分析,并研究了其对气候变化的响应,发现总体上植被呈改善趋势,植被变化与降水和温度均呈正相

关关系;韩炳宏等^[23]利用 NDVI 数据对青藏高原地区植被覆盖变化及其驱动因素进行了探讨,认为青藏高原植被整体呈稳定恢复状态,与气温和降水均显著相关,与气温的关系更密切。多年以来川西高原积极推进生态文明建设,开展退耕还林、生物多样性保护、水土流失治理等生态保护工程^[24-25],在这一过程中植被的生长状况怎样?如何掌握植被变化情况?植被变化趋势以及对气候变化的响应具有怎样的特征?这是川西高原进一步加强生态建设和水土流失治理所面临的关键问题。但目前针对川西高原植被动态变化特征及其对气候响应的研究并不多见。本文基于 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)MOD09A1 数据反演川西高原植被 NDVI,综合气象数据,DEM(digital elevation model)和植被类型等资料,开展 2001—2017 年川西高原植被的 NDVI 时空动态变化特征及其对气候因子的响应研究,为指导川西高原生态环境保护和水土保持提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

川西高原位于四川省西部,处于 27°57'—34°11'N 和 97°21'—104°26'E 之间,总面积 2.33×10⁵ km²,分布有 31 个县。区内地形复杂,起伏较大,海拔在 790~6 500 m 之间,地势从西北向东南逐渐降低(图 1a)。区内水资源丰富,雅砻江、大渡河、岷江等水系发育;植被类型多样(图 1b),主要分布有高寒草甸、灌丛、针

叶林、阔叶林等,其中针叶林类型之多为全国之冠^[7,26];川西高原气候类型多样,主要以寒温带气候

类型为主,光照充足,气温较低,干湿季分明,降水较少;受地形影响,气候具有明显的立体变化特征^[27-28]。

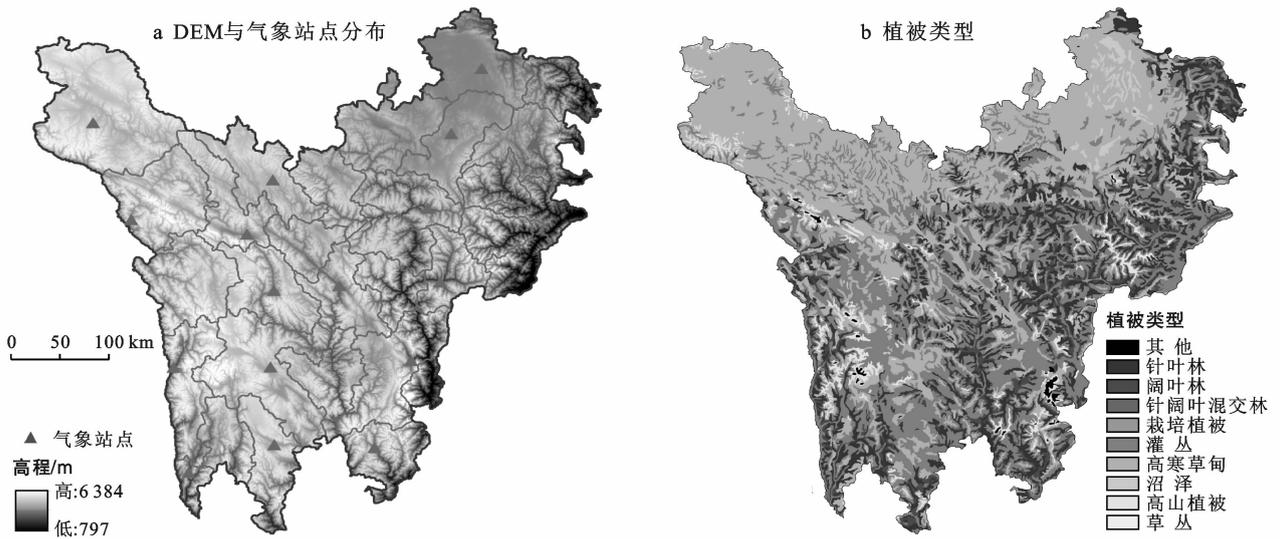


图 1 川西高原 DEM,气象站点分布和植被类型

1.2 数据来源及处理

1.2.1 数据来源 2001—2017 年的地表反射率数据 (MOD09A1) 来自 NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 搭载于 Terra 卫星上的 EOS/MODIS 传感器,包含了 7 个波段,其中 Band1 和 Band2 的空间分辨率为 250 m,其余波段为 500 m,时间分辨率 8 d,该产品经过了辐射校正、大气校正等预处理。气象数据是由中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.gov.cn>) 提供的 2001—2017 年川西高原及周边 37 个气象站点逐日数据。植被类型数据采用中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 发布的 1:100 万全国植被类型数据集。DEM 数据来自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数字高程数据产品,空间分辨率为 90 m。

1.2.2 数据预处理 利用 MRT (MODIS reprojection tools) 工具对 MOD09A1 数据进行格式转换和重投影等预处理,根据质量控制文件剔除数据中的异常值,利用 MOD09A1 的红外 (Band1) 和近红外 (Band2) 波段计算植被 NDVI 值:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段反射率; R 为红波段反射率。对获得的植被 NDVI 值乘以 0.000 1 缩放因子并按川西高原边界范围进行裁剪。由于川西高原海拔 5 000 m 以上的区域大多覆盖着永久冰川^[20],本研究不予讨论,利用 DEM 数据剔除 5 000 m 以上的区

