

文章编号: 2096-1618(2020)03-0306-07

基于生态地理分区的青藏高原 NDVI 变化特征研究

王万鑫, 范广洲

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 为了对青藏高原近年来的植被变化趋势提供生态地理性差异方面的研究参考, 利用 MODIS MOD13Q1 归一化差异植被指数资料, 采用一元线性回归、空间插值、Mann-Kendall 检验法和滑动 t 检验法等统计方法, 对青藏高原地区 4 种生态植被类型 2000–2018 年的 NDVI 变化特征进行一系列初步研究, 包括空间分布、趋势分析和突变检验等。结果表明: 青藏高原植被空间上呈现东南–西北的梯度和带状分布特征, 且从东南向西北递减; NDVI 月变化表现为单峰变化趋势; NDVI 年均值、年最大值和生长季均值的年际变化趋势存在明显的生态地理区域性差异, 高寒草甸和针叶林近年来呈现减少趋势, 高寒草原和高寒荒漠则明显增加; 高寒草甸在 2011 年存在气候突变, 高寒草原仅在 2007 年存在均值突变, 高寒荒漠不存在趋势突变, 亦不存在均值突变, 针叶林在 2008 年存在由增加向减少的趋势突变, 但从其滑动 t 检验来看, 不存在均值突变; 高原 NDVI 年际变化线性趋势的空间分布大部分呈现增加趋势, 且从长势上看由东南向西北逐渐改善。

关键词: 气象学; 气候变化; 青藏高原; 生态地理分区; 归一化差异植被指数; 变化特征

中图分类号: P467

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.011

0 引言

气候和陆地生态系统(即植被)是共存于一个动态系统中的两个方面。气候是决定地球自然植被类型与分布特征的重要因素之一, 而反过来, 下垫面植被分布的改变也不同程度地影响着区域乃至全球气候的变化^[1]。由于降水、温度、海拔和土壤条件等因素的不同, 不同的区域会有不同的植被特征; 而植被影响着地表反射率、地表粗糙度和土壤湿度, 并且, 不同的植被其蒸腾作用也是不同的, 因此, 植被严重影响着地表的温度、水分平衡和地–气系统的热量、动量交换^[2]。青藏高原(下称“高原”)总面积约 250 万 km², 平均海拔在 4000 m 以上, 其下垫面的物理属性和物理状态, 决定着高原对大气非绝热加热的影响^[3]。

近些年来, 在人类活动和全球变暖的大背景下, 降水及温度的变化对高原植被物候产生了巨大影响, 极端气候事件频繁发生, 给高原脆弱的植被生态增加了更多不确定因素^[4]。因此, 对高原的植被分布及其多年发展趋势进行分析和研究, 对于了解高原生态系统的物候变化具有重要意义。

Charney 在 20 世纪 70 年代提出一种副热带植被影响气候的理论机制, 指出在下沉辐散的环流背景下, 若过度开垦易使地面反射率增大, 干热的下沉气流在边界层摩擦作用下得到增强, 会使植被进一步退化, 从

而使沙漠化加剧^[2]。R. K. Kaufmann^[5]从统计学角度研究了植被与气候之间的反馈关系, 指出温度引起的植被增加减缓了地表温度的增加, 但是这种反馈可能受到温度对植被产生积极影响范围的限制。郑益群等^[6–7]利用区域气候模式模拟研究了中国植被变化的气候影响, 指出植被退化的程度不同, 其与降水之间的反馈关系也会不同。

在高原植被变化趋势方面, 已有不少工作与研究。周玉科等^[8]利用多种方法并使用高原站点资料及对应的 MODIS NDVI 时序数据, 对高原植被物候时空特征进行了分析。孟梦等^[9]利用 GIMMS NDVI 资料 and 同时期气象观测数据研究了 1982–2012 年高原 NDVI 的变化趋势及其对气候的响应, 并指出, 地势对于 NDVI 具有显著影响。卓嘎等^[10]对近 17 年来高原植被覆盖变化的研究发现, 高原植被改善的地区多于植被退化的地区, 同时指出, 降水对植被覆盖的影响较于气温密切。

