

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.027.

缪利, 陆晴, 刘根林, 等. 1999—2019年青藏高原不同植被类型NDVI时空演变特征及其对气候因子的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 97-105.
MIAO Li, LU Qing, LIU Genlin, et al. Spatiotemporal Evolution Characteristics of NDVI of Different Vegetation Types and Its Response to Climate Factors on the Qinghai-Tibet Plateau from 1999 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 97-105.

1999—2019年青藏高原不同植被类型NDVI时空演变特征及其对气候因子的响应

缪利¹, 陆晴^{1,2,3}, 刘根林¹, 危小建^{1,3}

(1. 东华理工大学 测绘工程学院, 南昌 330013; 2. 东华理工大学 资源与环境经济研究中心, 南昌 330013; 3. 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 研究青藏高原不同植被类型NDVI时空变化特征, 探讨不同植被类型NDVI对气候因子的响应机制, 为青藏高原生态保护提供科学依据。基于1999—2019年的SPOT/VEG NDVI数据、植被类型和气象数据, 采用线性趋势分析、Pearson相关分析及偏相关分析方法, 对1999—2019年青藏高原不同植被类型NDVI时空变化特征进行了分析, 并探讨了不同植被类型NDVI变化对气候因子的响应。结果表明: (1) 青藏高原整体植被生长状况良好, 青藏高原各植被类型生长季平均NDVI均值从高到低依次为森林(0.6)、灌丛(0.48)、草甸(0.37)、草原(0.16)、高山植被(0.13)。(2) 除高山植被有轻微退化趋势外, 其他植被类型均有显著改善, 改善面积占比依次为灌丛58.46% ($p < 0.05$)、森林52.78% ($p < 0.05$)、草甸51.60% ($p < 0.05$)、草原32.65% ($p < 0.05$)。(3) 气候因子对植被NDVI的影响具有明显的地域差异性, 平均气温对青藏高原植被生长季NDVI变化的影响更为显著, 且影响范围更为广阔; 而降水主要影响青藏高原北部地区的草原、草甸等植被的NDVI变化。研究结果能够为青藏高原生态保护和制定科学的植被修复策略提供一定的方法支撑。

关键词: 青藏高原; NDVI; 降水; 气温; 相关分析

中图分类号: Q948.12

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0097-09

Spatiotemporal Evolution Characteristics of NDVI of Different Vegetation Types and Its Response to Climate Factors on the Qinghai-Tibet Plateau from 1999 to 2019

MIAO Li¹, LU Qing^{1,2,3}, LIU Genlin¹, WEI Xiaojian^{1,3}

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Research Center of Resource and Environment Economics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake, ministry of Nature Resources, Nanchang 330013, China)

Abstract: To study the temporal and spatial variation characteristics of NDVI of different vegetation types in the Qinghai-Tibet Plateau, explore the response mechanism of NDVI of different vegetation types to climatic factors, and provide a certain basis for the ecological protection of the Qinghai-Tibet Plateau, based on the SPOT/VEG NDVI data, vegetation types and meteorological data from 1999 to 2019, linear trend analysis, Pearson correlation analysis and partial correlation analysis methods, the temporal and spatial changes of NDVI of different vegetation types on the Qinghai-Tibet Plateau from 1999 to 2019 were examined. The

收稿日期: 2022-03-24

修回日期: 2022-04-30

资助项目: 国家自然科学基金(52168010); 江西省社会科学“十三五”项目(20GL41); 江西省高校人文社会科学研究项目(GL20229); 东华理工大学资源与环境经济研究中心项目(20RGL01)

第一作者: 缪利(1996—), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用及土地生态环境效应研究。E-mail: miaoli0906@qq.com

通信作者: 陆晴(1986—), 女, 江西高安人, 讲师, 博士, 主要从事气候变化及土地生态效应研究。E-mail: luqing_0920@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

responses of different vegetation types to climatic factors were analyzed and discussed. The results showed that: (1) the overall vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau was growing well, and the average NDVI of different vegetation types during the growing season was 0.6 for forest, 0.48 for shrub, 0.37 for meadow, 0.16 for grassland and 0.13 for alpine vegetation in descending order; (2) except for the slight degradation of alpine vegetation, other vegetation types had been significantly improved, and the proportions of improved areas were 58.46% for shrub ($p < 0.05$), 52.78% for forest ($p < 0.05$), 51.60% for meadow ($p < 0.05$) and 32.65% for grassland ($p < 0.05$); (3) the effects of climate factors on NDVI had obvious regional differences; average temperature had a more significant impact on NDVI in the growing season of the Qinghai-Tibet Plateau, and the impact range was broader; precipitation mainly affected the NDVI change of grassland, meadow and other vegetation in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau. It can be concluded that the NDVI change of vegetation in the growing season of the Qinghai-Tibet Plateau is more affected by average temperature than precipitation in the same period. These results can provide a scientific basis for the ecological protection of the Qinghai-Tibet Plateau and the formulation of a scientific and reasonable vegetation restoration strategy.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; NDVI; precipitation; temperature; correlation analysis

青藏高原作为东亚地区的生态安全屏障,青藏高原的生态环境变化对高原本身及周边地区的气候、生态、自然灾害等多方面产生影响,对维护周边地区的自然环境稳定有巨大作用^[1]。青藏高原在全球变暖背景下,生态安全问题日渐复杂多样^[2],仍面临草地大面积退化,冻土面积萎缩、沼泽湿地减少、部分生物栖息地消失以及局部生态系统退化等生态风险^[3]。植被作为陆地生态系统的生产者,它对生态系统的物质与能量循环起着重要作用,也在维护地区气候稳定等方面具有不可替代的作用^[4-5]。植被作为物质交换与能量循环的首要环节,深入研究青藏高原植被时空变化特征及对气候变化的响应过程,对认识和反映全球气候变化对陆地生态系统的影响具有重要意义^[6-7]。