域。相对于已有的 16 d NDVI 数据产品,MOD09A1 数据计算的 NDVI 数据时间分辨率更高,采用 MVC (maximum value composite) 方法计算 2001—2017 年逐月植被 NDVI 值,进而计算逐年年均植被 NDVI 值可以更加有效的削弱云的影响。

利用同质性检验对不可用气象站数据进行剔除^[29-30]。现有研究中常采用克里金法 (Kriging) 和反距离权重法对降水量插值^[31-32],采用薄板样条函数法 (thin plate spline, TPS) 和 Kriging 对气温插值^[7,33]。本文利用气象站数据验证法对空间插值方法进行验证^[34],并考虑到气温和降水在空间分布上存在差异,且气温受海拔影响^[34-35],最终选择 Kriging 方法对降水进行插值,对气温的栅格化选择以 DEM 作为协变量的 TPS 方法进行空间插值^[34]。研究中所使用的植被类型、DEM 和气象数据等均经过投影变化、裁剪、重采样等数据处理,将空间分辨率统一为 500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen media 趋势分析与 Mann-Kendall 统计检验 采用 Theil-Sen media 趋势分析与 Mann-Kendall 统计检验^[36]相结合,逐像元分析 2001—2017 年川西高原植被 NDVI 变化趋势。其中,Theil-Sen media 趋势分析是一种非参数统计趋势分析方法^[37],有助于减少缺失或异常值的干扰^[38],计算公式为:

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (1 < i < j < n) \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 分别为第 i 和 j 年的 NDVI 值; n 为数据集的时间长度; β 用于量化单调趋势,当 $\beta > 0$,表明

植被 NDVI 值随时间呈上升趋势, $\beta < 0$, 表明植被 NDVI 值随时间呈下降趋势。

Mann-Kendall 统计检验是一种非参数检验方法, 该方法所用样本不需服从一定分布^[39-40], 不受少数异常值干扰^[38], 用于评估趋势的重要性^[41]。在进行趋势检验时, 将逐年每个像元的 NDVI 值看作一组时间序列, 参数 Z 作为统计检验量^[40], 具体计算方法为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

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

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & [if(x_j - x_i) > 0] \\ 0 & [if(x_j - x_i) = 0] \\ -1 & [if(x_j - x_i) < 0] \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中:sgn 为函数符号。本文在 $\alpha = 0.01$ 置信水平上判断植被 NDVI 变化趋势的显著性^[37], 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 表示数据变化趋势显著; 当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$, 表示数据变化趋势不显著。

1.3.2 Hurst 指数分析 基于 Hurst 指数方法分析川西高原植被 NDVI 未来趋势变化, 该方法可判断时间序列未来变化的趋势, 用于定量描述长时间序列信息相关性^[39,42]。Hurst 指数预测未来趋势分为 3 种情况: 当 $0.5 < H < 1$, 表明未来变化趋势与过去趋势具有相同的变化状况; 当 $H = 0.5$, 表明未来变化趋势不能确定; 当 $0 < H < 0.5$, 表明未来变化趋势与过去趋势具有相反的持续性^[37,43]。叠加 Theil-Sen media 趋势分析结果, 获得未来退化趋势、持续性改善、未来改善趋势和持续性退化 4 种趋势。相关 Hurst 指数计算公式见相关文献^[42-43]。

1.3.3 偏相关分析 应用偏相关分析研究川西高原植被 NDVI 对气温和降水的响应, 计算公式为^[44]:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中: $R_{xy,z}$ 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数^[52]; R_{xy}, R_{xz}, R_{yz} 为两因子间的相关系数; x 为 NDVI 值; y 为气温值; z 为降水值。

2 结果与分析

2.1 川西高原植被 NDVI 时空分布特征

川西高原近 17 a 植被 NDVI 均值介于 $0 \sim 0.85$ 之间, 平均值为 0.486, 植被具有较好的长势, 空间上

呈现由西北向东南逐渐升高的分布格局(见封 2, 附图 2)。由于川西高原地形差异大, 海拔由西北向东南逐渐降低, 植被呈现明显空间异质性。NDVI 低值区多出现在 4 000 m 以上的高海拔区域, 主要分布在石渠县北部、德格县中部、新龙县与白玉县交界边缘、理塘县与稻城县交界处、康定南部、黑水县与红原县交界处、松潘县东部、九寨沟南部以及小金县、理县和汶川县的交界地带, 植被类型多为高山植被、高寒草甸和灌丛。NDVI 高值区多出现在研究区东部和南部海拔 3 000 m 以下地区, 主要分布在若尔盖西南部、九寨沟东南部、雅江县中部、丹巴县东北部、泸定县东部以及大渡河、雅砻江和岷江流域, 植被类型以针叶林、阔叶林和灌丛为主。结合川西高原地形特征, 将川西高原高程划分为 5 个高程区间($< 1 000$ m, $1 000 \sim 2 000$ m, $2 000 \sim 3 000$ m, $3 000 \sim 4 000$ m, $4 000 \sim 5 000$ m), 分区统计植被 NDVI 均值随高程变化情况(见表 1)。结果表明, 近 17 a 来川西高原植被 NDVI 均值随高程增加呈现先增加后降低的特点(表 1)。3 000 m 高程以下区域面积占比 7.07%, 该区域植被 NDVI 随高程增加呈逐渐增加趋势; 3 000 m 高程以上区域面积占比较大为 92.93%, 该区域植被 NDVI 随高程增加呈降低趋势。植被 NDVI 均值在 2 000~3 000 m 高程区间出现最高值(0.63), 主要植被类型为针叶林和阔叶林; 最低值出现在 4 000~5 000 m 高程区间(0.41), 区内植被类型以高寒草甸和高山植被为主。在 1 000~2 000 m 和 3 000~4 000 m 高程区间, 植被 NDVI 均值分别为 0.61 和 0.58, 该区植被类型分别以灌丛和高寒草甸为主; 在 $< 1 000$ m 高程区间, 由于人类活动干扰较大, 植被 NDVI 相对较低。川西高原近 17 a 植被 NDVI 均值处于波动上升趋势(见图 2), 增长速率为 $0.01/(10 \text{ a})$ ($p = 0.001$), 最小值出现在 2012 年(0.475), 2015 年达到最高(0.508)。其中 2006 年、2009—2011 年、2013—2017 年植被 NDVI 均值高于多年平均值, 在 0.489~0.508 之间波动。

