

气象要素对华北地区夏季植被覆盖度的影响研究

白慧敏¹ 龚志强² 孙桂全^{1,3} 李莉⁴ 周莉⁵

1. 山西大学复杂系统研究所, 太原 030006
2. 中国气象局国家气候中心开放实验室, 北京 100081
3. 中北大学理学院, 太原 030051
4. 山西大学计算机与信息技术学院, 太原 030006
5. 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 植被覆盖对气候变化极其敏感, 华北区地处我国半干旱-半湿润过渡地区, 气象因子对该地区植被覆盖有重要的影响, 但缺少有效的数理模型定量刻画气象要素对植被的影响。因此, 本文基于华北区 2000-2018 年中分辨率成像光谱仪的植被覆盖数据和主要气象要素数据, 开展了多气象要素影响植被覆盖度的研究, 初步建立了华北夏季植被覆盖度与气象要素的关系。研究表明: (1) 华北存在向暖干转变的趋势, 且夏季植被覆盖度与降水、相对湿度呈正相关, 与气温、日照时数和地温则呈负相关; (2) 影响华北地区植被覆盖度最重要的气象要素是相对湿度, 体现了温度和降水的共同作用。 (3) 基于多元回归法和最小二乘法可以定量描述气象要素变化对植被覆盖度的可能影响。其中, 五变量影响模型对植被覆盖度模拟的相关系数略偏高, 因此, 基于五变量气象要素可以更好的模拟植被覆盖度的变化。研究结果有利于了解气象要素如何影响植被生态系统, 进而为国家生态文明建设提供理论参考依据。

关键词 华北, 植被覆盖度, 气象要素, 影响, 评估模型

文章编号: 2020233A

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20233

Study on the Influence of Meteorological Elements on Summer Vegetation Coverage in North China

BAI Huimin¹, GONG Zhiqiang², SUN Guiquan^{1,3}, LI Li⁴, ZHOU Li⁵

1. Complex Systems Research Center, Shanxi University, Shanxi, Taiyuan 030006
2. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
3. Department of Mathematics, North University of China, Shanxi, Taiyuan 030051

收稿日期 2020-11-24 网络预出版日期

作者简介 白慧敏, 女, 1996 年出生, 硕士, 主要从事气候变化对华北生态影响研究。E-mail: bhm0828@126.com

通讯作者 龚志强, 男, 1981 年出生, 研究员, 主要从事动力-统计预测和区域性低温研究。E-mail: gzc0929@126.com

资助项目 国家重点研发计划 2018YFC1507702 和 2018YFE0109600, 国家自然科学基金项目 41875100、42075057 和 42075029

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2018YFC1507702 and 2018YFE0109600), National Natural Science Foundation of China (Grant 41875100, 42075057 and 42075029)

Abstract Vegetation coverage is extremely sensitive to climate change. North China is located in the semi-arid and semi-humid transitional region of China. Meteorological factors have an important impact on vegetation coverage in this area, but there is a lack of effective mathematical models to quantitatively describe the influences of meteorological elements on vegetation. Therefore, based on the vegetation coverage data of the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and main meteorological element data in North China during 2000 to 2018, we studied the influence of multiple meteorological elements on vegetation coverage, and initially established the relationship between summer vegetation coverage and meteorological elements in North China. Main study conclusions are summarized as: (1) There is a trend towards warm and dry climate conditions in North China, and summer vegetation coverage is positively correlated with precipitation and relative humidity, and negatively correlated with temperature, sunshine hours and ground temperature; (2) The most important meteorological element affecting the vegetation coverage in North China is relative humidity, which reflects the combined effect of temperature and precipitation; (3) Base on the multiple regression method and least square method, it can quantitatively describe the possible impact of changes in meteorological elements on vegetation coverage. Therefore, the five-variable meteorological element can better simulate the change of vegetation coverage. The research results are conducive to understanding how meteorological elements affect the vegetation ecosystem, and then provide a theoretical reference for the construction of national ecological civilization.