在当前的高原植被变化特征研究中, 也有部分研究针对于不同的植被类型。陆晴等^[11]利用 GIMMS NDVI 时序数据和地面气象观测资料, 研究了高原 1982–2013 年高寒草地覆盖的时空变化及其对气象因素的响应。王志鹏等^[12]利用 MOD13A2 的 NDVI 数据产品和高原气象站点资料, 探讨了高原草地对降水年际变化的响应。黄文洁等^[13]利用 MOD13A1 的植被指数资料, 分析了高原高寒草地 2001–2015 年植被物候时空变化及其驱动力。

基于时空分辨率相对较高的 MODIS MOD13Q1 卫

收稿日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91537214); 科技部国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505702)

星数据产品,按照高原地区的生态地理分区,提取高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠和针叶林4种生态地理区域的2000–2018年NDVI时间序列,分析在全球变暖的气候背景下高原植被近年来的变化趋势。

1 资料与方法

1.1 资料来源与预处理

归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对绿色植被表现敏感,在遥感方面常被用来进行区域和全球范围的植被状态研究^[7]。其公式如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

其中 NIR 为近红外波段的反射值, R 为红光波段的反射值。

所用的资料为来自美国 LAADS DAAC 数据中心中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)传感器提供的 MOD13Q1 NDVI 数据产品,时空分辨率为16 d、250 m×250 m,时间为2000–2018年。MODIS 植被指数较大幅度地改进了波段数目、数据分辨率、数据接收、数据格式、植被指数设计和合成算法等方面,是对 NOAA(national oceanic and atmospheric administration)卫星 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)植被指数的继承和发展^[9],因此对于 MODIS 的研究也成为了近年来遥感应应用领域研究的热点。

首先使用 MRT(MODIS reprojection tools)工具对下载自 LAADS DAAC 官网的 MOD13Q1 原始块(Tiles)数据文件进行格式转换(Hdf 格式转换至 Tif 格式)和投影转换(正弦曲线投影转换至 UTM 投影),并进行重采样操作(NDVI 波段提取、拼接、裁剪、感兴趣区域提取等),以批处理方式获得高原(如图1所示有色区域)区域2000–2018年、时空分辨率16 d、250 m×250 m的 NDVI 栅格数据的 Tif 图像。然后使用 ENVI(the environment for visualizing images)软件对其进行波段计算(NDVI 值=原始数据像元的 DN 值÷10000)和时次叠加(layer stacking),从而获得高原区域2000–2018年 NDVI 的时间序列。最后使用 ENVI 软件对此时间序列文件进行感兴趣区域提取,获取以高原85个气象站点(如图1所示)为中心、2 km×2 km(即8×8=64个像元)范围内的区域 NDVI 时序数据。图1中有色区域所使用的青藏高原范围与界线地理信息系统 ArcGIS. shp 格式资料,为张懿铨等^[14]在2014年通过中科院地理资源所的科学数据出版平台公开出版的青藏高原中国境内部分边界矢量数据。

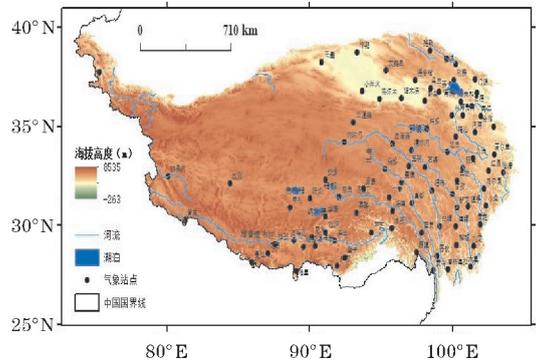


图1 研究区域及气象站点分布

1.2 方法

首先采用最大值合成法(maximum value composite, MVC)获取研究对象(85 站点×64=5440 个像元,下同)的 NDVI 月值数据。然后对研究对象的 NDVI 时间序列进行像元值的筛选和剔除,以排除裸地、稀疏植被、常绿林以及非植被因素的影响。筛选和剔除综合了周玉科等^[8]、陆晴等^[11]和方精云等^[15]的方法,原则如下:

(1)年内 NDVI 无效值(即负值)应小于3期(月)。

(2)冬季 NDVI 均值应小于0.4;生长季(5–9月,下同)均值应大于0.1;月最大值应大于0.15。

(3)NDVI 年均值应大于0.1。

最后对处理的多个像元的 NDVI 时间序列进行以85个气象站点为中心、2 km×2 km的区域平均,获得高原85个气象站点的区域平均 NDVI 月值时间序列。而后基于此时间序列,获得对应气象站点的年 NDVI 均值、年 NDVI 最大值和生长季 NDVI 均值,并统计入 Excel 表格。

为表现不同生态地理区域 NDVI 指数的变化特征,采用郑度等^[18]的中国生态地理区域图,根据中国生态地理区划,采用自上而下顺序划分和自下而上逐级合并相结合的方法,可以将高原划分为10个自然地区(见图2和表1),主要包括亚寒带和温带两个温度带,以及湿润/半湿润、半湿润、半干旱和干旱等4个干湿地区(表1)。绘制图2所使用的植被类型数据和植被分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的100万植被类型空间分布数据。结合图2和表1可以看到,针叶林(常绿类除外)绝大部分分布在高原东南部的 H1A/B1 生态区内;高寒草甸主要分布在高原中东部及东北部的 H1B1、H1C1、H1C1 这3个生态区内,而在高原西南部包括 H1C2 南部和 H1C2 生态区内则有较为稀疏的分布;高寒草原则在高原北部和高原西部等大片地区均有分布;而高寒荒漠则分布在高原北部的边缘地带,包括 H1D1、H1D1、H1D2 这3个生态区。因此这种生态地理分区能够很好体现

出较为明显的增加趋势 ($\text{slope}_{\text{ave}} = 0.00036/\text{a}$, 显著性水平 $P = 0.085$), 2000–2002 年明显增加, 在 2002–2012 年较为稳定, 而在 2015 年后则明显增加; 年最大值则表现为较稳定的波动态势, 但在 2015 年有一个极小值, 整体而言在 0.4~0.42 波动。高寒荒漠年均 NDVI 的年际变化为非常显著的增加趋势, 年增长率达到 0.002/a (显著性水平 $P = 2 \times 10^{-5} < 0.05$), 而年最大值则整体呈现单一的波动态势。针叶林 NDVI 的年最

大值在 2000–2018 年呈显著的波动减少 ($\text{slope}_{\text{max}} = -0.0025/\text{a}$, 显著性水平 $P = 0.0009 < 0.05$), 并且在 2015 年达到最低, 而年均值变化趋势则不明显。

值得注意的是, 所有的植被类型, 其 NDVI 值在 2014–2016 年都普遍存在着一个极小值, 在变化趋势上, 曲线亦在 2015 年前后存在拐点。那么, 这个 NDVI 极小值年及趋势变化与气候变化存在的关系, 这就是后面工作需要关注的地方。

