

太行山区气候时空变化及其对植被覆盖度的影响

范晨雨, 景海涛, 王 莉, 程 俭, 李新元, 余 汛

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要:近年来气候变化已经严重影响了人类的生存与发展,同时也导致区域植被覆盖度的变化,研究太行山区的气候变化及其对植被覆盖度的影响为该区域气象预测以及生态环境保护提供有力的技术支撑。利用 1973—2018 年太行山区域内 18 个基准气象监测站点的日平均气温和日降水量数据,结合太行山区气温突变点前后 10 a(1986—2005 年)GIMMS NDVI 数据,采用趋势分析法、累积距平分析、Mann-Kendall 突变检验法,基于 ArcGIS 等平台分析了太行山区气温与降水时空变化及其对植被覆盖度的影响。结果表明:近 50 年来,在时间尺度上,太行山区气温上升趋势显著,降水无明显上升趋势。太行山区气温在 1995 年出现突变点。在空间分布上,气温变化受海拔影响较为明显,整体呈现上升趋势。降水总体表现自东北向西南逐渐递减的趋势。结合太行山区气温突变点前后 10 a NDVI 数据分析发现,太行山区 NDVI 总体变化具有明显波动性,气温对植被覆盖水平的变化存在区域差异性,在一定程度上也说明气温突变点对 NDVI 变化几乎不存在明显影响。

关键词:太行山区; 气温; 降水; 时空变化; NDVI; GIS

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0146-07

Spatial-Temporal Change of Climate and Its Relationship with Vegetation Coverage in Taihang Mountainous Areas

FAN Chenyu, JING Haitao, WANG Li, CHENG Jian, LI Xinyuan, YU Xun

(College of Surveying and Geotechnical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: In recent years, climate change has seriously affected the survival and development of human beings, and it also led to changes in regional vegetation coverage. Studying the climate change in Taihang Mountainous Areas and its relationship with vegetation coverage provides a powerful force for meteorological prediction and ecological environmental protection in the region. Based on daily average temperature and daily precipitation data of 18 benchmark meteorological monitoring stations in the Taihang Mountainous Areas from 1973 to 2018, combining with the GIMMS NDVI data of the ten years (1986—2005) before and after the temperature change point, using trend analysis method, the theory of flat analysis, Mann-Kendall mutation test, we analyzed the temporal and spatial variation of temperature and precipitation in Taihang Mountainous Areas and its impact on vegetation coverage. The results showed that in the past 50 years, on the time scale, the temperature rise trend was significant, and the precipitation had no obvious upward trend; temperatures in the Taihang Mountainous Areas showed a sudden change in 1995; in terms of spatial distribution, temperature changes were significantly affected by altitude, and the temperature presented the overall rising trend; The overall performance of precipitation in Taihang Mountainous Areas gradually declined from northeast to southwest. Based on the analysis on NDVI data during ten years before temperature change point and ten years after temperature change point in Taihang Mountainous Areas, it was found that the overall change of NDVI in Taihang Mountainous Areas had obvious volatility, and the effect to temperature to the change of vegetation coverage level had a regional difference, indicating that the temperature change point did not exist significant impact on NDVI to a certain extent.

Keywords: Taihang Mountainous Areas; temperature; precipitation; spatial-temporal changes; NDVI; GIS

收稿日期:2019-05-31

修回日期:2019-08-05

资助项目:河南省科技攻关项目(192102310025);河南省哲学社会科学规划项目(2017BTY007)

第一作者:范晨雨(1996—),女,河南商丘市人,硕士,研究方向为 3S 技术理论与应用。E-mail: fanchenyu_1996@163.com

通信作者:王莉(1981—),女,辽宁营口市人,博士,副教授,主要研究方向为空间数据库。E-mail: wangli29@hpu.edu.cn

近年来全球气候变化已经成为国际高度关注的一个重大问题。自 20 世纪 90 年代以来全球气温高速率加快,在第 4 次评估报告中给出了一系列新的气候变化事实,过去 100 年(1906—2005 年)全球地表平均温度升高 0.74°C ^[1]。降水量作为反映气候特征最重要的指标之一,其变化规律受气候、纬度等多种因子的影响,具有明显的年际和年内变化特征,对经济发展、农业生产及生态建设都有突出的影响^[2]。在植被覆盖空间变化方面,研究表明,气候变暖导致全球部分地区植被覆盖发生显著变化,其中北半球中高纬地区植被活动显著增加^[3]。在全球变化中,植被扮演着陆地生态系统中最重要的角色^[4],而气候变化会改变植被群落的组成、结构,影响到植被的生物量,进而影响到植被覆盖度的状况^[5]。因此,研究区域气候变化与植被的关系已成为全球关注的问题。

目前,国内外学者关于不同区域气候变化与植被的关系的研究已经取得了大量的成果,如王丽霞等^[6]研究了渭河流域 NDVI、气温和降水的时空变化特征及其相关性,结果表明在时间尺度上气温对植被的生长更为显著,在空间尺度上,降水的增加会促进植被的生长;邵雅琪等^[7]对张承地区植被指数与气候因子的关系进行了研究,结果显示同一植被类型的 NDVI 与降水量的相关性最高;丁文荣^[8]研究发现滇中地区年内植被 NDVI 变化由气候因子所控制,而长期变化则受人类活动的制约;陈超男等^[9]分析秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析,发现植被覆盖与温度以正相关为主,与降水正负相关并存,与温度的相关性较降水的相关性高;Liu X 等^[10]研究秦岭—大巴山区植被动态与气候因子的关系,认为植被覆盖度的变化主要归因于降水量的变化。Ya L 等^[11]研究全球 NDVI 趋势的时空格局与气候和人为因素的相关性,指出气温对植被生长的影响随时间逐渐减弱,降水对 NDVI 变化有积极影响。