归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)是通过红外与近红外波段的组合实现对植被信息状态的表达,被用于大规模监测植被覆盖变化,是应用最为广泛的经典植被指数^[8-9]。基于长序列的NDVI数据,Ukkola等分析了干旱地对降水量的敏感性^[10]、Sanz等对于干旱草原的草地退化进行了监测^[11]、王彦吉等发现松嫩平原沼泽湿地植被明显改善^[12]。在中国西北、华北、东北、西南和黄土高原等地区在近几十年植被覆盖不断改善^[13-17]。青藏高原地域辽阔,王春雅等认为藏东南地区植被变化趋势以稳定不变和改善趋势为主,区域总体呈稳中向好态势^[18],张佳华等认为藏北地区受人类活动影响较小,因此藏北的植被变化更多的表现为自然变动^[19],藏南地区62%的植被面积NDVI呈上升趋势^[20]。结合前人的研究成果,本文将对1999—2019年青藏高

原不同区域内各植被类型的NDVI变化及其对气候因子的响应进行探究。

植被和气候因子的关系一直是全球生态环境研究的重要内容,而气候因子主要以降水量和平均气温作为主要代表^[21]。在中国大部分地区多年生长季平均NDVI与平均气温呈显著正相关^[22],在中国北方,生长季NDVI与温度和降水都呈正相关,而且对气温的响应更为强烈^[23],但在秦岭—淮河以北地区,降水量是影响植被生长的限制因子^[24],中国西南大部分地区植被NDVI与气温和降水呈正相关^[25]。青藏高原植被NDVI总体上与年降水成正相关,在高原的东南部NDVI与平均气温呈正相关,而在西南部则呈负相关^[26]。青藏高原北部的高寒草地NDVI变化受降水主导,在降水充沛的中东部高原,高寒草地的生长受气温的制约^[27]。青藏高原处于气候变化敏感地带,生态系统较为脆弱,青藏高原不同植被类型对气候因子的响应具有空间异质性。在21世纪可持续发展的大背景下,了解青藏高原不同植被的动态变化及其对气候因子的响应,对青藏高原生态保护措施的调整,促进社会经济与生态系统的协调发展具有一定的指向性意义。

本文以1999—2019年SOPT/VEGETATION NDVI数据、植被类型和气象数据为基础,分析研究青藏高原不同植被类型NDVI年际变化趋势以及对气候因子(降水和气温)的响应;运用线性趋势法分析不同植被类型多年生长季NDVI变化趋势,结合偏相关和Pearson相关法对不同植被NDVI从空间上分析气候因子对其的直接、间接影响,旨在从空间分异的角度了

解青藏高原植被的变化以及与气候变化的关系,为科学评估和应对气候变化提供依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原位于中国西南部,北起西昆仑山—祁连山山脉北麓,南抵喜马拉雅山等山脉南麓,东起横断山脉,西至帕米尔高原,范围为 $73^{\circ}18'52''$ — $104^{\circ}46'59''$ E, $26^{\circ}00'12''$ — $39^{\circ}46'50''$ N(图 1),在中国境内的青藏高原面积约为 257万 km^2 ,平均海拔 $4\ 400 \text{m}$,分布在西藏、青海、甘肃、四川、云南、和新疆等 6 个省区^[28]。青藏高原作为巍峨壮美的自然地理单元被誉为“世界屋脊”,在其独特的地理因素作用下,东南部属于暖湿性气候,西北部属于干冷性气候。青藏高原气候主要特点是太阳辐射强、气温低、日较差大,巨大的海拔高程阻挡暖湿气流北上,不易形成降水,不同地域降水量差异极大,有利于冰川、冻土的发育,使青藏高原冰雪与寒冻风化作用普遍。

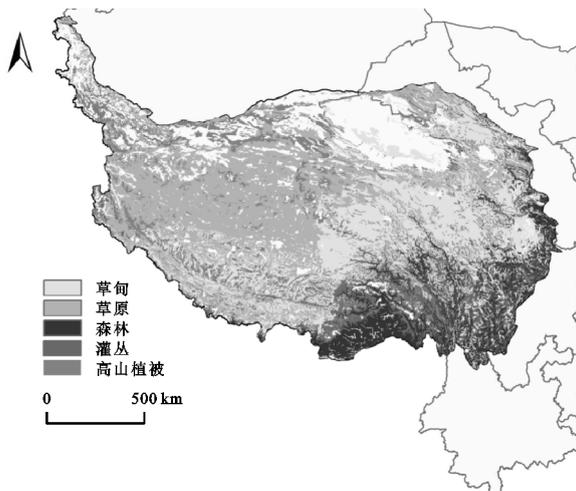


图 1 研究区位置及植被类型分布

1.2 数据来源及处理

归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供的中国月度 1 km 植被指数(NDVI)空间分布数据集,该数据集是在 SPOT/VEGETATION PROBA-V 1 KM 产品的基础上,采用最大值合成法得到^[29],可以准确反映地表植被覆盖状况。本文将 5—9 月定为植被生长季^[27],选择 1999—2019 年 5—9 月的中国 NDVI 月数据集,通过 ArcGIS 10.4 裁剪得到青藏高原生长季 NDVI 数据。

植被类型数据来源于中国科学院环境资源科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)的中国 100万 植被类型空间分布数据,该数据植被类型分为 11 类,分辨率为 1 km 。青藏高原包含其中 9 类(针叶林、阔

叶林、草甸、草原、高山植被、灌丛、沼泽湿地、荒漠裸地、其他),由于针叶林、阔叶林占比较少,故合并为森林进行研究。其中草甸占比 27.98% 、草原占比 30.61% 、森林占比 8.13% 、灌丛占比 11.43% 、沼泽湿地占比 0.58% 、高山植被占比 12.53% 、荒漠裸地占比 0.6% 、其他占比 8.13% ,本文选取草甸、草原、森林、灌丛和高山植被等 5 种占比较大的植被类型作为主要研究对象(图 1)。