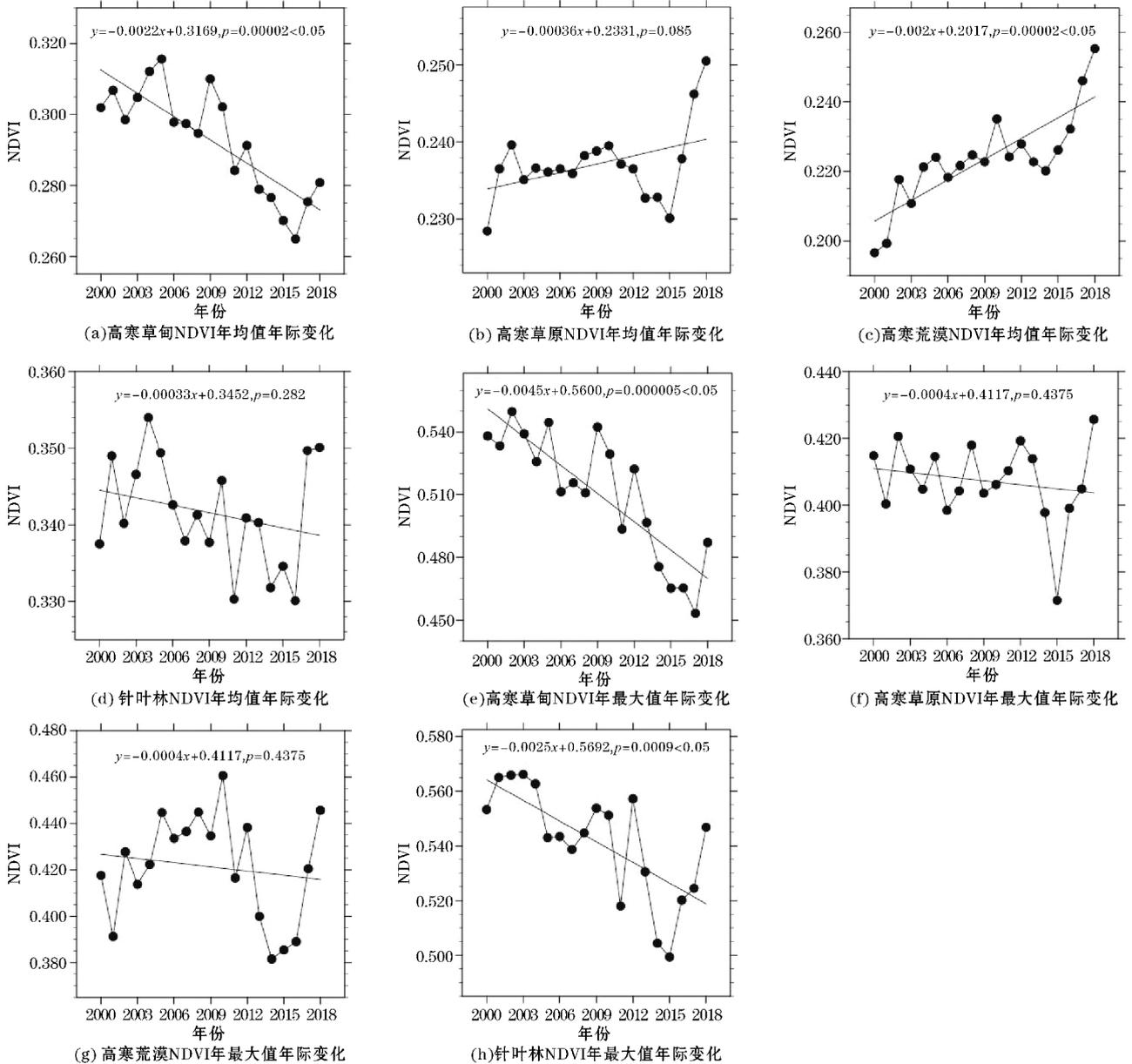


图5 青藏高原不同植被类型 NDVI 年均值和最大值的年际变化

植被生长季是对所在环境季节性变化的长期适应而形成的生长规律, 是陆面过程以及植被生产力模型的重要参数。通过图 6 可以看到, 高寒草甸和针叶林的生长季 NDVI 均值年际变化均呈非常显著的减少趋势, 其年变化率分别为 $-0.0039/\text{a}$ (显著性水平 $P = 2 \times 10^{-5} < 0.05$) 和 $-0.002/\text{a}$ (显著性水平 $P = 0.00043 <$

0.05), 并且变化过程中存在较小的波动; 高寒草原年际变化趋势不明显但整体稳定, 并且在 2015 年后呈现较好的增加态势; 而高寒荒漠年际变化呈波动增加 ($\text{slope}_{\text{season}} = 0.0013/\text{a}$, 显著性水平 $P = 0.087$), 而且存在高值年 (2001 年和 2014 年) 和低值年 (2010 年和 2018 年)。