2.2 川西高原植被 NDVI 动态变化特征

2.2.1 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 变化趋势分析 为分析川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 变化趋势特征, 根据 Theil-Sen media 趋势分析方法得到川西高原近 17 a 植被 NDVI 趋势图(见图 3), 基于 Theil-Sen media 趋势分析和 Mann-Kendall 统计检验结果将研究区植被 NDVI 趋势划分为显著退化($\beta < 0, \alpha < 0.01$)、不显著退化($\beta < 0, \alpha > 0.01$)、不显著改善($\beta > 0, \alpha > 0.01$)和显著改善($\beta > 0, \alpha < 0.01$) 4 种类型。

表 1 川西高原植被 NDVI 垂直分布特征

海拔高度/m	<1000	1 000~2000	2 000~3000	3 000~4000	4 000~5000
NDVI 均值	0.55	0.61	0.63	0.58	0.41
面积占比/%	0.02	1.01	6.04	38.1	54.83
主要植被类型	灌丛	灌丛、阔叶林	针叶林、阔叶林	草甸、灌丛	草甸、高山植被

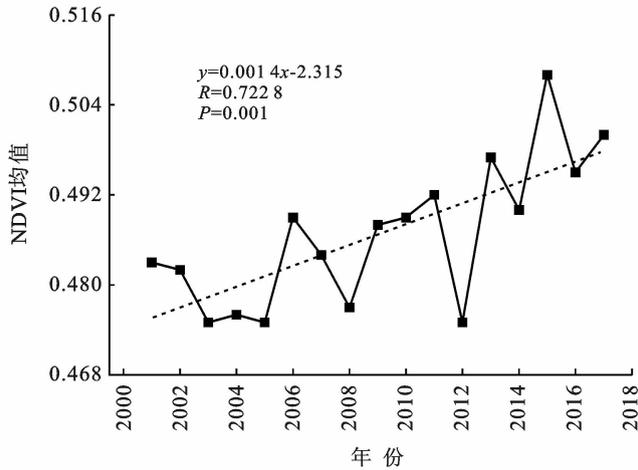


图 2 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 均值年际变化

由图 3,表 2 可知,2001—2017 年川西高原植被 NDVI 整体以改善趋势为主,显著改善面积占比 12.09%,集中分布在若尔盖县和九寨沟县、松潘县中部、茂县和黑水县交界处等研究区东北部边缘地带;不显著改善面积占比达 71.41%,分布在整个川西高原。不显著退化面积占比 15.88%,呈零星分布特征,主要分布在石渠县、汶川县、雅江县和稻城县等区域;显著退化区主要分布于雅江县北部、康定县与雅江县交界处,面积占比 0.61%。其中,2008 年汶川地震导致灾区原生生态环境遭到大面积破坏,植被生态环境退化,雅江县中部、康定县与雅江县交界处、石渠县中部以及汶川县东部植被 NDVI 表现出明显退化趋势。另外,色达县中部和稻城县中部、南部的植被 NDVI 表现出轻微退化趋势。