气候数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)数据集的中国逐月降水量数据和逐月平均气温数据,空间分辨率为 $0.008\ 333\ 3^{\circ}$ (约 1 km)。数据是据 CRU 发布全球 0.5° 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据,通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成。并用 496 个独立气象观测点数据进行验证,验证结果可信。将数据用 ArcGIS 10.4 进行裁剪、重采样成 1 km 分辨率,与 NDVI 数据匹配进行分析研究。

2 研究方法

2.1 线性趋势分析法

通过线性最小二乘回归法对每年生长季的平均 NDVI 进行计算,分析 1999—2019 年逐个像元的变化趋势^[14],计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times (\sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: θ_{slope} 为变化趋势斜率; $n=21$ 表示研究年数; i 表示第 i 年; NDVI_i 为第 i 年的生长季平均归一化植被指数。 $\theta_{\text{slope}} > 0$,说明 NDVI 在这 21 年间的变化趋势为增加, $\theta_{\text{slope}} < 0$,说明 NDVI 变化为减少趋势。采用 F 检验方法对变化趋势进行显著性检验。其计算公式为:

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

式中: $U = \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2$ 为误差平方和; $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$ 为回归平方和,回归自由度为 1; $N-2$ 代表残差自由度。 $i=1, 2, 3, \dots, n$; y_i 为第 i 年变量 y 的值; \bar{y}_i 为 i 与变量 y 的线性回归值; \bar{y} 为变量 y 的 n 年平均。根据 F 值检验结果与临界值的比较将变化趋势分为 6 个等级:极显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, p < 0.01$)、显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 \leq p \leq 0.05$)、不显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, p > 0.05$)、不显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, p > 0.05$)、显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 \leq p \leq 0.05$)、极显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, p < 0.01$)。

2.2 Pearson 相关分析

为了从空间上分析植被与气候因子之间的关系,利用 Pearson 相关系数分别对全域不同植被类型多年生长季 NDVI 与主要气候因子的相关性进行计算^[30],计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R 为变量 x, y 的相关系数; x_i 为第 i 年的 NDVI 值; \bar{x} 为多年生长季 NDVI 平均值; y_i 为第 i 年的气候因子数值; \bar{y} 为多年气候因子的平均值。其中相关系数 R 的取值范围为 $(-1, 1)$, R 的绝对值越趋近于 1, 则表明变量之间的相关程度越强, 并对相关性分析结果进行检验, 分为显著 ($0 < p < 0.05$) 和不显著 ($p \geq 0.05$) 2 个等级。

2.3 偏相关分析

生态系统是由多种要素构成的复杂系统, 任何一个要素的变化都可能引起其他要素发生变化, 当我们要单独研究两个要素之间的相互影响作用时, 偏相关分析法就可以很好解决上述问题, 偏相关将其他要素的影响视为常数^[31]。计算公式为:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} 分别为要素 x 与 y, x 与 z, y 与 z 之间的相关系数; $r_{xy \cdot z}$ 为将要素 z 固定后要素 x 与 y 的偏相关系数。

其中, x, y 和 z 之间的相关系数计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为变量 x 与 y 之间的相关系数; i 为样本数; \bar{x}, \bar{y} 分别为 NDVI 多年生长季均值和各气象因子均值。

偏相关系数的显著性检验, 通常采用 t 检验法。其计算公式为:

$$t = \frac{r_{1,2,3,4,\dots,m}}{\sqrt{1-r_{1,2,3,4,\dots,m}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (6)$$

式中: $r_{1,2,3,4,\dots,m}$ 为偏相关系数; n 为样本数; m 为自变量个数。显著水平的临界值 t_a 可以通过查询 t 分布表获得, 若 $t > t_a$, 则表明偏相关显著; 若 $t < t_a$, 则偏相关不显著。

3 结果与分析

3.1 青藏高原多年生长季 NDVI 时空变化特征

从时间变化来看(图 2), 1999—2019 年青藏高原

多年生长季 NDVI 均值呈波动上升趋势, 增长速率为 $0.013/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$), 2001 年出现最小值为 0.247, 2013 年达到最大值为 0.285, 多年生长季 NDVI 平均值为 0.263。从空间分布来看(图 3), 青藏高原生长季植被 NDVI 值由西北向东南呈现逐渐增加趋势, 其显著性检验结果表明, 青藏高原东部和中部地区表现为显著增加趋势, 青藏高原北部和西部零星地区表现为显著减少趋势。