Hu S 等^[12]利用简单相关分析、偏相关分析和多重相关分析等方法对太行山植被变化的归因进行了分析,结果表明在海拔小于 1 000 m 的低海拔地区,降水增加是植被恢复的主要因素,而在高海拔地区,温度是制约植被恢复的主要因素。杨永辉等^[13]基于野外试验结果以及对 WAVES 模型模拟分析了气候变化对太行山区植被的影响并得出结论,受验植被对降水反映敏感,降水每增加 10%,植被生产力增加 15%左右。以上研究结果已表明太行山区气温、降水与 NDVI 存在相关性,但目前鲜有针对区域气候因子突变点来着重分析植被覆盖的变化。鉴于此,本文利用 1973—2018 年太行山区域内 18 个基准气象监

测站点的日平均气温和日降水量数据,结合太行山气温突变点前后 10 a(1986—2005 年)GIMMS NDVI 数据,采用趋势分析法、累积距平分析、Mann-Kendall 突变检验法等理论,基于 ArcGIS 等平台分析太行山区气温与降水时空变化及其对植被覆盖度的影响,为太行山区气候预测、灾害预警以及植被变化监测提供有力的依据。

1 数据来源

1.1 研究区概况

太行山区是指太行山地及其毗邻区域^[14],总面积约 13.69 万 km^2 。太行山区位于山西省与华北平原之间,北起北京市西山,向南延伸至晋豫两省交界的黄河北岸,西接山西高原,东临华北平原,呈东北—西南走向^[15]。太行山区地势北高南低,地貌类型复杂,地处我国中纬度温带、暖温带,属大陆性气候,年均气温为 10.3°C ,年降水量为 501.8 mm。太行山区是典型的半干旱山地,干旱直接影响山地的生产力及人口承载力,同时这一地区又承担着巨大的人口压力,生态系统极端脆弱,因而气候环境的改变对于这一系统至关重要^[16]。太行山区气象站点分布见图 1^[14]。

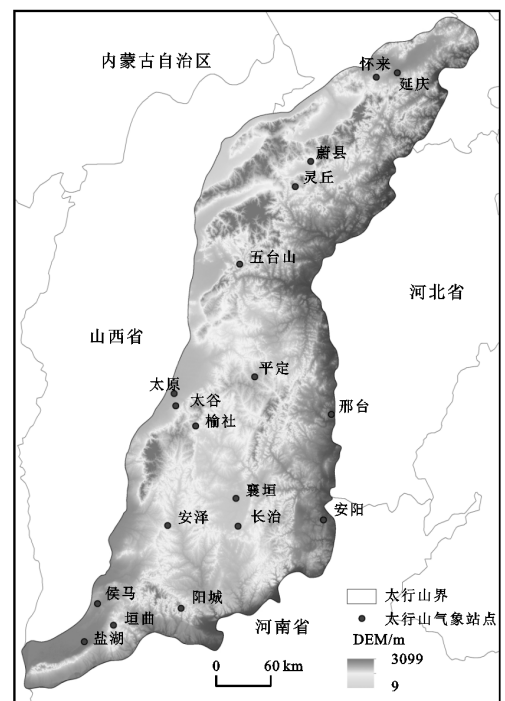


图 1 太行山区气象站点分布

1.2 数据来源与预处理

本文研究数据包括太行山区 DEM 数据、气象站点数据和 GIMMS NDVI 数据。太行山区 DEM 数据源自 ASTER GDEM V2 数据产品,数据类型为 TIFF,空间分辨率为 30 m,下载于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。气象站点数据来

源于中国气象网 (<http://www.cma.gov.cn/>), 选取了研究区域内 18 个基准气象监测站点的日平均气温和日降水量, 时间段为 1973—2018 年。通过 Python 编程从全国所有站点中剥离出研究区域 18 个气象站点日数据, 进而计算出年数据。

归一化差分植被指数 (NDVI) 被广泛应用于植被覆盖监测、土地覆盖分类、作物估产、物候监测、自然灾害监测等众多研究领域^[17]。本文采用的 GIMMS NDVI 数据来源于美国国家航天航空局^[18], 空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为 15 d。最大值合成法可以有效减少大气中气溶胶、云阴影、太阳高度角等因素的影响^[19]。通过最大值合成法对 GIMMS NDVI 数据进行合成得到 NDVI 年数据。反距离加权插值法是气象学上最常用的空间插值方法之一, 以距离反比的幂次方作为权重, 距离较近的点权重较大, 距离较远的点权重较小, 幂次参数控制着权重系数随着距离增加而下降的速度^[20]。为了便于分析, 利用反距离加权插值法将气象站点的气温、降水数据插值为空间分辨率为 8 km 的栅格数据。

2 研究方法

2.1 趋势分析

趋势线是对一组随时间变化的变量进行回归分析, 预测其变化的趋势^[21]。本文利用趋势分析法对 1973—2018 年太行山区气温、降水进行变化趋势分析。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: slope 表示线性变化趋势斜率; x_i 表示第 i 年的气温、降水; 表示 i 年份; 若 $\text{slope} > 0$, 表示气温、降水在研究时段内有上升趋势, 若 $\text{slope} < 0$, 表示气温、降水在研究时段内有下降趋势, 若 $\text{slope} = 0$, 则表示气温、降水在研究时段内无明显变化趋势。