Keywords North China, Vegetation Coverage, Meteorological elements, influence, Evaluation model

1 引言

陆地生态系统为人类的生存和发展提供了保障, 植被作为陆地生态系统的重要组成部分, 具有防风护沙、水土保持的作用 (Qu et al., 2015)。众所周知植被要进行三大生理过程: 光合作用是绿色植物吸收水分和 CO_2 , 在可见光和酶催化的条件下释放氧气和有机物的过程; 呼吸作用是植物有机体进行氧化分解释放能量、水和 CO_2 的过程; 蒸腾作用是植物在根部吸收水分, 其中 1% 的水分用于光合作用和其他生理过程, 99% 通过叶片的气孔散发到空气中的过程。太阳辐射中的可见光为光合作用提供能量, 温度在适宜范围内升高可以增加酶的活性, 但过高的温度会使酶失活, 因此温度通过影响酶活性来影响光合速率 (周广胜, 2004; 侯美亭等, 2015; Liu et al., 2019), 叶片气孔的行为与气温、相对湿度、光合有效辐射和风速有关 (黄辉等, 2007; 高春娟等, 2012), 而降水则是植被生长的水分来源 (Nemani et al., 2003; 侯美亭等, 2013; Kong et al., 2017; Chen et al., 2018; Zhao et al., 2018; Li et al., 2020)。因此, 温度、降水、相对湿度、太阳辐射、 CO_2 浓度以及风速等气象要素是影响植被变化的重要因子 (Tian et al., 2015)。

一些学者基于统计分析理论研究了温度、降水和太阳辐射对全球植被的影响, 提出了北半球高纬度地区植被的生长依赖于温度 (Nemani et al., 2003; Xiao and Moody, 2005; Piao et al., 2014), 水资源匮乏地区主要依赖于水分因子 (Kawabata et al., 2001; Nemani et al., 2003; Fensholt et al., 2012), 亚马

逊河流域及东亚和南亚地区依赖于太阳辐射(Nemani et al., 2003; Zhao et al., 2018)。Qu 等(2015)研究了温度和降水对中国植被生长驱动作用,指出中国北部(华北、东北、西北地区东南部和内蒙古)的主要驱动因子为降水,其他区域的主要驱动因子为温度。Zhou 等(2014)通过相关分析研究了中国东北植被与气象要素的关系,提出干旱区植被归一化指数(NDVI)与温度呈负相关,与降水呈正相关,但是湿润区出现了相反的情况。Li 等(2020)研究了温度和降水的变化对受不同大气环流影响的青藏高原东北和西南区域 NDVI 的影响,得出与 Zhou 等(2014)相同的结论。因此,不同地区植被生长的关键影响因素依赖于当地区域的气候特点。

华北是中国的粮食主产区和北方经济最具活力的地区,也是植被覆盖对气象要素较为敏感的区域(周丹等, 2019)。华北地区的常年潜在蒸发量与降水量相差大约 236mm,年潜在蒸发量远大于年降水量,但该区域光照充足有利于植被的光合作用和生长(王长燕等, 2006)。该地区植被类型可以分为草地、森林和农田。森林和草地主要受气候因素的影响,农田受人为因素(如施肥、灌溉)的影响,但气象因素(温度、降水、太阳辐射等)对农田的影响也是不可忽略的(Shi et al., 2013)。华北地区按中国干湿分布划分属于半干旱-半湿润的过渡区(李明星和马柱国, 2012),其中西北部为半干旱区,东南部为湿润区,但是众多研究表明华北地区正向暖干化转变(黄荣辉等, 1999; 王长燕等, 2006; 周丹等, 2019)。鉴于华北地区气象要素经历持续性转变,且干旱区和湿润区的气象要素对植被的影响有很大差异,因此有必要深入细致地研究华北地区的气象要素对其植被的影响。例如,杨思遥等(2018)研究了华北地区植被状况对于干旱指数的响应,指出 2001-2014 年华北地区植被状况都开始变好,植被状况与干旱指数呈正相关,且在夏季最为显著。Duo 等(2016)应用统计方法在季节和年时间尺度上研究了温度降水对华北地区植被的影响,指出草地主要受降水的影响,森林和农田依赖于温度。然而大多数文献只研究了温度和降水对华北地区植被的影响,没有考虑太阳辐射对植被的影响,由于日照时数是表征一个地区接收光照时间长短的重要指标,太阳辐射可以根据 Angstrom-Prescott equation 公式(Prescott, 1940)用日照时数来估算,故可用日照时数来表示太阳辐射(曹芸, 2011)。因此,可以采用气温、降水、相对湿度、日照时数和地温等综合分析多气象要素对华北地区植被变化的影响。