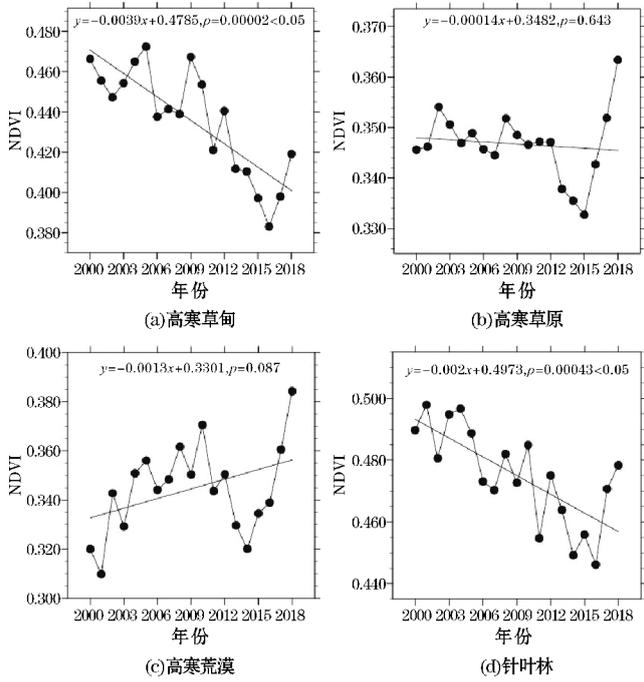


图6 青藏高原不同植被类型NDVI生长季均值的年际变化

3.2 青藏高原NDVI变化趋势和突变检验

图7通过Mann-Kendall(即M-K)方法(图7a、b、c、d)和滑动t检验(图7e、f、g、h)对高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠和针叶林的NDVI年均值时间序列进行突变检验。由UF曲线可以看到,高寒草甸(图7a、e)统计量在2000-2005年为波动态势,从2006年开始转为减少趋势,并且在2012年后这种减少趋势均大大超过0.05显著性水平线($u_{0.05} = 1.96$,下同)甚至超过0.001显著性水平($u_{0.001} = 2.56$,下同),表明高寒草甸NDVI年均值近年来的减少趋势十分显著。然后根据UF和UB曲线交点的位置及其处于显著性水平临界线之间可以判定,高寒草甸NDVI年均值近年来的减少趋势是一突变现象,并且从2011年开始。由图7(e)可知,M-K检验得出的突变点在滑动t检验中超过了其显著性水平线,因此并非是虚假突变。高寒草原(图7b、f)的UF曲线整体表现为增加趋势,但均