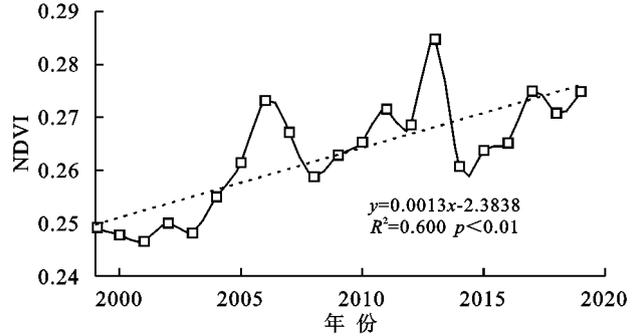


图 2 1999—2019 年青藏高原生长季 NDVI 值变化趋势

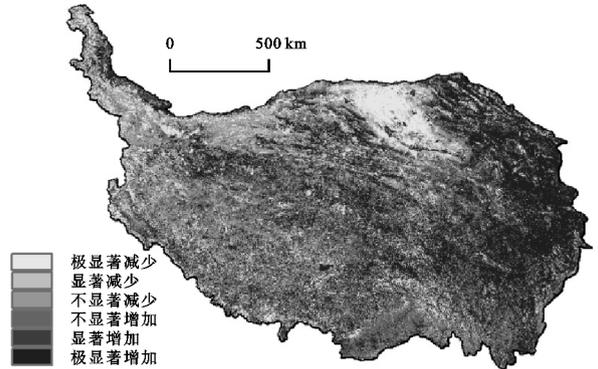


图 3 1999—2019 年青藏高原生长季 NDVI 值变化趋势显著性检验

3.2 青藏高原不同植被类型多年生长季 NDVI 时空变化特征

3.2.1 时间分布特征 图 4 为 1999—2019 年青藏高原 5 种植被类型生长季 NDVI 均值年际变化图, 由图可知, 青藏高原草原 NDVI 最小值出现在 2015 年(0.146), 在 2013 年达到最大值(0.170), 表现为波动增长趋势, 速率为 $0.008/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。草甸 NDVI 最小值出现在 2003 年(0.345), 在 2013 年达到最大值(0.392), 表现为明显增长趋势, 速率为 $0.018/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$)。灌丛 NDVI 最小值出现在 2001 年(0.439), 在 2013 年达到最大值(0.512), 表现为明显的增长趋势, 速率为 $0.030/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$)。高山植被 NDVI 最小值出现在 2003 年(0.125), 在 2013 年达到最大值(0.151), 变化率趋近于 0。森林 NDVI 最小值出现在 2000 年(0.548), 在 2017 年达到最大值(0.658), 表现为明显增长趋势, 速率为 $0.042/10 \text{ a}$ ($p < 0.01$)。其中, 草原、草甸、灌丛和森林表现为增长趋势, 在 2013 年达

到最大值,高山植被没有通过显著性检验。不同植被类型 NDVI 值依次为森林(0.6) > 灌丛(0.48) > 草甸(0.37) > 草原(0.16) > 高山植被(0.13)。

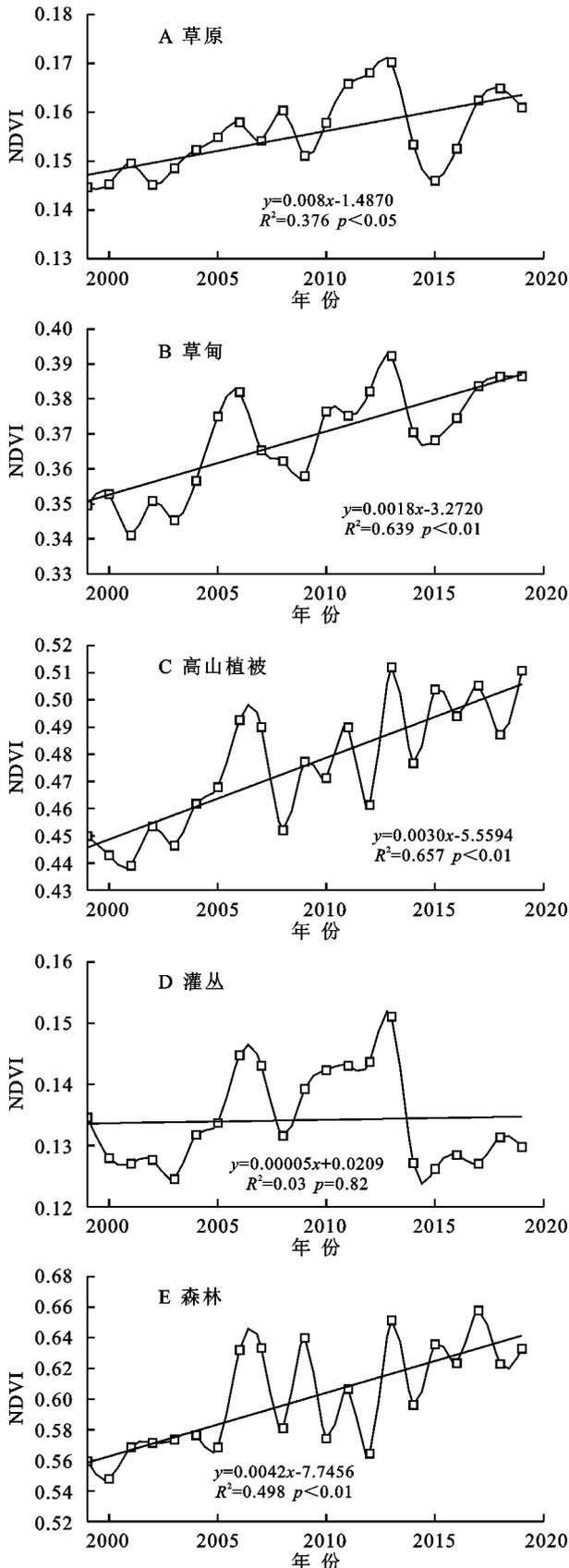


图 4 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 年际变化

3.2.2 空间分布特征 表 1 为 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 面积变化占比情况,图 5 为不同植被类型 NDVI 变化趋势及显著性检验结果。青藏高原整体上 NDVI 呈增长趋势,局部地区呈退化趋势。

表 1 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 面积变化占比情况

植被类型变化趋势	变化趋势面积占比%				
	草原	草甸	高山植被	灌丛	森林
极显著增加 $p \leq 0.01$	24.96	40.82	17.22	47.38	40.82
显著增加 $0.05 \leq p \leq 0.01$	8.69	10.78	5.21	11.08	11.96
不显著增加 $p > 0.05$	30.64	25.28	18.98	24.02	34.77
不显著减少 $p > 0.05$	25.76	14.77	32.25	12.03	10.28
显著减少 $0.05 \leq p \leq 0.01$	4.86	3.29	11.61	2.44	0.97
极显著减少 $p \leq 0.01$	5.10	5.06	14.73	3.04	1.20
面积占比	30.61	27.98	12.53	11.43	8.14