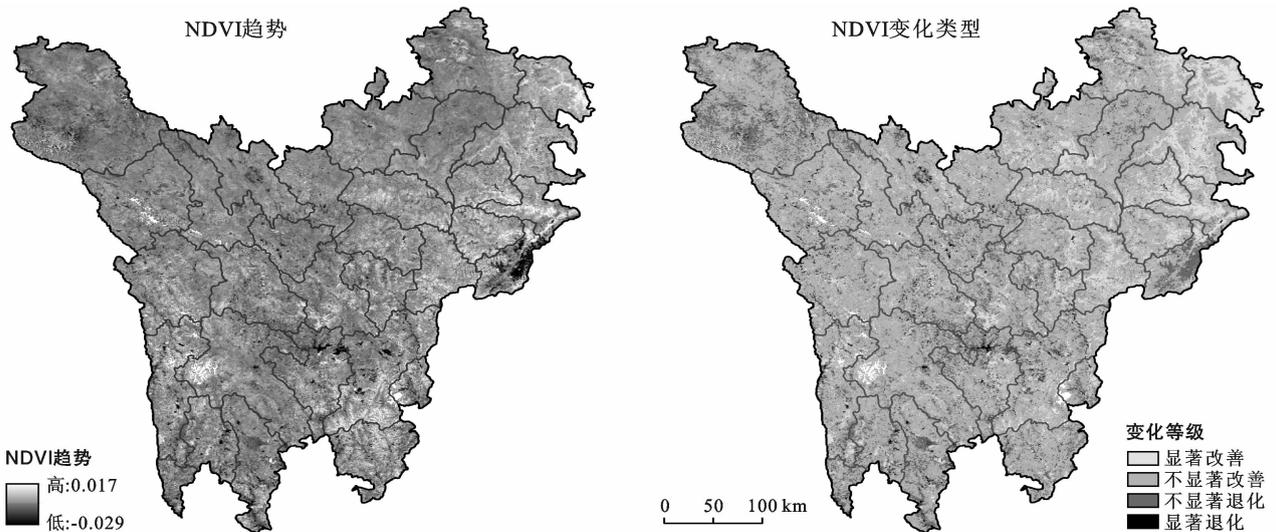


图 3 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 趋势和植被 NDVI 变化趋势类型

2.2.2 川西高原植被 NDVI 未来变化趋势 川西高原近 17 a 的 Hurst 指数空间分布如图 4 所示。川西高原植被 NDVI 的 Hurst 指数介于 0.16~1 之间,平均值为 0.69,研究区植被 NDVI 变化趋势总体具有较强的持续性。通过叠加川西高原植被 NDVI 变化趋势和 Hurst 指数,可将川西高原植被 NDVI 未来变化趋势划分为未来退化趋势、持续性改善趋势、未来改善趋势和持续性退化趋势 4 种类型(图 4)。由图 4

和表 3 可知,川西高原植被持续性变化趋势主要以持续性改善为主,面积占比 78.33%,分布在川西高原全区;约 1.95%的植被 NDVI 区域面积由退化向改善方向变化,主要分布在石渠县西部。约 5.18%的植被 NDVI 由改善向退化方向变化,零星分布在全区;14.54%的植被 NDVI 呈持续性退化趋势,主要分布在汶川县东部、雅江县北部、石渠县中部、色达县中部和稻城县全境,若尔盖县和红原县等地分布较少。

表 2 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 变化趋势统计

β (趋势)	α ($\alpha=0.01$ 置信水平)	变化类型	面积比例/%
$\beta < 0$	$\alpha < 0.01$	显著退化	0.61
$\beta < 0$	$\alpha > 0.01$	不显著退化	15.88
$\beta > 0$	$\alpha > 0.01$	不显著改善	71.41
$\beta > 0$	$\alpha < 0.01$	显著改善	12.09

表 3 川西高原植被 NDVI 持续性变化趋势统计

NDVI 变化趋势	Hurst 指数 (H)	持续性变化趋势	面积比例/%
$\beta > 0$ (改善)	$0 < H < 0.5$	未来退化趋势	5.18
	$0.5 < H < 1$	持续性改善	78.33
$\beta < 0$ (退化)	$0 < H < 0.5$	未来改善趋势	1.95
	$0.5 < H < 1$	持续性退化	14.54

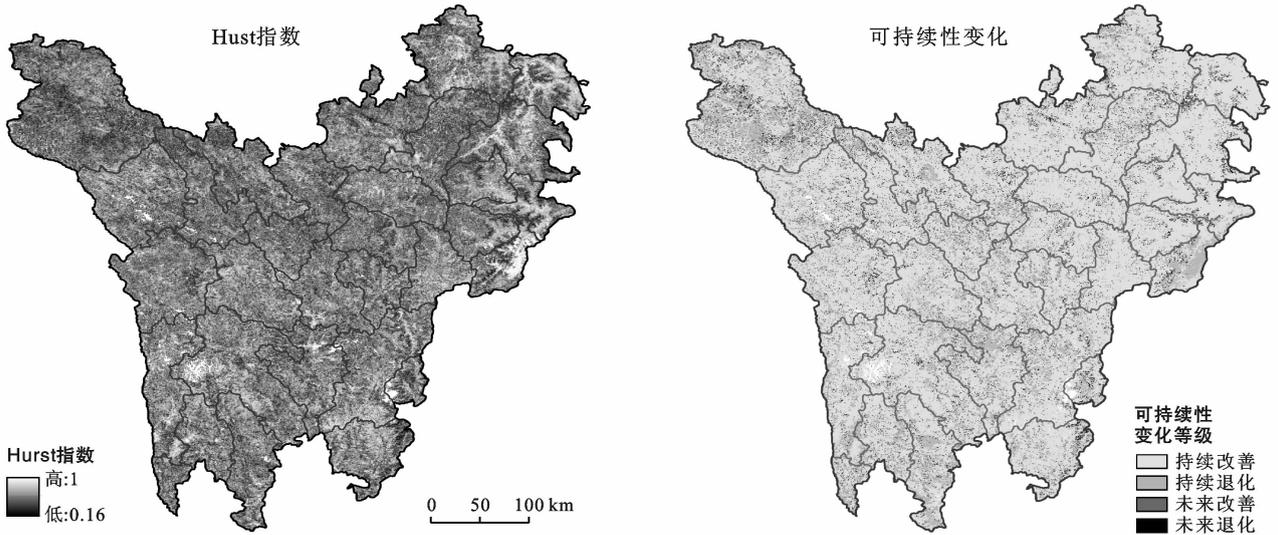


图 4 川西高原植被 NDVI Hurst 指数空间分布和持续性变化趋势分布特征

2.3 川西高原植被 NDVI 变化对气候因子的响应

2.3.1 气候因子年际变化特征 图 5 表示川西高原 2001—2017 年平均气温和年累积降水量变化特征。由图 5 可以看出,川西高原近 17 a 平均气温总体呈波动上升趋势,平均气温在 2009 年出现最高值 2.48 °C,在 2004 年出现最低值 1.26 °C,多年平均值为 1.94 °C,