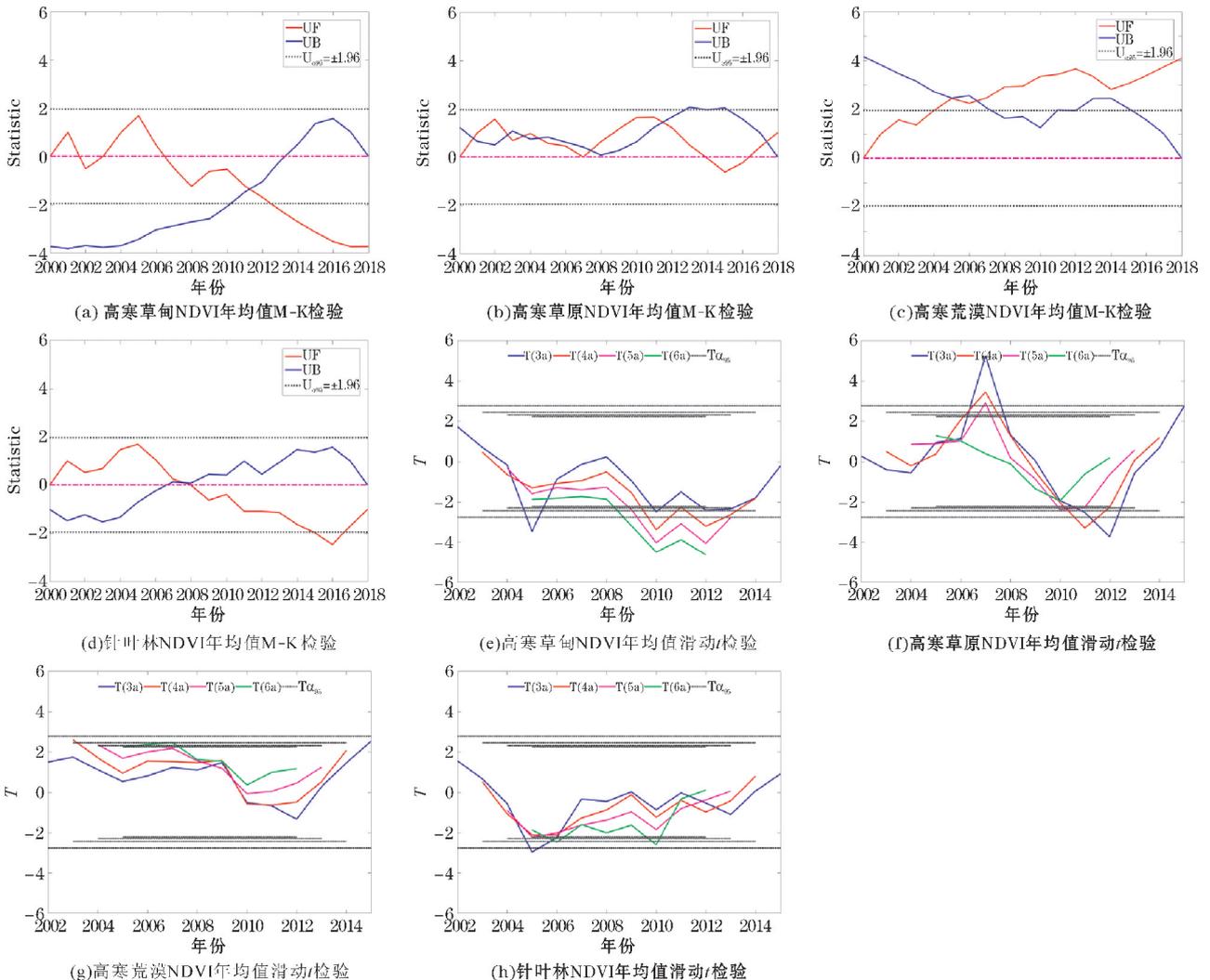


图7 青藏高原不同植被类型NDVI年均值Mann-Kendall检验和滑动t检验统计量曲线

未超过0.05显著性水平线,故其增加趋势并不显著,并且UF曲线和UB曲线存在多个交点;而由滑动 t 检验可以看到,在2007年有一个正的突变点,因此高寒草原的NDVI年均值仅在2007年存在突变。高寒荒漠的M-K检验图中,UF曲线始终为正值,且在2004年即超过了0.05显著性水平线,为显著的增加趋势,但UF和UB曲线的交点在显著性水平临界线以外,故不存在趋势突变;由滑动 t 检验图可知,高寒荒漠NDVI亦不存在均值突变。针叶林的M-K检验图中,UF曲线在2000–2008年为正值,2008年后变为负值,并且在2015–2017年超过了0.05显著性水平线,UF曲线和UB曲线的交点亦在显著性水平临界线以内,所以针叶林NDVI存在减少的趋势突变,且这种减少趋势的突变从2008年开始;而从其滑动 t 检验图中的曲线来看,曲线均未超过其显著性水平线,故针叶林NDVI不存在均值突变。