2.2 累积距平分析

在气象分析上, 通常用累积距平曲线来判断数据长期显著的演变趋势以及持续性变化, 基于它也可以诊断出发生突变的大致时间^[22]。对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其某一时刻 t 的累积距平值表示为:

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^i (x_i - \bar{x}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 计算出所有时刻的累积距平值

即可绘制出累积距平曲线进行趋势分析。

2.3 Mann-Kendall 突变检验分析

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并广

泛使用的非参数检验方法, 该方法既可以检测序列的变化趋势, 也可以进行突变点检验, 主要用于气候要素在时间序列趋势中的突变性检测^[23]。其检验原理如下^[24]:

设原始时间序列为 y_1, y_2, \dots, y_n , m_i 表示第 i 个样本, y_i 大于 y_j ($1 \leq j \leq i$) 的累积数, 定义统计量:

$$d_k = \sum_{n=1}^k m_i \quad (3)$$

在原序列随机独立等假定前提下, 统计量 d_k 的均值和方差分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (5)$$

将上面公式的 d_k 标准化后, 得:

$$\text{UF}_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

UF_k 组成一条 UF 曲线, 通过置信度检验可得出序列是否有明显的变化趋势。把此方法引用到反序列中, 计算得到另一条曲线 UB_k , 则两条曲线在置信区间内的交点确定为突变点。在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 统计量 UF_k 和 UB_k 的临界值为 ± 1.96 。若 $\text{UF}_k > 0$, 则表示序列呈上升趋势; 若 $\text{UF}_k < 0$, 则表示序列呈下降趋势; 若统计量 UF_k 和 UB_k 超出临界值, 则表示序列上升或下降趋势明显。

3 结果与分析

3.1 太行山区气温、降水时空变化分析

3.1.1 气温、降水线性变化分析 根据 1973—2018 年太行山区年平均气温变化趋势图分析得出, 近 50 a 来太行山区年平均气温呈现显著上升趋势 ($R^2 \approx 0.6$), 其中最高温度为 11.46°C (2018 年), 最低温度为 8.84°C (1984 年)。并且从图 2 可以看出太行山区年均气温上升速率为 $0.39^\circ\text{C}/10 \text{ a}$, 高于近年来全国平均每 10 a 增温 0.23°C 的上升速率^[25]。这表明了太行山区气温变化与全国甚至全球气候变化趋势一致。

从近 50 a 太行山区域年降水趋势线变化可以看出, 在 1973—2018 年这个研究时间段内, 太行山区域年降水量变化速率为每 10 a 增加 5.06 mm, 总体呈现上升趋势, 最高年降雨量出现在 2003 年为 664 mm, 最低年降雨量出现在 1997 年为 318 mm。从图 3 可知, 其中在 1978—1983 年期间, 年降水量逐渐增多, 上升趋势显著, 在 2004—2015 年期间, 年降水量处于小范围波动上升阶段, 但是上升趋势不太明显。

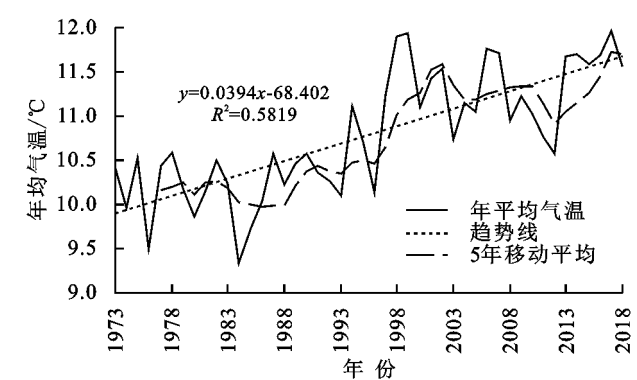


图2 1973—2018年太行山区年均气温变化趋势

3.1.2 气温、降水累积距平分析 由图4可知,太行山区在1973—1995年期间气温距平值以负值为主,只存在一个正距平值,距平均值为 -0.53°C 。在1996—2018年期间气温距平值以正值为主,距平均值为 $+0.53^{\circ}\text{C}$ 。由累积距平曲线可以看出1973—1995年气温累积距平整体呈下降趋势,在1995年处

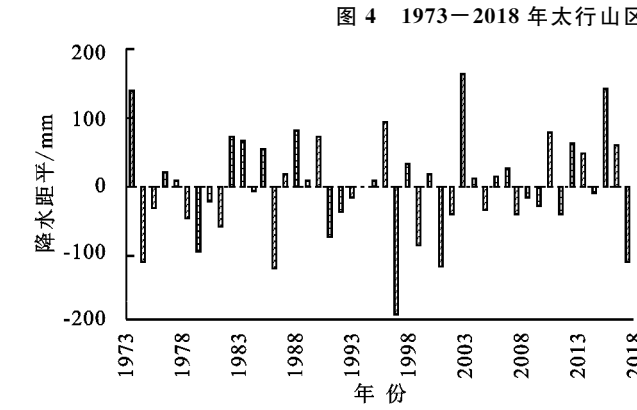
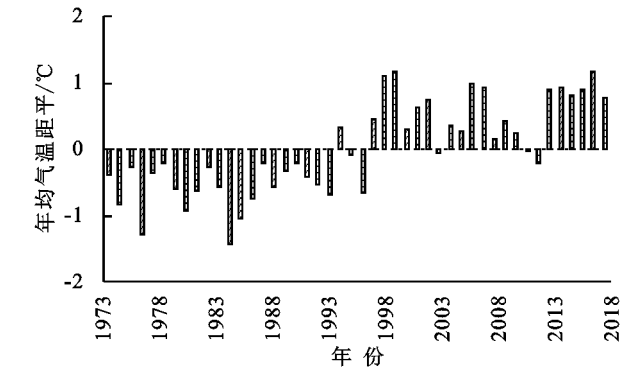