综上所述,以往的研究中缺少将气温、降水、相对湿度、日照和地表温度等多种气象要素综合考虑,大多采用简单统计模型定量描述不同气象要素对植被覆盖度的影响,以及模拟植被覆盖度的时空变化特征。本文拟开展多气象要素影响植被覆盖模型的综合研究。第二部分是数据和方法介绍,第三部分是植被覆盖度和气象要素的基本特征,同时计算相关系数来研究两者的关系,第四部分应用多元线性回归和偏最小二乘回归构建气象要素影响植被覆盖的模型,最后进行小结和讨论。

2 数据与方法

不同文献对于华北地区的定义略有不同,本文根据行政区划以及降水量的分布特点,将山西省、山东省、河北省、天津市、北京市和河南省划入泛华北地区进行研究(杨思遥等, 2018)。

本文所用数据:(1)植被覆盖度(Vegetation Coverage,简称 VC)数据。植被覆盖度又称植被覆盖率,是指某个区域植物垂直投影的面积与该区域的面积之比,类似于植被指数,是评价该区域植被

长势的重要指标，常用于气候、生态、水文等研究领域(阿多等, 2017; 高海东, 2017; Gong et al., 2017)。本文用中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, 简称 MODIS)植被指数(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a3v006/>)的 1 公里月合成产品中的 NDVI 数据, 根据公式(祝聪等, 2019)

$$VC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (1)$$

计算得到, 其中, $NDVI_s$ 表示 2000-2018 年无植被覆盖像元的 NDVI 值, $NDVI_v$ 表示完全被植被覆盖像元的 NDVI 值。应用 ArcGIS 掩膜提取华北地区植被覆盖数据。基于提取的数据, 分别计算了 2000-2018 年华北地区夏季植被覆盖度空间分布值和时间序列值。考虑到本文主要研究夏季(6-8 月)平均植被覆盖度与气象要素的研究, 故将数据分辨率适当降低至 10 公里。(2)气象要素数据。采用国家气象信息中心提供全国 2400 多站的逐日气温(Temperature, 简称 TEM)、降水(Precipitation, 简称 PRE)、相对湿度(Relative Humidity, 简称 RHU)、日照时数(Sunshine Duration, 简称 SSD)和 0cm 地温(Ground Surface Temperature, 简称 GST)数据。资料长度为 2000-2018 年。选取华北地区的站点, 计算气象要素的站点月平均值并应用反距离加权插值法得到 10 公里分辨率的网格数据, 并分别计算时间序列和空间分布的夏季平均值。

本文利用皮尔逊相关系数法对气象要素和植被覆盖度进行相关性分析(Potter and Brooks, 1998; 魏凤英, 2007)。考虑到气象要素对植被生长的影响有一定的滞后性(Chen et al., 2018), 故同时分析了超前一个月、超前两个月和超前一个季的气象要素与植被覆盖度的关系。为了定量描述气象要素对植被覆盖度的影响, 分别应用多元线性回归(Multiple linear regression, 简称 MLR)(魏凤英, 2007)和偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, 简称 PLS)(王惠文, 1999)方法, 构建气象要素影响植被覆盖度的统计模型:

$$VCR(x, t) = b_1 + b_2T + b_3P + b_4R + b_5S + b_6G + \varepsilon \quad (2)$$

其中, VCR 表示夏季植被覆盖度, T 表示气温, P 表示降水, R 表示相对湿度, S 表示日照时数, G 表示 0cm 地温; $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 分别表示各气象要素的拟合参数, ε 表示随机误差项。本文以复相关系数和均方根误差(Root Mean Square Error, 简称 RMSE)来衡量模型对植被覆盖的拟合能力。复相关系数检验则采用 F 检验法。我们分别从平均值、线性趋势分析(Jiang et al., 2017)、变异系数(coefficient of variation, 简称 CV)(Zhao et al., 2018)和累积距平(魏凤英, 2007; Duo et al., 2016)等统计量描述华北地区植被覆盖度和气象要素的变化特征, 并分析两者之间的可能联系。其中, 线性趋势斜率值大于 0 且通过显著性检验的表示气象要素呈上升趋势或者植被得到改善, 小于 0 且通过显著性检验则表示相反的情况, 未通过检验为随机扰动; 变异系数即标准差与平均值之比, 可来表示植被覆盖度的年际变化的波动幅度; 累积距平可以通过曲线走势判断变量的变化趋势, 以此展现要素是否发生年代际尺度的转折。例如, 累计距平曲线持续上升表示距平增加, 持续下降则表示距平减少, 上升与下降之间的调整则表示存在年代际的转折。本文线性趋势和相关系数显著性是通过相关

系数的临界值表检验的, 查表可得: $\alpha = 0.05$ 时, $r_\alpha = 0.456$; $\alpha = 0.1$ 时, $r_\alpha = 0.389$ 。 F 检验显著性水平的临界值 F_α 可通过查 F 分布表获得, 若 $F > F_\alpha$ 表明通过显著性检验, 若 $F < F_\alpha$ 表明未通过显著性检验。

3 植被覆盖度和气象要素的关系

华北地区 2000-2018 年各月份对应的植被覆盖度平均值的空间分布图(图 1)。可以看出, 10 月到次年 3 月植被覆盖度均较低, 由于这个季节雨水较少, 气温偏低, 不利于植被的生长。4-9 月为植被生长期, 故植被覆盖度相对较高, 最高值出现在 8 月。且四个季节中, 夏季的植被覆盖度最高, 同时杨思遥等(2018)研究表明华北区不同植被类型(例如草原、林地和农田等)对于干旱指数的响应在夏季最为明显, 因此本研究中主要考虑气象要素对夏季植被覆盖度的影响, 并构建两者联系的统计模型。