3.3 青藏高原 NDVI 年际变化线性趋势空间分布

通过一元线性回归和泛克里金插值法,用每个像元19年一元线性回归系数来表征高原植被覆盖的空间变化特征,并采用了NDVI不同时间尺度(包括年均

尺度和生长季尺度)的均值和年最大值进行19年的一元线性回归。从图8中得出,高原植被在年际尺度上大部分呈现增加趋势,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的气象站点百分比,年均值、年最大值和生长季均值分别为64.56%、50.63%和55.70%。从年均值的线性变化趋势(图8a)上看,高原东端的较小区域为显著增加,生态地理分区主要为针叶林(HIIA/B1)和少数高寒草甸(HIB1);显著减少的区域主要分布在HIB1(果洛那曲高原山地高寒灌丛草甸区)、HIIC1(祁连青东高山盆地针叶林、草原区)东部和HIIA/B1(川西藏东高山深谷针叶林区)的绝大部分地区,线性趋势负值的大值区在高原东南端,减少最大可达0.013/a;在高原的南端(HIIC2藏南高山谷地灌丛草原区)、中部(HIC1青南高原宽谷高寒草甸草原区)及北部(HIID1柴达木盆地高寒荒漠区)也存在较显著的线性趋势弱增长区(不超过0.005/a)。线性趋势正值的大值区分布在高原北部的高寒草原和高寒荒漠区域,增加最大可达0.012/a。年最大值和生长季均值的线性趋势空间分布,与年均值的分布基本相似,不同的是高原东端和南端的线性趋势正值区比年均值的要小得多,并且线性趋势负值区比年均值的范围要大。

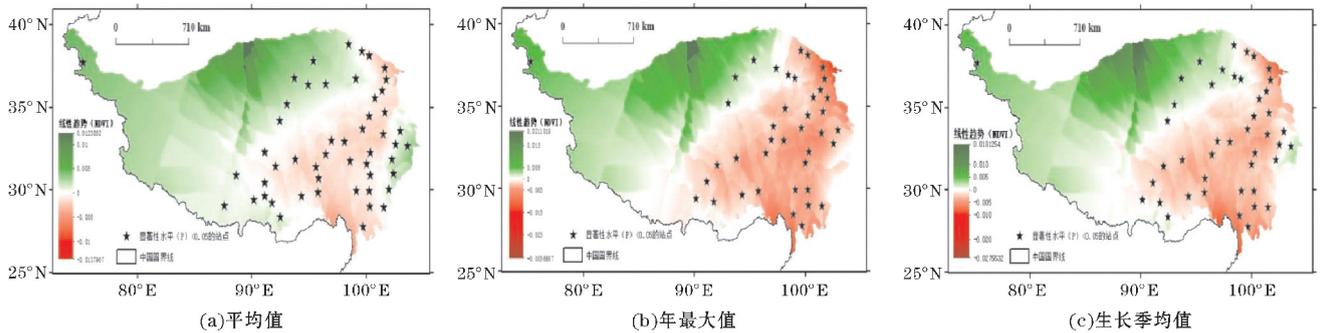


图8 青藏高原 NDVI 年际变化线性趋势及显著性水平空间分布

4 结论与讨论

研究基于生态地理分区,从整体分布、年际变化和线性趋势等方面分析了近年来高原NDVI的变化特征及趋势分布。结论如下:

(1)从空间分布上看,高原的植被呈现东南–西北的梯度特征和带状分布,从东南向西北递减,并且归一化植被指数在生态地理分区上表现出针叶林>高寒草甸>高寒草原>高寒荒漠的地域性特征。NDVI月变化特征上表现为单峰变化趋势,最大值出现在7月,生长率的最大值出现在5月。

(2)高原NDVI年均值、年最大值和生长季均值的年际变化趋势存在明显的生态地理区域性差异。从整体上看,高寒草甸和针叶林近年来呈现减少趋势,而高寒草原和高寒荒漠则明显增加。并且,在2015年前后,不同植被类型均存在NDVI的极小值区,此后至

2018年迅速增加回升。这种突变,及其与气候变化存在的关系,是今后工作的重点。

(3)由M-K检验和滑动 t 检验可知,高寒草甸NDVI年均值近年来的减少趋势是一突变现象,并且是从2011年开始的。高寒草原的UF曲线整体表现为增加趋势但并不显著,且仅在2007年存在均值突变。高寒荒漠整体表现为显著的增加趋势,但不存在趋势突变,亦不存在均值突变。针叶林在2008年存在由增加向减少的趋势突变,但从其滑动 t 检验来看,不存在均值突变。