图4 1973—2018年太行山区年均气温距平与累积距平变化曲线

3.1.3 气温、降水 Mann-Kendall 突变检验分析 利用 Mann-Kendall 突变检验法对太行山区域近 50 a 气温和降水量进行突变点分析。由图6气温 Mann-Kendall 突变检验可以看出,在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,UF 曲线与 UB 曲线在第 23 年(1995 年)处有一个交点,并且 UF 曲线在 1995 年之后,UF 值大于零,同时超过临界值 1.96,则表明气温序列数据存在上升趋势且上升趋势显著,即太行山区气温变化在 1995 年有明显的突变特征,与前文累积距平分析结果一致。

发生转折之后,1996—2018 年气温累积距平整体呈上升趋势。从图5可知,太行山区在1973—2018年期间降水量距平值总体波动趋势不一致,分为4个阶段。在1973—1982年、1996—2002年期间,降水量距平值呈现明显下降趋势,在1986—1990年、2003—2017年期间,降水量距平值呈现波动上升趋势。

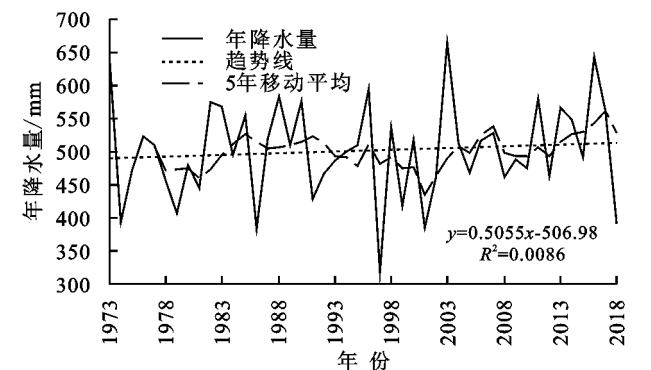


图3 1973—2018年太行山区年降水变化趋势

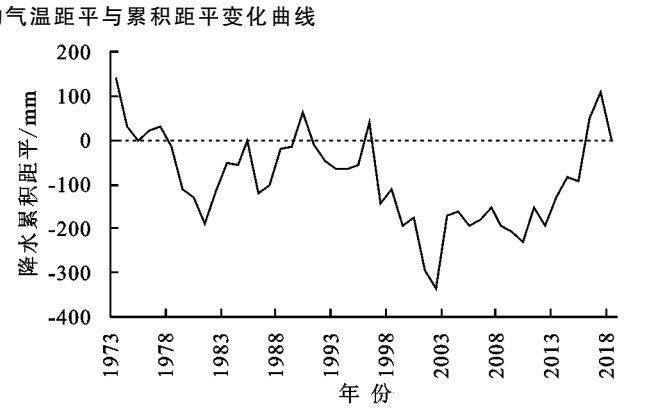
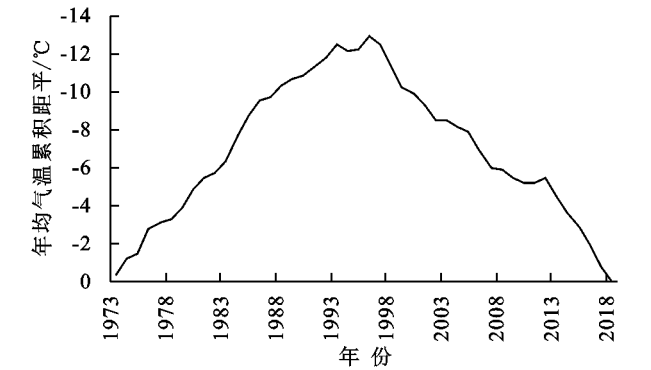


图5 1973—2018年太行山区年降水距平与累积距平变化曲线

根据1973—2018年太行山区降水 Mann-Kendall 突变检验图可以分析出,UF 曲线与 UB 曲线在 46 a 间产生了多处交点,分别出现在第 11 年(1983 年)、第 13~14 年(1985—1986 年)、第 16~17 年(1988—1989 年)、第 18 年(1990 年)、第 31 年(2003 年)以及第 37 年(2009 年),但是由于 UF 曲线在这些交点之后的变化范围都没有超出临界值 ± 1.96 ,则表明降水量序列无明显上升或者下降的趋势,即太行山区域年降水量变化在 1973—2018 年无明显突变特征。