整体以 0.42 °C/(10 a)($p=0.023$)的速率增温。研究区年累积降水量在 2001—2017 年整体上升趋势不明显(图 5),波动较大。其中年累积降水量最小值出现在 2002 年为 545 mm,在 2012 年达到最大值 806.64 mm,多年平均累积降水量为 713.49 mm,整体以 29.7 mm/10 a ($p=0.286$)的速率增加。

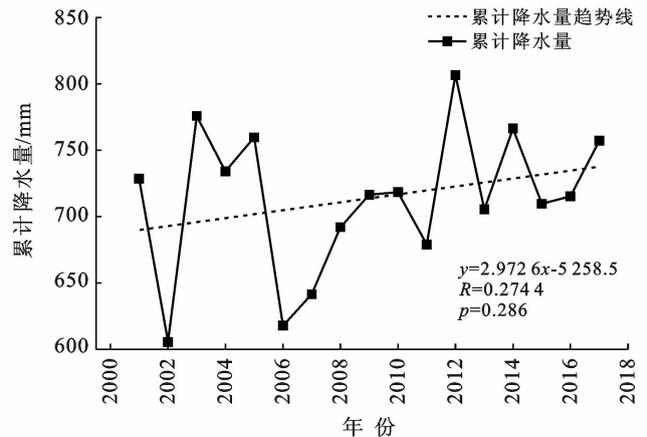
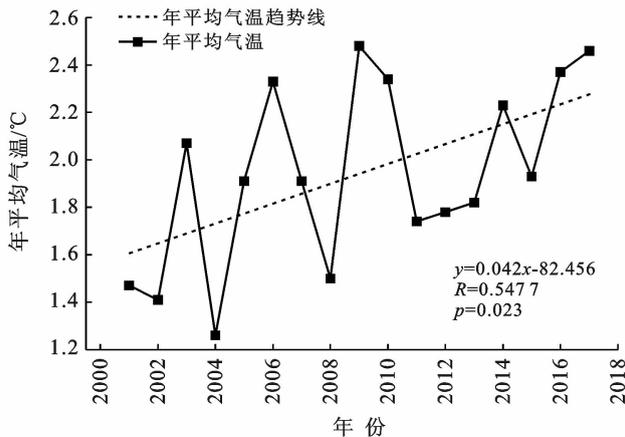


图 5 川西高原 2001—2017 年平均气温和年累积降水量

2.3.2 植被 NDVI 对气候因子的响应分析 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 与气温的偏相关系数值介于 -0.92~0.9 之间,正、负相关区域面积占比分

别为 75.7%,24.3%。研究区约有 12.8%的区域通过了 $p < 0.05$ 显著性水平检验,显著正相关和显著负相关区域分别占研究区总面积的 11.6%和 1.2%

(见图 6), 这表明整体上川西高原植被 NDVI 与气温呈正相关关系。植被 NDVI 与气温呈显著正相关关系的区域主要分布在石渠县、若尔盖县、九寨沟县、红原县、阿坝县以及汶川县, 主要植被类型以高寒草甸为主, 该区域属高寒区, 生态环境极为敏感脆弱, 气温变化对植被生长的影响较大。植被 NDVI 与气温呈显著负相关关系的区域主要集中在雅江县和新龙等中部海拔相对较低处(见图 6), 主要植被类型为高寒草甸、灌丛和阔叶林。川西高原植被 NDVI 与降水的偏相关系数分布在 $-0.93 \sim 0.93$ 之间, 正、负相关区

域分别占研究区总面积的 44.6% 和 55.4%。有 11.6% 的区域通过了 $p < 0.05$ 显著性水平检验, 显著正相关和显著负相关的区域面积分别占比 6.3% 和 5.3% (见图 6), 整体上川西高原植被 NDVI 与降水呈负相关关系, 表明降水对有些地区的植被生长起到一定抑制作用。植被 NDVI 与降水呈显著正相关关系的区域主要分布在若尔盖县、红原县、阿坝县、色达县、甘孜县、以及德格县等北部地区, 显著负相关关系主要分布在雅江县、丹巴县、乡城县和巴塘县等中部和西南部区域(见图 6)。