青藏高原不同植被类型 NDVI 空间变化特征不同,草原主要分布在青藏高原的中西部以及东北部,其变化速率为 $-0.195 \sim 0.328/10 \text{ a}$ 。占草原面积的 64.28% 区域呈现为增加趋势,其中有 24.96% 的面积极显著增加 ($p < 0.01$),增加区域分布在青藏高原东北部及中部地区;呈现减少的草原面积为 35.72%,其中极显著退化面积占比 5.10% ($p < 0.01$),分布区域较为零散,集中在高原的中西部地区。草甸主要分布在青藏高原的中部、东部以及西南的地区,变化速率为 $-0.271 \sim 0.300/10 \text{ a}$ 。草甸面积的 76.88% 表现为增加趋势,其中的 40.82% 为极显著增加 ($p < 0.01$),增加区域集中在中东部地区。呈现为减少的草甸面积为 23.12%,其中极显著退化的面积占 5.06% ($p < 0.01$),主要分布区域在青藏高原的中北部地区。

高山植被分布区域较为零散,在整个青藏高原全域均有覆盖,变化速率为 $-1.168 \sim 0.199/10 \text{ a}$,高山植被面积的 41.41% 表现为增加趋势,其中 17.22% 为极显著增加 ($p < 0.01$),增加区域主要分布在高原的中部地区;呈现减少的高山植被面积为 58.59%,其中极显著退化的面积占 14.73% ($p < 0.01$),主要分布在青藏高原的边缘地区。灌丛主要分布在青藏高原的东南部地区,变化速率为 $-0.245 \sim 0.211/10 \text{ a}$,灌丛面积的 82.48% 表现为增长趋势,其中 47.38% 为极显著增加 ($p < 0.01$),增加区域分布在青藏高原的东部和中部地区;呈现减少的灌丛面积为 17.52%,其中极显著减少的面积占 3.04% ($p < 0.01$)。森林主要分布在青藏高原的南部地区,变化速率 $-0.280 \sim 0.115/10 \text{ a}$,87.55% 森林表现为增长趋势,其中 40.82% 为极显著增加 ($p < 0.01$),增加区域基本覆盖整个青藏高原南部;呈现减少的森林面积为 12.45%,其中极显著减少的面积占 1.20% ($p < 0.01$)。

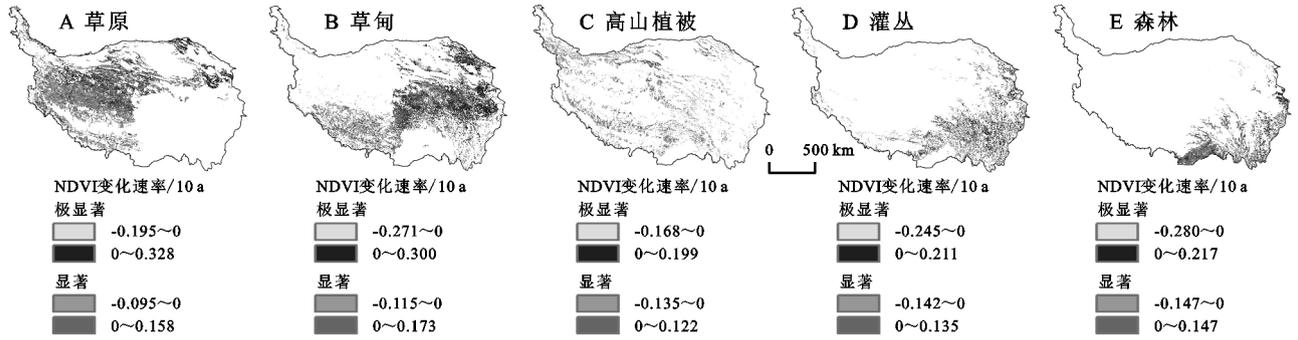
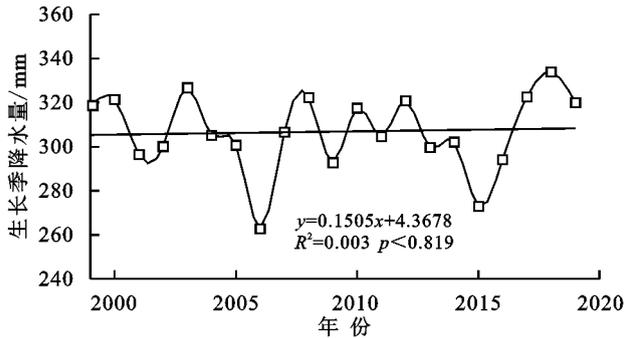


图5 1999—2019年青藏高原不同植被类型NDVI变化趋势及显著性检验

3.3 青藏高原植被与气候因子的响应分析

3.3.1 青藏高原生长季气候因子的年际变化 由图6可知,1999—2019年青藏高原生长季降水量集中在



260~350 mm,处于上下波动趋势,平均降水量为306.76 mm;21年来青藏高原的生长季平均气温在5.5~6.5℃浮动,平均气温为6.06℃。

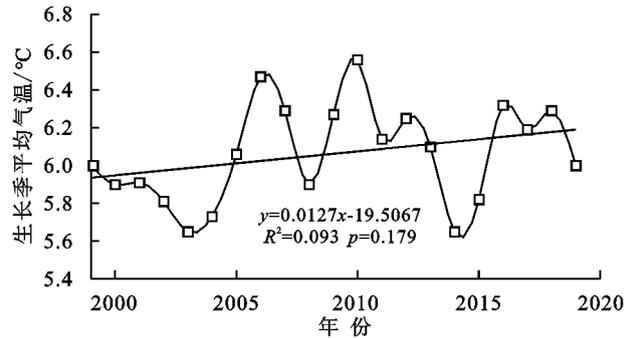


图6 1999—2019年青藏高原生长季降水量与平均气温的年际变化

3.3.2 青藏高原不同植被类型NDVI与气候因子的关系 运用偏相关分析法,从整体上对生长季不同植被类型的NDVI和平均降水量、平均气温进行了相关分析及显著性检验(表2)。发现青藏高原不同植被类型NDVI跟生长季平均气温有着较强的相关性,其中与草原、草甸和灌丛的相关性显著,与高山植被相关性极其显著,说明生长季平均气温对不同植被的NDVI变化有重要影响,不同植被类型NDVI与平均降水量的相关性分析结果不理想。