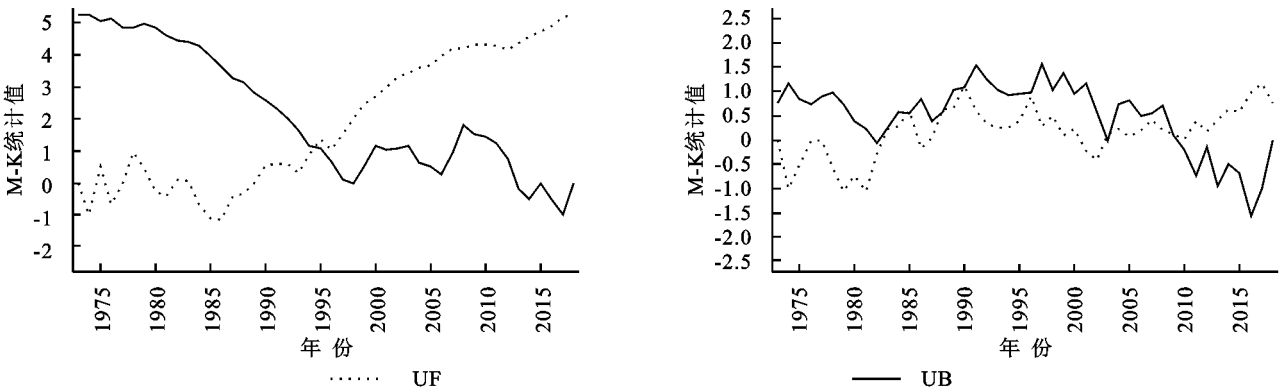


图 6 1973—2018 年太行山区年均气温与年降水 Mann-Kendall 突变检验

3.1.4 气温、降水空间变化分析 太行山区气温与降水倾向率空间分布如图 7 所示。由气温空间分布图可以分析,太行山区气温倾向率空间分布与海拔有关,呈现以海拔最高的五台山站为中心向四周逐渐递减的分布格局,且气温倾向率全部为正值,则表明太行山区气温整体呈现增长趋势。其中五台山站气温倾向率最高达到 1.96℃/10 a,剩余大部分区域气温倾向率都处于

0.11℃/10 a~0.45℃/10 a。太行山区降水倾向率受海拔影响不如气温明显,区域性变化特征相对明显,近 50 a 太行山区降水变化波动较小,波动范围为 -13.01 mm/10 a~17.80 mm/10 a,多数区域降水倾向率为正值,其中有 5 个站点的降水倾向率为负值,分别为处于山西省的灵丘、襄垣、榆社、阳城和盐湖,降水倾向率总体呈现自东北向西南逐渐递减的变化趋势。

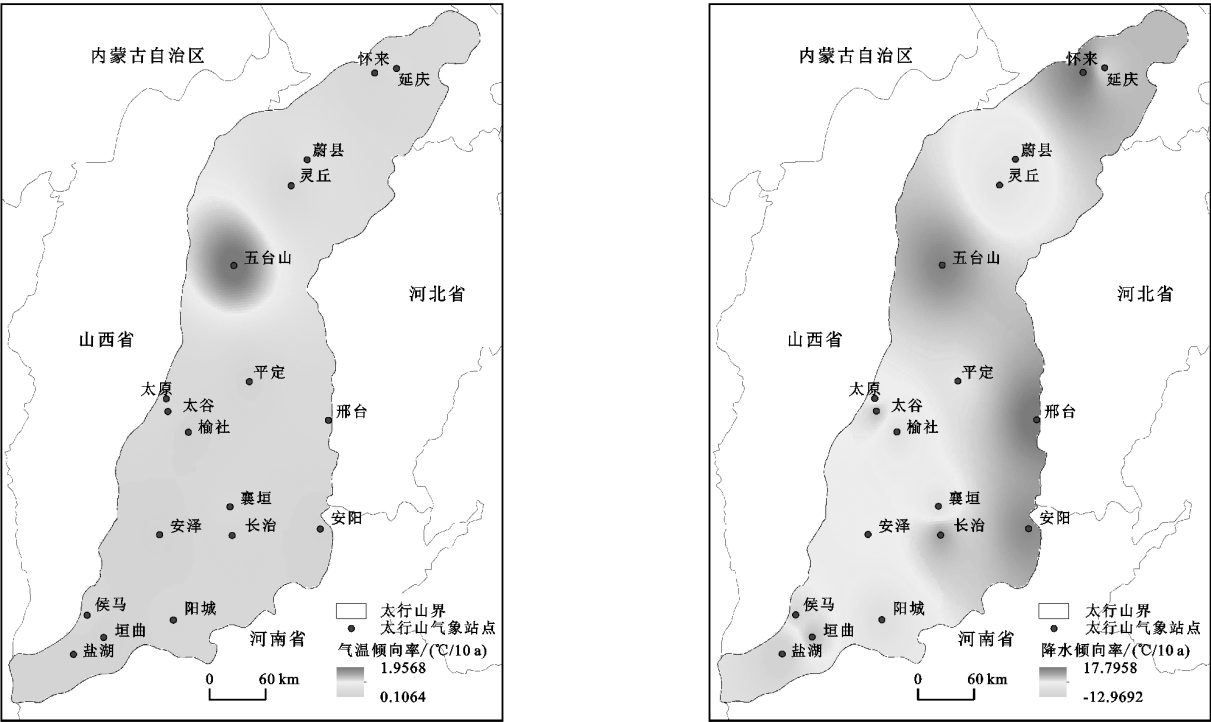


图 7 1973—2018 年太行山区年均气温与年降水空间倾向率分布

3.2 太行山区气温、降水与 NDVI 相关性分析

太行山区气温与 NDVI 的相关系数介于 -0.63~0.75。太行山区气温与 NDVI 的相关性为正相关的区域占太行山区总面积的 57.17%,其中主要表现为不显著正相关($p>0.05$),约占整个研究区的 53.05%,表现为显著正相关($0.01<p<0.05$)的区域约占 2.17%,通过 $p<0.01$ 显著性检验的极显著正相关区域仅占 1.95%。太行山区气温与 NDVI 的相关性为负相关的区域约占 42.83%,其中主要表现为不显著负相关($p>0.05$)约占 39.74%,