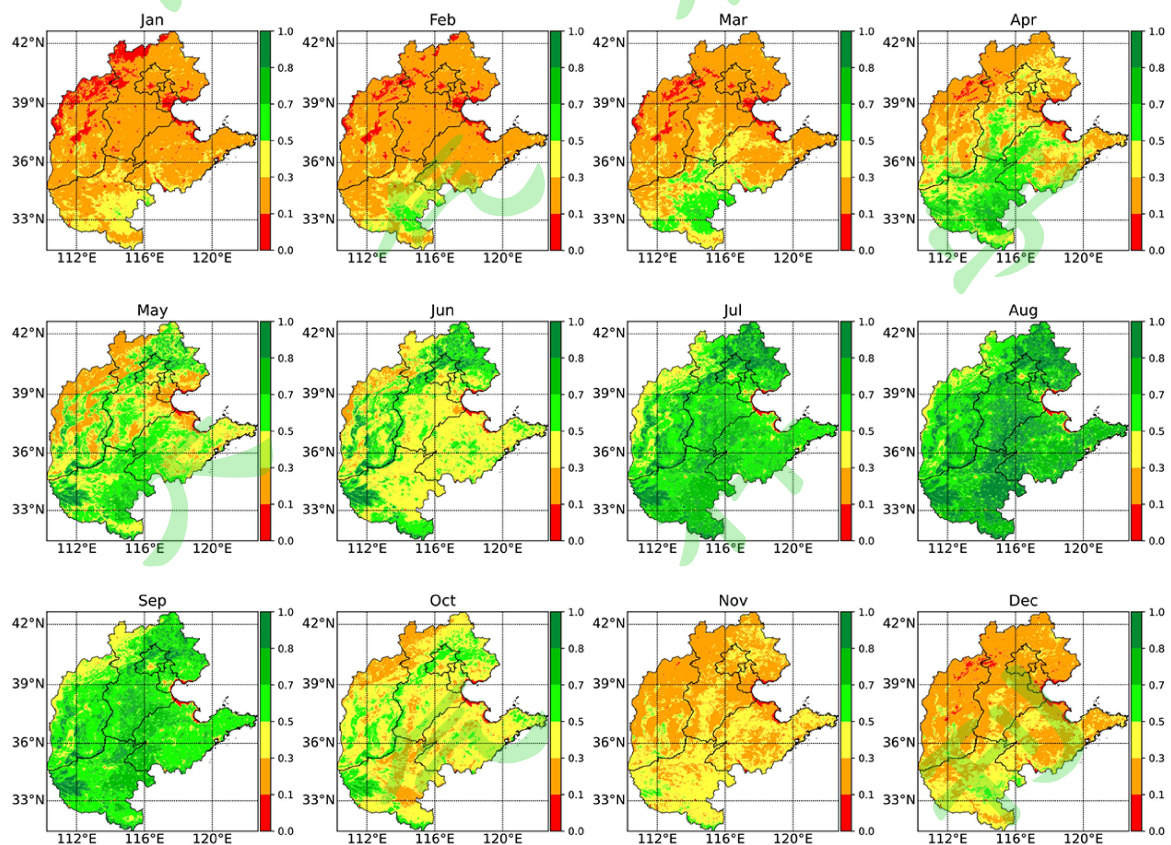


图 1 华北地区 2000-2018 年各月份对应的植被覆盖度平均值的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of average vegetation coverage for each month in North China during 2000 to 2018

3.1 植被覆盖度与气象要素的时空特征

从时间角度来看, 2000-2018 年华北地区植被覆盖度夏季平均值曲线(图 2a1)中, 植被覆盖度平均值呈显著的上升趋势, 且每十年以 5% 的速度增加, 这与 Qu 等(2015)阐述的华北区域植被在 1982-2011 增长模式一致。华北地区植被覆盖的线性增长趋势可能在一定程度得益于 2000 年左右国家提出的植树造林、禁止放牧和退耕还林等政策(张茂省和卢娜, 2013)。就年变化曲线和线性拟合而

言, 2000-2018 年华北夏季平均气温在 24°C - 26.5°C 范围内波动, 且每十年以 0.32°C 的速度增加(图 2b1); 夏季累积降水在 242mm-427mm 范围内波动, 且以每十年 0.96mm 的速度减少(图 2c1); 夏季相对湿度在 67%-75% 的范围内波动, 且以每十年 1.47% 的速度下降(图 2d1); 夏季平均日照时数在 5.6h-7.1h 的范围内波动, 且以每十年 0.11h 的速度增加(图 2e1); 夏季地温在 27°C - 30.5°C 范围内波动, 且以每十年 0.6°C 的速度增加(图 2f1)。气温、日照时数和 0cm 地温呈上升趋势、降水和相对湿度呈下降趋势, 表明气温升高和降水量减少, 即华北存在向暖干转变的趋势, 这与黄荣辉(1999)、王长燕(2006)和周丹(2019)的研究结果一致。