0.93,草原分布区域的东部地区表现出显著正相关性,且自东向西递减,在西部表现出显著负相关性;草原NDVI与平均气温的相关性在-0.89~0.88,草原分布区域的中部地区表现为显著正相关性,在分布区域的西南部和边缘地区表现为显著负相关性,呈现为中部高四周低的特征。草甸NDVI与降水量的相关性在-0.87~0.86,草甸分布区域的东北部地区表现为显著正相关性,且由东北向西南递减,在分布区域的南部和西南部表现为显著负相关性;草甸NDVI与平均气温的相关性在-0.87~0.92,草甸分布区域的东部和中部的大部分区域表现为显著正相关性,在西南部表现为显著负相关,呈现为自东向西西南递减的特征。高山植被NDVI与降水量的相关性在-0.87~0.87,高山植被分布区域的上半部分表现为显著正相关性,由北向南递减,在西南部地区表现为显著负相关性;高山植被NDVI与平均气温的相关性在-0.80~0.93,高山植被分布区域的大部分地区都表现为正向相关性,有显著正相关性的地区为北部地区和中部地区。

表2 不同植被类型生长季NDVI与降水量、气温的相关系数及显著性检验

植被类型	生长季平均降水量		生长季平均气温	
	相关系数 R^2	p	相关系数 R^2	p
草原	0.26	0.13	0.40	0.04
草甸	0.14	0.27	0.61	0.02
高山植被	-0.29	0.11	0.64	0.01
灌丛	-0.30	0.10	0.46	0.02
森林	-0.31	0.09	0.33	0.08

注: p 值为显著性检验结果; $p \leq 0.05$ 为 95% 置信度; $p \leq 0.01$ 为 99% 置信度; $p > 0.05$ 为未通过显著性检验。

运用 Pearson 相关分析法从区域尺度上研究降水量和气温对植被 NDVI 变化的影响,发现生长季降水量和平均气温对不同植被类型的 NDVI 在不同的区域产生的影响也不相同(图7)。主要表现为以下特征,草原 NDVI 与降水量的相关性在 -0.83 ~

灌丛 NDVI 与降水量的相关性在 -0.89 ~ 0.84,灌丛主要分布在青藏高原的西南角,在分布区域的上部分表现为显著正相关性,在分布区域的下部分表现为显著负相关性,有明显的地域分异特征;灌丛 NDVI 与平均气温的相关性在 -0.86 ~ 0.88,且大部分区域表现为与平均气温有正相关性,有显著正相关性的地区为分布区域

的中部地区,有显著负相关性的区域分布西南边缘地带。森林 NDVI 与降水量的相关性在 $-0.90 \sim 0.82$, 森林主要分布在青藏高原的东部边缘及东南地区,在分布区域的东部零星地区表现为显著正相关性,在

分布区域下半部分表现为具有负相关性,存在明显的地域分异情况;森林 NDVI 与平均气温的相关性在 $-0.81 \sim 0.84$, 森林覆盖的全域基本表现为与平均气温正相关,显著正相关性的区域分布在东南部地区。