显著负相关($0.01<p<0.05$)约占 1.63%,极显著负相关($p<0.01$)约占 1.46%。太行山区降水与 NDVI 的相关系数介于 -0.58~0.72。其中太行山区降水与 NDVI 的相关性总体为正相关,占整个研究区的 79.24%,主要表现为不显著正相关($p>0.05$)、显著正相关($0.01<p<0.05$)和极显著正相关($p<0.01$),分别占 68.02%, 6.74%和 4.48%。太行山区降水与 NDVI 的相关性呈负相关的区域仅占太行山区总面积的 20.76%,其中不显著正相关($p>0.05$)的区域占 17.82%,显著正

相关($0.01 < p < 0.05$)的区域占 1.77%,极显著正相关($p < 0.01$)的区域仅占 1.17%。

总体来看,太行山区气温、降水与 NDVI 均具有相关性,且以正相关性为主。以空间分布来看,降水与 NDVI 的相关性通过 $p < 0.05$ 显著性检验所占比例最高,达到 11.22%,说明太行山区 NDVI 在空间分布上受降水的影响的区域相对更多。但在通过显著性检验的基础上,以相关系数高低来看,气温与 NDVI 的相关性在局部区域相关性相对更高。

3.3 太行山区气温突变前后 NDVI 变化分析

3.3.1 NDVI 线性变化分析 本文利用最大值合成法得到的年均 NDVI 数据代表太行山区植被覆盖度,来分析太行山区气温突变(1995 年)前后 10 a 植被覆盖的变化。图 8 为太行山区 1986—2005 年年均 NDVI 值变化曲线,由图可知,太行山区植被覆盖度逐年增加,但是增速较慢,仅为 $0.4\%/10\text{ a}$,最大值出现在 1990 年,为 0.69,最小值出现在 1993 年,为 0.63。总体来看,太行山区年均 NDVI 值变化具有明显波动性,转折点主要出现在 1990 年、1993 年和 1997 年,然而在 1996 年仅存在小的波动,这说明 NDVI 的变化在一定程度上受气温突变的影响但并不明显。

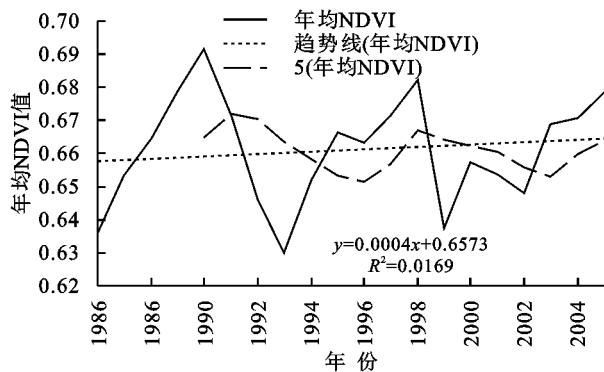


图 8 1986—2005 年太行山区年均 NDVI 值变化趋势

3.3.2 NDVI 空间变化分析 图 9 为太行山区 1986—2005 年的 NDVI 空间变化分布图。从图可知,自 1986—2005 年太行山区 NDVI 值变化范围处于 $-0.21 \sim 0.25$,把变化结果重分类统计出,NDVI 值增加的区域占总面积的 79.99%,NDVI 值减少的区域仅占总面积的 20.01%。整体来说,在太行山区气温突变前后近 20 a 间,植被覆盖水平处于增加趋势。其中太行山区 NDVI 增加最明显的区域主要分布于海拔相对较高的区域,如山西省南部的中条山一带。太行山区 NDVI 减少最明显的区域主要位于靠近县域以及城镇等的人口聚集地,如北京市的昌平区、门头沟区,河北省的易县、满城县,以及山西省的侯马市、曲沃县、闻喜县等。

图 10 为太行山区近 50 a 来气温突变前后 10 a 的 NDVI 值空间变化分布。由图可知,1986—1996

年太行山区 NDVI 值变化范围为 $-0.14 \sim 0.23$,其中 NDVI 值增加的区域占总面积的 76.44%,减少的区域占总面积的 23.56%。1996—2005 年太行山区 NDVI 值变化范围为 $-0.18 \sim 0.20$,其中 NDVI 值增加的区域占总面积的 66.23%,减少的区域占总面积的 33.77%。由统计结果可分析,在这两个研究时间段中,太行山区 NDVI 值变化范围基本无明显变化,但是 NDVI 值增加的区域减少 10.21%,主要位于山西北部的恒山一带,揭示了这部分区域植被覆盖水平对气温的变化相对敏感。