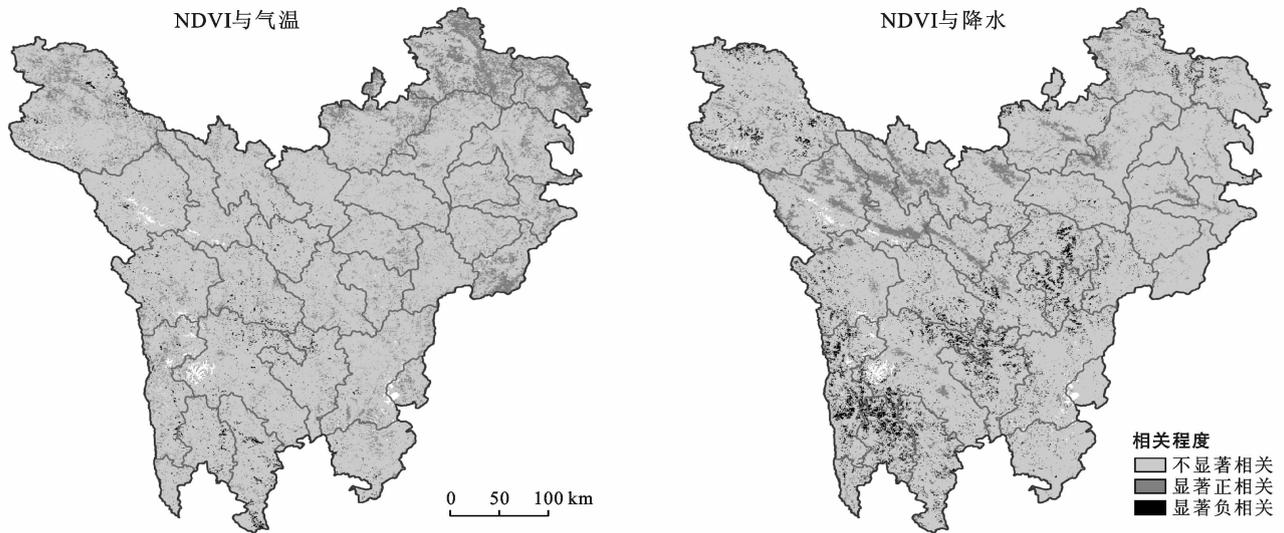


图 6 川西高原植被 NDVI 与气温和降水偏相关系数的 t 显著性检验

3 讨论

本研究基于 NDVI 对川西高原植被动态变化特征进行分析, 发现川西高原 NDVI 整体呈改善趋势, 并且大部分区域呈持续改善趋势。这一结论说明该地区多年来积极推进生态文明建设, 实施退耕还林、封山育林等生态保护工程^[24-25]效果显著, 对植被生长起到了积极作用。另外川西高原建立了湿地公园、水源涵养、水土保持功能区和森林公园等各类保护地, 这可能是相应区域植被得到改善的主要原因^[20, 45-47]。但在川西高原局部地区植被 NDVI 呈现退化趋势, 尤其是在冰川覆盖以及人类聚集区。这可能由三方面影响造成的, 首先, 高寒区的植被对气候变化响应敏感, 近来气温升高、冰川冻土消融使得高海拔区域植被生长受到影响^[48-50]。川西高原海拔 5 000 m 以上区域分布有格聂山和贡嘎山等大面积冰川^[20], 地形起伏大, 植被覆盖较低, 易发生土壤侵蚀, 造成水土流失^[50], 植被呈现出退化趋势。其次, 由于川西高原生态环境脆弱, 地质构造复杂, 地质灾害频发, 原生生态

环境极易遭到破坏^[20, 25, 53]。2008 年汶川地震导致大面积地表裸露, 植被根系生长环境遭到破坏, 造成植被生态系统稳定性变差, 水土流失严重。最后, 川西高原部分城镇及周边等人口密集地区人类活动干扰加剧, 植被生长环境受到一定破坏^[52-54]。川西北高原石渠县境内超载放牧, 土地沙化严重^[54], 造成植被覆盖较低。雅江县等城镇周边由于城镇化扩张、基础设施建设以及旅游开发等, 挤占了植被生长空间^[20], 植被呈现出持续退化趋势。

另外, 植被动态变化与气候变化密切相关^[55]。本文分析了川西高原植被 NDVI 对气温和降水的响应关系, 整体上川西高原植被 NDVI 受气温和降水共同影响, 在空间上存在一定差异。由于川西高原特殊的地形地貌和复杂的气候条件, 在北部的高寒地带, 气候类型为高原高寒气候, 植被生态环境脆弱, 植被生长受水热条件限制, 但随着近年来气温升高, 降水增加, 植被与气温和降水主要呈正相关关系; 而西南部分地区全年气温均值相对偏高, 降水较少, 多为干热河谷气候, 在植被生长较为适应气温状况的前提

下,降水成为影响植被生长的主要因素。整体上川西高原气温升高,降水增加趋势不显著,地表蒸发有所增加,土壤水分含量降低,并且受川西高原地形影响,降水虽然有保湿作用,但易造成水土流失^[49],破坏植被生长环境,导致降水对有些地区的植被生长起到一定抑制作用。另一方面,极端气候的发生影响植被生长,2012年川西高原气温较低,降水量最大,该年份发生涝灾^[56]而导致当年植被 NDVI 值较低。此外,文中植被 NDVI 与气候因子偏相关分析的结论与郑杰等^[51]、曾波等^[57]、荣欣等^[20]的研究结果基本一致,但本文与荣欣等^[20]川西高原植被 EVI (enhanced vegetation index) 与气候因子偏相关分析在空间上存在一些差异。大量研究表明 NDVI 和 EVI 描述高植被覆盖和低植被覆盖植被生长情况的能力存在差异^[58]。川西高植被类型多样,包括针叶林、灌丛、草甸和高山植被等植被;西北部地区海拔相对较高,植被覆盖相对较低,类型单一;东南部海拔相对较低,植被覆盖较高,类型多样。由此可见,两种植被指数的不同可能是导致对气候因子的响应存在差异^[58-59]的主要原因。另外,参与计算的气象站数量不同^[11,59]也可能是导致差异的原因之一。

4 结论

本文基于 MOD09 A1 数据,反演了川西高原 2001—2017 年植被 NDVI,结合气象数据、植被类型数据和 DEM 数据,利用 Theil-Sen media 趋势分析、Mann-Kendall 统计检验、Hurst 指数分析以及相关分析等多种方法,分析了川西高原年际植被 NDVI 的时空分布特征、变化趋势、未来趋势变化特征以及植被 NDVI 变化对气候变化的响应。