(4)从年际变化线性趋势的空间分布来看,高原植被大部分呈现增加趋势。并且可以看到,高原植被的生长趋势,从高原东南部针叶林和高寒草甸区域的较差长势,逐渐向西北部高寒草原和高寒荒漠的较好长势发展。

总体而言,植被作为高原生态系统中重要组成部分,植被覆盖变化在一定程度上能够反映高原生态环

境的变化,因此对高原植被覆盖变化的研究对高原生态环境变化规律的探索具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘雅勤,范广洲,周定文,等. 青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系[J]. 气象学报,2007,65(6):959-967.
- [2] 黄荣辉. 大气科学概论[M]. 北京:气象出版社,2005:174-176.
- [3] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979:2-6.
- [4] 李红梅,李林. 2℃全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2015,11(3):157-164.
- [5] R K Kaufmann. The effect of vegetation on surface temperature: A statistical analysis of NDVI and climate data[J]. Geophysical Research Letters,2003,30(22):2147.
- [6] 郑益群,钱永甫,苗曼倩,等. 植被变化对中国区域气候的影响 I:初步模拟结果[J]. 气象学报,2002,60(1):1-16.
- [7] 郑益群,钱永甫,苗曼倩,等. 植被变化对中国区域气候的影响 II:机理分析[J]. 气象学报,2002,60(1):17-30.
- [8] 周玉科,刘建文. 基于 MODIS NDVI 和多方法的青藏高原植被物候时空特征分析[J]. 遥感技术与应用,2018,33(3):486-498.
- [9] 孟梦,牛铮,马超,等. 青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应[J]. 水土保持研究,2018,25(3):360-365.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 2000-2015 年青藏高原草地归一化植被指数对降水变化的响应[J]. 应用生态学报,2018,29(1):75-83.
- [13] 黄文洁,曾桐瑶,黄晓东. 青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征[J]. 草业科学,2019,36(4):1032-1043.
- [14] 张懿锂,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.
- [15] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学(C 辑),2003,33(6):554-565.
- [16] 郑度. 中国生态地理区域系统研究[M]. 北京:商务印书馆,2008:270-288.
- [17] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展,1998,13(4):327-333.
- [18] Carl F Schueler, Willian L Barnes. Next-Generation MODIS for Polar Operational Environmental Satellites[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1998,15:430-439.

Study on NDVI Change Characteristics of Qinghai-Tibet Plateau based on Eco-geographical Regionalization

WANG Wanxin, FAN Guangzhou

(College of Atmospheric Sciences Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, CUIT, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to provide a reference of eco-geographical differences for the vegetation change trend of the Qinghai-Tibet Plateau in recent years, based on MODIS MOD13Q1 normalized difference vegetation index data, this paper makes a series of preliminary research of NDVI change characteristics in four ecological vegetation types of the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2018 by using the statistical methods of linear regression, spatial interpolation, Mann-Kendall Test and Moving *t*-Test. The results show that the vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau presents a gradient and zonal distribution decreasing from southeast to northwest. The monthly variation of NDVI shows a single peak trend. The interannual variation trends of the annual mean, annual maximum and growth season mean of NDVI on the Qinghai-Tibet Plateau have obvious differences in different eco-geographic regions. Alpine meadow and coniferous forest show a decreasing trend in recent years, while alpine grassland and alpine desert significantly increase. Alpine meadow shows an abrupt climate change in 2011. There is an abrupt change in the mean value of alpine grassland in 2007. Neither nor the trend mutation and mean mutation are existed in alpine desert. Coniferous forest shows a trend mutation from increasing to decreasing in 2008, but there is no mean mutation in the aspect of Moving *t*-Test. The spatial distribution of the linear trend of the NDVI interannual change on the Qinghai-Tibet Plateau shows an increasing trend, which stands for a gradual improvement from southeast to northwest in terms of growth.

Keywords: meteorology; climate change; Qinghai-Tibet Plateau; eco-geographical zoning; normalized difference vegetation index; change characteristics