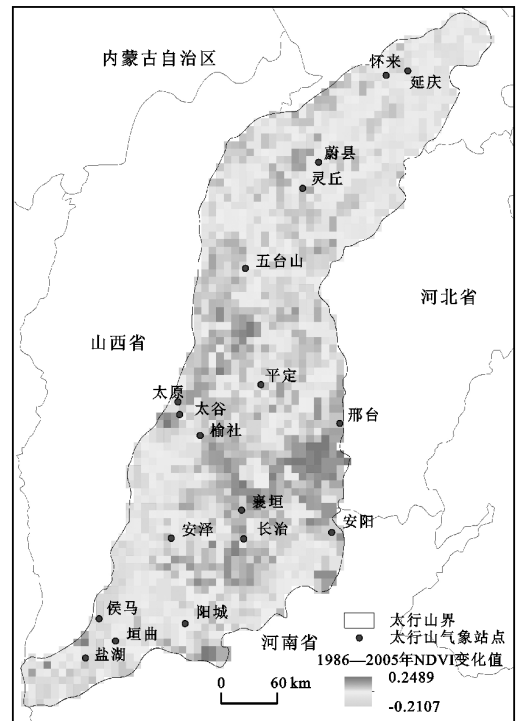


图 9 1986—2005 年太行山区 NDVI 值空间变化分布

4 讨论与结论

自 1973 年以来,太行山区年均气温以 $0.39^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 的速率呈现显著上升趋势,且在突变点之后气温明显上升。太行山区年降水的变化速率为 $+5.06\text{ mm}/10\text{ a}$,在近 50 a 内波动较大,无明显的上升趋势。太行山区气温变化在研究时段内有明显的突变特征,出现在 1995 年。太行山区年降水变化在 1973—2018 年没有明显的突变特征。

从气候倾向率空间分布格局来看,太行山区气温空间变化受海拔影响较为明显,整体呈现上升趋势。太行山区降水量空间变化波动范围小,总体表现自东北向西南逐渐递减的趋势。

通过气温、降水与 NDVI 的相关性分析,气温、降水与 NDVI 均具有相关性,且以正相关性为主。以空间分布来看,太行山区 NDVI 在空间分布上受降水的影响的区域相对较多。通过显著性检验的基

础上,以相关性系数高低来看,气温与 NDVI 的相关性在局部区域相关性相对较高。

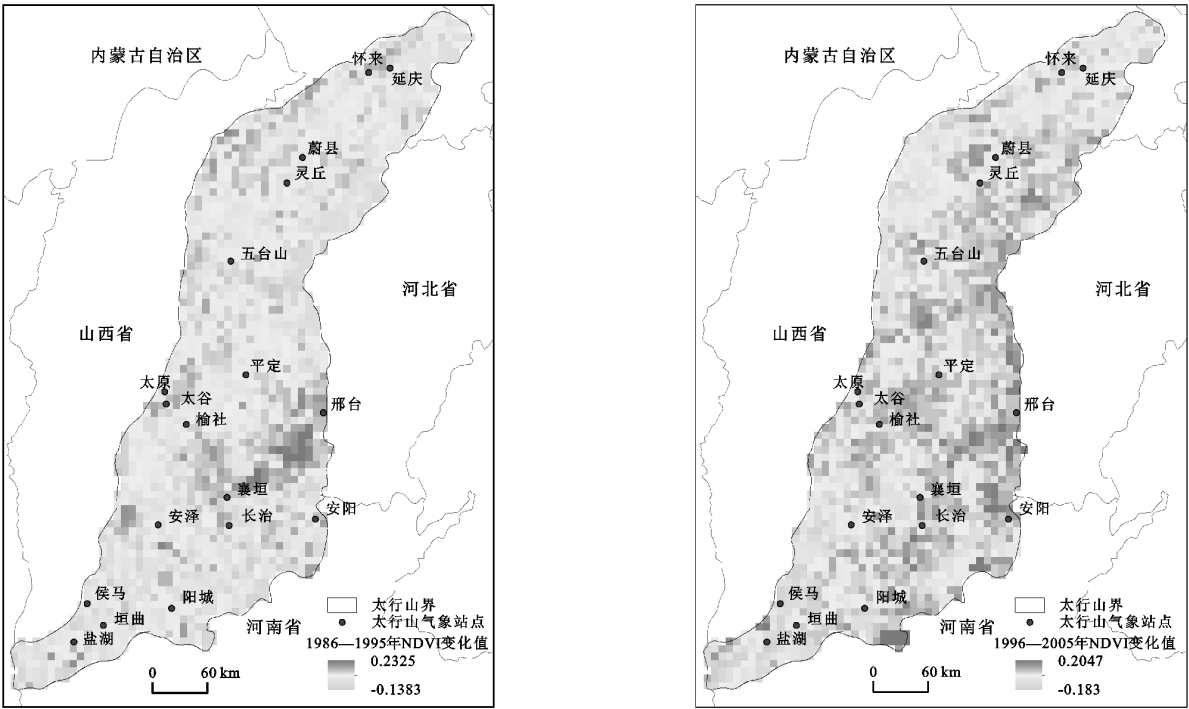


图 10 1986—1995 年与 1996—2005 年太行山区 NDVI 值空间变化分布

以气温突变点为着手点对太行山区 NDVI 变化进行研究,在 1986—2005 年期间太行山区 NDVI 值增加的区域占总面积的 76.44%。通过对比 1986—1995 年与 1996—2005 年太行山区 NDVI 值空间变化发现,NDVI 值增加的区域减少 10.21%,主要位于山西北部的恒山一带。总地来说,就太行山区而言,降水主要起到一定促进作用,气温对植被覆盖水平的变化存在区域差异性,但太行山区 NDVI 总体变化具有明显波动性,在一定程度上也说明气温突变对 NDVI 变化几乎不存在明显影响。

参考文献:

[1] 《中国能源》编辑部.应对气候变化的全球行动[J].中国能源,2007,29(9):1.

[2] 张皓,冯利平.近 50 年华北地区降水量时空变化特征研究[J].自然资源学报,2010,25(2):271-279.

[3] 白建军,白江涛,王磊.2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J].地理科学,2014,34(7):882-888.

[4] 袁沫汐,邹玲,林爱文,等.湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(17):5315-5323.

[5] 白文龙,张福平,倪海燕,等.关中地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应研究[J].农业现代化研究,2013,34(1):104-108.