(1) 川西高原 2001—2017 年植被 NDVI 均值为 0.486,受地形影响明显,在空间上呈现由西北向东南逐渐升高的分布格局,在垂直分布上随海拔升高呈现先增加后降低的特点,低值区多分布在 4 000 m 以上的高海拔区域,高值区主要分布在研究区海拔 3 000 m 以下的东部和南部,近 17 a 植被 NDVI 均值以 0.01/10 a 的速率波动上升。

(2) 川西高原近 17 a 植被 NDVI 整体以不显著改善趋势为主,面积占比达 71.41%,有 12.09% 的区域呈现显著改善特征,不显著退化占 15.88%,显著退化面积仅占 0.61%。研究时段植被 NDVI 的 Hurst 指数均值为 0.69,总体变化趋势持续性较强,持续性改善面积占比 78.33%,未来改善占 1.95%,未来退化占比 5.18%,持续退化占比 14.54%。

(3) 川西高原近 17 a 气温增温速率为 0.42 °C/

10 a,多年平均累计降水量增幅为 29.7 mm/10 a。研究时段内植被 NDVI 与气温偏相关关系的正、负相关区域面积分别占 75.7% 和 24.3%,与降水偏相关关系的正、负相关区域面积分别占 44.6% 和 55.4%。整体上植被 NDVI 受气温的影响大于降水,与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系;空间上存在差异,研究区北部植被 NDVI 主要受气温和降水影响,西南部植被 NDVI 主要受降水影响。

[参 考 文 献]

- [1] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报,2017,32(1):50-63.
- [2] 邹洪坤. 湖北省植被覆盖度动态变化及其对气候变化的响应[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2018.
- [3] 朱文会,毛飞,徐影,等. 三江源区植被指数对气候变化的响应及预测分析[J]. 高原气象,2019,38(4):693-704.
- [4] 李重阳,樊文涛,李国梅,等. 基于 NDVI 的 2000—2016 年青藏高原牧场草场覆盖度变化驱动力分析[J]. 草业学报,2019,28(10):25-32.
- [5] 魏彦强,芦海燕,王金牛,等. 近 35 a 青藏高原植被带变化对气候变化及人类活动的响应[J]. 草业科学,2019,36(4):1163-1176.
- [6] 裴志方. 川西高原植被覆盖度景观格局动态变化研究[D]. 四川 成都:成都理工大学,2018.
- [7] 王云川. 2001—2015 年川西高原植被物候时空变化特征及与气候变化的响应研究[D]. 四川 成都:成都理工大学,2017.
- [8] 仙巍,季建万,何彬彬,等. 川西高山高原过渡带植被对气候变化的响应[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2016,41(9):1-6.
- [9] 郭滨德,张远东,王晓春. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异[J]. 应用生态学报,2016,27(2):354-364.
- [10] 孙锐,陈少辉,苏红波. 2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J]. 地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.
- [11] Pan Xia, Gao Yong, Wang Ji. Response differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(6): 673-680.
- [12] Mao Dehua, Luo Ling, Wang Zongming, et al. Variations in net primary productivity and its relationships with warming climate in the permafrost zone of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015,25(8):967-977.
- [13] 俞佳骏,余树全,梁立成,等. 浙江省丽水市莲都区水源涵养功能动态变化及发展趋势[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(2):189-198.

- [14] Wang Hongshuo, Liu Desheng, Lin Hui, et al. NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(5):687-698.
- [15] 李璠,徐维新. 2001—2015 年青海省不同功能区 NDVI 时空变化分析[J]. *草地学报*, 2017, 25(4):701-710.
- [16] 方利,王文杰,蒋卫国,等. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. *地理科学*, 2017, 37(11):1745-1754.
- [17] 程东亚,李旭东,杨江州. 西南山地流域 NDVI 变化特征及降水敏感性探究:以贵州沅江流域为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(4):1-14.
- [18] 张艳楠,牛建明,张庆,等. 植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题探讨[J]. *草业学报*, 2013, 21(1):229-238.
- [19] Wang Hongshuo, Liu Xiaoxuan, Zhang Xiaodong, et al. Spatiotemporal crop NDVI responses to climatic factors in Mainland China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(1):89-103.
- [20] 荣欣,易桂花,张廷斌,等. 2000—2015 年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12):3014-3028.
- [21] 张仁平,冯琦胜,郭靖,等. 2000—2012 年中国北方草地 NDVI 和气候因子时空变化[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5):1403-1412.
- [22] 宋怡,马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3):499-505.
- [23] 韩炳宏,周秉荣,颜玉倩,等. 2000—2018 年青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J]. *草地学报*, 2019, 27(6):1651-1658.
- [24] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等. 20 世纪 90 年代以来中国西南地区土地覆被变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(23):7858-7869.
- [25] 朱昌丽,张继飞,赵宇鸾,等. 青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应:以岷江上游为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(10):1687-1699.
- [26] 吕远洋,刘志红,叶帮苹,等. 川西高原精细化生态敏感性评价[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1):272-277.
- [27] 王文国,何明雄,潘科,等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9):1555-1565.
- [28] 王永前,施建成,刘志红,等. 微波植被指数在干旱监测中的应用[J]. *遥感学报*, 2014, 18(4):843-867.
- [29] Xu Zhixin, Wang Dajun, Gao Jie. Homogeneity test on temperature series in Liaoning Province [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 38(27):15149-15151.
- [30] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data[J]. *International Journal of Climatology*, 1986, 6(6):661-675.
- [31] 李金洁,王爱慧. 基于西南地区台站降雨资料空间插值方法的比较[J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(1):50-60.
- [32] 李艳,朱军,胡亚,等. 不同插值方法模拟四川省逐月降水量的对比分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1):151-154,160.
- [33] Jiang Xiaojian, Liu Xiaojun, Huang Fen, et. Comparison of spatial interpolation methods for daily meteorological elements [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3):624-630.
- [34] 易桂花,张廷斌,何奕莹,等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(1):115-128.
- [35] 譙捷. 川西高原农业气候资源变化特征研究[D]. 甘肃兰州:兰州大学, 2011.
- [36] Jiang Weiguo, Yuan Lihua, Wang Wenjie, et al. Spatiotemporal analysis of vegetation variation in the Yellow River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51(4):117-126.
- [37] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(9):2994-3008.
- [38] Tong Siqin, Zhang Jiquan, Bao Yuhai, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982—2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5):595-610.
- [39] 王建邦,赵军,李传华,等. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J]. *地理学报*, 2019, 74(3):504-519.
- [40] 刘亚龙,王庆,毕景之,等. 基于 Mann-Kandall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J]. *海洋学报*, 2010, 32(3):79-87.
- [41] Wang Qingming, Wang Jianhua, Zhao Yong, et al. Reference evapotranspiration trends from 1980 to 2012 and the irattribution to meteorological drivers in the three-river source region, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(11):3759-3769.
- [42] 朱玉果,杜灵通,谢应忠,等. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(2):518-529.
- [43] 成方妍,刘世梁,尹艺洁,等. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及主要其驱动因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(3):788-797.
- [44] 叶红,张廷斌,易桂花,等. 2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(11):2117-2134.
- [45] 杨更,张慧利,郭建强,等. 四川省生态功能区划探讨[J]. *环境保护*, 2004(8):23-25.