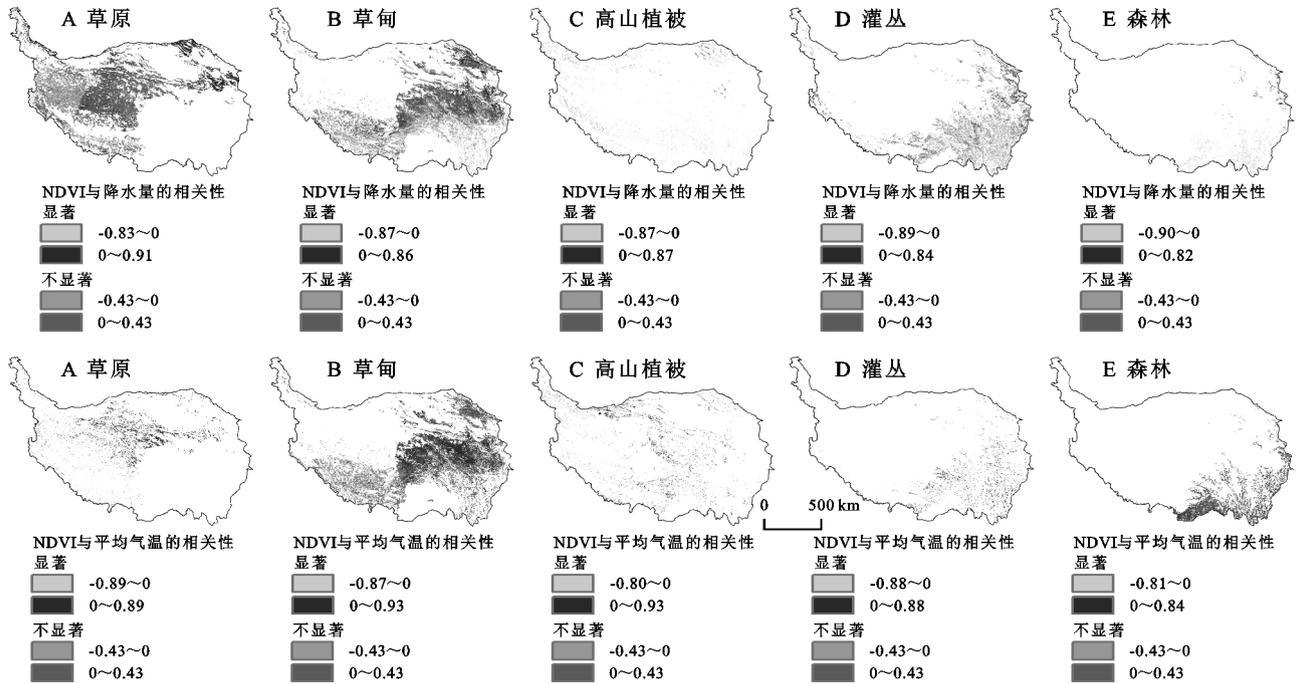


图 7 1999—2019 年青藏高原主要植被生长季降水量及平均气温与 NDVI 的关系

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究结果表明,在 1999—2019 年,除青藏高原北部和西部零星地区呈减少趋势外,青藏高原植被 NDVI 整体呈增长趋势,这与卓嘎等、韩炳宏等研究结果相一致^[26,32]。高山植被有轻微退化趋势,其他植被类型均有显著改善,改善面积占比依次为灌丛 58.46% ($p < 0.05$)、森林 52.78% ($p < 0.05$)、草甸 51.60% ($p < 0.05$)、草原 32.65% ($p < 0.05$)。

通过分析青藏高原不同植被类型逐年生长季平均 NDVI 对同时期平均降水量、平均气温的响应状况发现,整体上青藏高原平均气温对植被生长季 NDVI 变化的影响更为显著。本研究结果与王春雅和张戈丽等认为气温对整个青藏高原植被生长季 NDVI 的驱动作用强于降水和相对湿度^[18,33]的结论相似。从区域尺度上研究生长季降水量和气温对不同植被类型 NDVI 的变化影响发现,降水量和平均气温的空间异质性导致植被 NDVI 在区域上的差异。降水量对植被生长季 NDVI 变化的影响区域为青藏高原北部地区,该区域内植被主要为高寒草原,生长季温度较为适宜,降水量则成为该区域植被 NDVI 生长的主要促进因素,已有研究表明,青藏高

原高寒草地生长季 NDVI 均值与降水呈显著正相关^[27],除藏南部分地区外,气温对青藏高原植被生长季 NDVI 的变化影响范围较广,在降水量较为充沛的区域,植被 NDVI 的变化受气候因子的影响主要为气温,杨达等^[34]研究表明,在青藏高原的湿润气候区,植被 NDVI 主要受气温影响较大。而在降水和气温均较适宜的青藏高原中部区域,植被 NDVI 的生长与降水量和气温都呈正相关。

植被 NDVI 变化受多方地理因素制约,在分析植被与气候因子的相互关系时,还受到人为活动和地形以及海拔等多方面综合因素影响^[35]。柴立夫等^[36]在人类活动对青藏高原植被影响中提到,青藏高原植被覆盖受人类活动的促进和抑制作用面积分别为 61.16% 和 38.84%。马海丽等^[37]在草原生态补奖对青藏高原草地的影响分析表明,补奖政策对草地植被的影响存在空间异质性,对青海省的草地植被状况改善大于西藏自治区,且对牧区县和草地状况较好的县 NDVI 值促进作用更显著。随着国家对生态环境保护的重视和相关保护及修复政策的出台,各大自然保护区的建立,实施退牧还草、生态移民等相关措施,使得保护区及其周围的植被覆盖得到改善。本研究只选取了逐年生长季的降水量和平均气温对不同植被类型进行了相关性分析,缺乏对气候因子滞后性的考

虑,还有其他气候因素(如极端气候、日照长度等)也需要考虑在研究变量之内。除气候因素外,自然灾害、人类活动等对研究区植被覆盖的影响也不可忽略。因此,如何将众多影响因子分离量化其贡献率是下一步要进行研究的问题。

4.2 结论

本文基于1999—2019年SPOT/VEGETATION-NDVI植被类型和气候数据,分析了青藏高原近21年来不同植被类型生长季NDVI的时空变化特征,探讨了不同植被类型对气候因子的响应,初步结论如下:

(1) 青藏高原不同植被类型生长季平均覆盖度依次为森林、灌丛、草甸、草原和高山植被。近21年来,青藏高原整体植被生长情况良好,除高山植被有轻微退化趋势外,其他植被类型均有显著改善,改善面积占比依次为灌丛58.46%($p < 0.05$)、森林52.78%($p < 0.05$)、草甸51.60%($p < 0.05$)、草原32.65%($p < 0.05$)。

(2) 草原主要分布在青藏高原西北部分,其中24.96%表现为极显著增长趋势($p < 0.01$);草甸分布在青藏高原的中东部和西南部分,其中40.82%表现为极显著增长趋势($p < 0.01$);高山植被在青藏高原上零星分布,其中17.22%表现为极显著减少趋势($p < 0.01$);灌丛主要分布在青藏高原的东南部分,其中47.38%表现为极显著增长趋势($p < 0.01$);森林主要分布在青藏高原的东南边缘部分,其中40.28%表现为极显著增长趋势($p < 0.01$)。整个青藏高原大部分植被覆盖在近21年来增长趋势向好,少部分区域表现为轻微退化。

(3) 各类植被NDVI与气候因子的相关性具有明显的地域差异性。平均气温对青藏高原植被生长季NDVI变化的影响更为显著,且影响范围更为广阔;而降水主要影响青藏高原北部地区的草原、草甸等植被类型的NDVI变化,综合得知青藏高原植被生长季NDVI变化受平均气温影响要强于同时期的降水量。

参考文献:

- [1] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
- [2] 武爽,冯险峰,孔玲玲,等.气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J].地理研究,2021,40(5):1265-1279.
- [3] 傅伯杰,欧阳志云,施鹏,等.青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J].中国科学院院刊,2021,36(11):1298-1306.
- [4] 朴世龙,方精云.1982—1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J].地理学报,2003,58(1):119-125.
- [5] 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.
- [6] 王涛,赵元真,王慧,等.基于GIMMS NDVI的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J].冰川冻土,2020,42(2):641-652.
- [7] 杨元合,朴世龙.青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2006,30(1):1-8.
- [8] 崔浩楠,罗海江,张学珍.1982—2019年长江经济带植被覆盖变化的时空特征[J].生态学杂志,2021,40(8):2517-2529.
- [9] 刘海,黄跃飞,郑粮.气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响[J].农业工程学报,2020,36(6):97-105.
- [10] Ukkola A M, De Kauwe M G, Roderick M L, et al. Annual precipitation explains variability in dryland vegetation greenness globally but not locally[J]. Global Change Biology, 2021,27(18):4367-4380.
- [11] Sanz E, Saa-Requejo A, Díaz-Ambrona C H, et al. Normalized difference vegetation index temporal responses to temperature and precipitation in arid rangelands[J]. Remote Sensing, 2021,13(5):840.
- [12] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, et al. Vegetation change and its response to climate change between 2000 and 2016 in marshes of the Songnen Plain, Northeast China[J]. Sustainability, 2020,12(9):3569.
- [13] 郭金停,胡远满,熊在平,等.中国东北多年冻土区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2017,28(8):2413-2422.
- [14] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等.1981—2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J].生态学报,2017,37(2):576-592.
- [15] 周梦甜,李军,朱康文.西北地区NDVI变化与气候因子的响应关系研究[J].水土保持研究,2015,22(3):182-187.
- [16] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于MODIS-EVI的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].生态学报,2021,41(3):1138-1147.
- [17] 孙锐,陈少辉,苏红波.黄土高原不同生态类型NDVI时空变化及其对气候变化响应[J].地理研究,2020,39(5):1200-1214.
- [18] 王春雅,王金牛,崔霞,等.藏东南三江并流核心区植被时空动态变化及其气候驱动力分析[J].地理研究,2021,40(11):3191-3207.
- [19] 张佳华,姚凤梅,郑凌云.中国藏北高寒生态遥感植被变化及成因分析[J].中山大学学报:自然科学版,2009,48(5):143-147.
- [20] Zhe M, Zhang X. Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet[J]. Ecological Indicators, 2021,124:107431.
- [21] 谢舒笛,莫兴国,胡实,等.三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应[J].地理研究,2020,39(1):152-165.
- [22] 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.
- [23] 刘少华,严登华,史晓亮,等.中国植被NDVI与气候因子的年际变化及相关性研究[J].干旱区地理,2014,37(3):480-489.
- [24] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型NDVI对气温和降水的响应特征[J].生态环境学报,2020,29(1):23-34.
- [25] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].遥感技术与应用,2017,32(5):966-972.
- [26] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2018,38(9):3208-3218.
- [27] 陆晴,吴绍洪,赵东升.1982—2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].地理科学,2017,37(2):292-300.
- [28] 张懿铨,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积[J].地理研究,2002,21(1):1-8.
- [29] 徐新良.中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集[EB/OL].2018-06-06[2019-03-15].<http://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx>,2018.
- [30] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆盖类型NDVI对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.
- [31] 杨艳萍,陈建军,覃巧婷,等.2000—2018年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J].农业工程学报,2021,37(17):234-241.
- [32] 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.
- [33] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等.基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].地理研究,2010,29(11):2004-2016.
- [34] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季NDVI时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.
- [35] 王军,张骁,高岩.青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望[J].地学前沿,2021,28(4):70-82.
- [36] 柴立夫,田莉,奥勇,等.人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):382-388.
- [37] 马海丽,林慧龙,熊潇雨,等.草原生态补奖政策对青藏高原草地植被状况的影响分析[J].草地学报,2021,29(3):545-554.

(上接第96页)

- [9] 张洪波,顾磊,陈克宇,等.渭河生态水文联系变异分区研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(6):210-220.
- [10] 赵静,黄强,刘登峰.渭河流域水沙演变规律分析[J].水力发电学报,2015,34(3):14-20.
- [11] Woo M, Thorne R. Comment on 'Detection of hydrologic trends and variability' by Burn, D. H. and Hag Elnur, M. A., 2002. Journal of Hydrology 255,107-122 [J]. Journal of Hydrology, 2003,277(1):150-160.
- [12] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
- [13] 姜瑶,徐宗学,王静.基于年径流序列的5种趋势检测方法性能对比[J].水利学报,2020,51(7):845-857.
- [14] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [15] 陈建国,胡春宏,戴清.渭河下游近期河道萎缩特点及治理对策[J].泥沙研究,2002(6):45-52.
- [16] 王国庆,张建云,管晓祥,等.中国主要江河径流变化成因定量分析[J].水科学进展,2020,31(3):313-323.
- [17] 栗晓玲,康绍忠,魏晓妹,等.气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2):153-159.
- [18] 郭文献,陈鼎新,李越,等.基于IHA-RVA法金沙江下游生态水文情势评价[J].水利水电技术,2018,49(8):155-162.
- [19] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游泥沙输移特性及机理研究[J].泥沙研究,2020,45(5):34-41.
- [20] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等.黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J].水利学报,2014,45(7):793-800.
- [21] 鞠琴,王尧,王哲,等.淤地坝和植被变化对渭河流域水沙情势的影响[J].水力发电,2021,47(6):18-24.
- [22] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.退耕还林(草)背景下渭河流域植被覆盖时空变化分析[J].农业现代化研究,2012,33(4):470-474.
- [23] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [24] Van Dijk A, Bruijnzeel L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model: Part 1. Model description[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2001,247(3):230-238.