[6] 王丽霞,余东洋,刘招,等.渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究[J].水土保持研究,2019,26(2):249-254.

[7] 邵雅琪,姜群鸥,胡中民,等.张承地区植被指数时空演变特征及其与气候因子的关系[J].中国农业大学学报,2018,23(7):96-106.

[8] 丁文荣.滇中地区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素[J].水土保持通报,2016,36(6):252-257.

[9] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].生态学报,2019,39(9):3257-3266.

[10] Liu X, Zhu X, Pan Y, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(1):45-58.

[11] Ya L, Yan L, Shuangcheng L, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends:Correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10):13233-13250.

[12] Hu S, Wang F Y, Zhan C S, et al. Detecting and attributing vegetation changes in Taihang mountain, China [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(2):337-350.

[13] 杨永辉,渡边正孝,王智平,等.气候变化对太行山土壤水分及植被的影响[J].地理学报,2004,59(1):56-63.

[14] 薛朝浪,赵宇鸾,魏小芳,等.基于 CCA 的太行山区土地利用变化驱动机制分析[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):97-107.

[15] 宋安安,王慧敏,郑艳东,等.太行山区耕地整理适宜性评价及障碍因子诊断:以河北省涞源县为例[J].中国农业资源与区划,2017(10):50-58.

(2) 气候变化对苹果生产布局的影响程度有所不同,年平均降水量和年平均气温的变化对苹果种植产生积极的影响,年日照时数的变化对黄土高原南部苹果种植产生消极的影响,对中部和北部的苹果种植产生积极的影响。

气候变化中各个气象因子的变化对黄土高原苹果种植成产布局产生的影响不尽相同,在进行苹果产业布局和规划时应当考虑气候变化的影响,以实现区域苹果产业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] 董子铭,刘天军. 中国苹果生产布局变迁的影响: 结构效应还是竞争效应[J]. 北方园艺, 2016, 40(11): 173-177.
- [3] 刘天军,范英. 中国苹果主产区生产布局变迁及影响因素分析[J]. 农业经济问题, 2012, 33(10): 36-42.
- [4] 屈振江,周广胜. 中国富士苹果种植的气候适宜性研究[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 479-490.
- [5] 魏钦平,张继祥,毛志泉,等. 苹果优质生产的最适气象因子和气候区划[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 713-716.
- [6] 余优森,李光华. 苹果优质气候资源与区域性研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 76-82.
- [7] 白秀广,李小盼. 气候变化对中国苹果主产区生产布局变迁的影响分析[J]. 北方园艺, 2016, 40(1): 204-209.
- [8] 朱琳,李星敏,李艳丽,等. 陕北苹果适宜区基地县北扩的气候论证[J]. 陕西气象, 2009, 22(6): 1-4.
- [9] 张聪颖,畅倩,霍学喜. 中国苹果生产区域变迁分析[J]. 经济地理, 2018, 38(8): 141-151.
- [10] 张山清,普宗朝,李新建,等. 气候变化对新疆苹果种植气候适宜性的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(8): 255-264.
- [11] 白秀广,李纪生,霍学喜. 气候变化与中国苹果主产区空间变迁[J]. 经济地理, 2015, 35(6): 130-137.
- [12] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [13] 吉志红. 气候变化对三门峡苹果生长的影响分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(10): 237-242.
- [14] An X. The influence of climate change on suitability of shaanxi apple growth[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(2): 241-248.
- [15] Fujisawa M, Kobayashi K. Climate change adaptation practices of apple growers in Nagano, Japan[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2011, 16(8): 865-877.
- [16] Grab S, Craparo A. Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the south-western Cape, South Africa: 1973/2009[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017, 151(3): 406-413.
- [17] 魏钦平,程述汉,唐芳,等. 红富士苹果品质与生态气象因子关系的研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 289-292.
- [18] 师静雅,刘跃峰,周晓丽,等. 气象条件对铜川市印台区苹果坐果率的影响分析[J]. 现代农业科技, 2017(10): 205-207.
- [19] Qu Z, Zhou G. Possible impact of climate change on the quality of apples from the major producing areas of China[J]. Atmosphere, 2016, 7(9): 113-130.
- [20] 郑冰婵. 气候变化对中国种植制度影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 308-311.
- [21] 徐臣善,徐爱红. 高温对苹果花粉在花柱内萌发和生长的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(1): 51-55.
- [22] 孙智辉,马远飞,高志斌,等. 洛川苹果花期冻害气候特征及人工防霜可行性探讨[J]. 农学学报, 2015, 5(11): 109-112.
- [23] 范宗珍. 水肥综合调控措施对红富士苹果生长结果的影响[J]. 中国果树, 2015(5): 36-39.

(上接第 152 页)

- [16] 杨永辉,王智平,佐仓保夫,等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 667-671.
- [17] 孟丹,李小娟,宫辉力,等. 京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(8): 1001-1007.
- [18] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An Extended AVHRR 8 km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [19] 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, 372.
- [20] 陈锋,董美莹,冀春晓. 综合分析法在复杂地形气温精细格点化中的应用[J]. 高原气象, 2016(5): 1376-1388.
- [21] 马明国,王建,王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- [22] 王亚迪,权全,薛涛涛,等. 气候变化对黄河源区的水文影响分析[J]. 水资源研究, 2018, 7(2): 135-143.
- [23] 张涵丹,卫伟,薛莲. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 183-189.
- [24] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [25] 范兰,吕昌河,杨彪. 近 15 a 中国气温变化趋势分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(5): 34-38.