- [7] 朱琳. 煤炭资源枯竭型城市转型时期的可持续发展情况分析:以贾汪为例[C]//中国地理学会,河南省科学技术协会. 中国地理学会 2012 年学术年会学术论文摘要集. 2012.
- [8] 白雪. 农户视角下的生态治理政策效果评价研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2019.
- [9] 梁流涛. 农村生态环境时空特征及其演变规律研究[D]. 江苏 南京:南京农业大学,2009.
- [10] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*,2015,30(8):1243-1254.
- [12] 彭建,王仰麟,张源,等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应:以云南省永胜县为例[J]. *地理学报*, 2004,59(4):629-638.
- [13] Terefe Tolessa, Feyera Senbeta, Moges Kidane. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia [J]. *Ecosystem Services*, 2017,23(2):47-54.
- [14] 王家庭,曹清峰. 京津冀区域生态协同治理:由政府行为与市场机制引申[J]. *改革*,2014(5):116-123.
- [15] 史恒通,睢党臣,徐涛,等. 生态价值认知对农民流域生态治理参与意愿的影响:以陕西省渭河流域为例[J]. *中国农村观察*,2017(2):68-80.
- [16] 穆松林. 1982—2014 年内蒙古自治区温带草原生态系统服务价值及其空间分布[J]. *干旱区资源与环境*, 2016,30(10):76-81.
- [17] 孙特生,李波,张新时. 北方农牧交错带农业生态系统结构的能值分析:以准格尔旗为例[J]. *干旱区资源与环境*,2013,27(12):7-14.
- [18] 张丽,杨国范,刘吉平. 1986—2012 年抚顺市土地利用动态变化及热点分析[J]. *地理科学*,2014,34(2):185-191.
- [19] 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.
- [20] 杜子涛,杨小明,颜树强,等. 奈曼旗土地退化遥感监测研究[J]. *农业工程学报*,2012,28(3):154-161.

(上接第 294 页)

- [46] 汪明,刘建,刘兴良,等. 四川省生态功能区区划及其生态屏障建设与布局[J]. *四川林业科技*,2005,26(3):11-19.
- [47] 淳阳,朱晚秋,潘洪义,等. 重心转移视角下新型城镇化与生态足迹时空差异及其耦合关系研究:以四川省为例[J]. *长江流域资源与环境*,2018,27(2):306-317.
- [48] Wang Rui, Dong Zhibao, Zhou Zhengchao. Changes in the depths of seasonal freezing and thawing and their effects on vegetation in the Three-River Headwater Region of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(12):2810-2827.
- [49] 魏江龙. 川西高原荒漠化时空变化特征及驱动力分析[D]. 四川 成都:成都理工大学,2017.
- [50] 杨桂山,徐昔保,李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究[J]. *地理科学进展*,2015,34(11):1356-1367.
- [51] 郑杰,冯文兰,牛晓俊,等. 四川省植被变化及其与气象因子的相关性分析[J]. *水土保持通报*,2016,36(2):99-104.
- [52] 张骞,马丽,张中华,等. 青藏高原寒区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. *生态学报*, 2019,39(20):7441-7451.
- [53] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等. 近 15 a 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.
- [54] 李波,邵怀勇. 气候变化与人类活动对川西高原草地变化相对作用的定量评估[J]. *草学*,2017,0(3):16-21.
- [55] 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.
- [56] 杜华明,延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J]. *资源科学*,2013,35(12):2491-2500.
- [57] 曾波,湛芸,肖国杰. 川西高原植被特征及其气候变化的相关分析[J]. *成都信息工程学院学报*[J],2011,26(6):625-630.
- [58] 王正兴,刘闯,陈文波,等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*,2006,31(5):407-427.
- [59] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. *自然资源学报*,2014,29(10):1802-1812.