植被覆盖度主要受自然因素和人为因素的影响, 即可将植被覆盖度分为随气象要素变化的部分和人为变率影响的趋势部分。已有研究中将线性趋势部分近似看成历史植被覆盖度的累积和非气候因素的影响, 变化部分则主要对应气象因素的影响(Chen et al., 2018), 本文主要研究气象要素对植被覆盖度的影响。为了在一定程度滤除人为因素这种影响, 本文研究中对植被覆盖度做了去除线性趋势处理。气象要素年变化曲线中虽然线性趋势不明显, 但是波动的幅度比较大。考虑到要研究年际变化的影响, 且保持与植被数据处理的一致性, 故对气象要素也做去线性趋势处理(Chen et al., 2018; Li et al., 2020)。2000-2018 年去除线性趋势后的植被覆盖度(Vegetation Coverage Residual, 简称 VCR)、气温、降水、相对湿度、日照时数和地温的距平值(图 2a2-f2), 植被覆盖度的正距平大值为 2004 和 2007 年, 异常负距平小值年为 2000、2001 和 2014 年。其中, 2004 年和 2007 年降水和相对湿度呈正距平, 气温、日照时数和地温呈负距平, 即夏季降水较多, 温度偏低, 适宜植被生长, 有利于植被覆盖度偏高。2001 和 2014 年则对应降水和相对湿度为负距平, 降水偏少造成华北偏旱, 造成植被覆盖度较低。下文提到的植被覆盖度与气象要素均已去除线性趋势。2000-2018 年夏季植被覆盖度累积距平(Cumulative anomaly)曲线(图 2a3)中, 2000-2006 年植被覆盖小于平均值, 2007-2018 年植被覆盖大于平均值, 同时在 2000-2002 年植被覆盖呈下降趋势, 2002-2013 年植被覆盖呈上升趋势, 即植被覆盖度存在年代际波动特征, 且拐点对应 2000s 初期。气象要素累积距平曲线(图 2b3-f3)所示, 在 2002 年气象要素均发生了转折, 表明植被覆盖度与气象要素波动有很好的对应关系。Hu 等(2018)的研究指出华北地区的降水在 1990s 末期和 2000s 初期发生了显著的年代际调整, 这与本文分析得到的对植被覆盖度有重要影响的降水等在 2000s 初期存在拐点的结论是一致的。

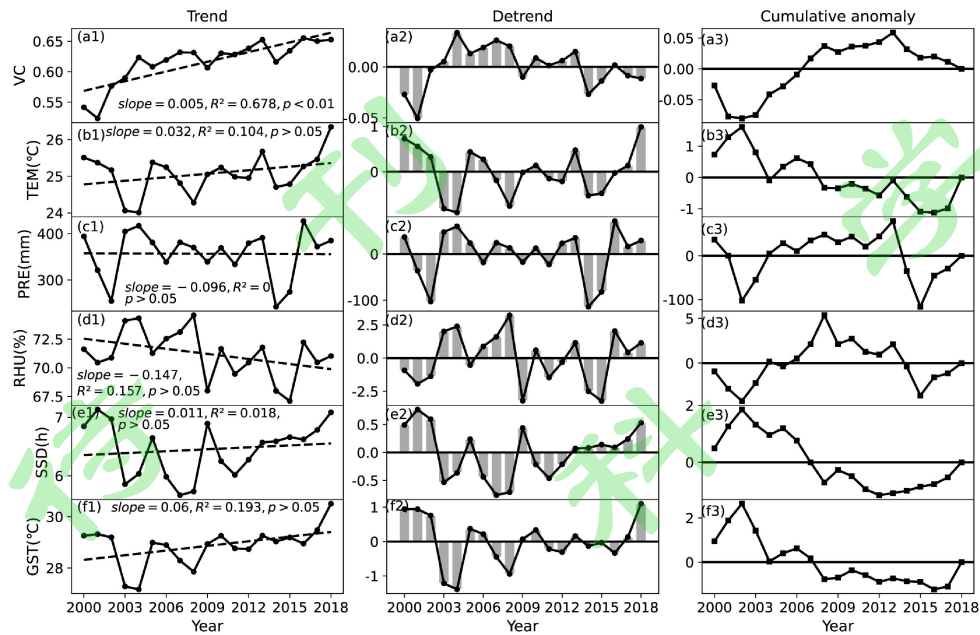


图 2 2000-2018 年华北地区夏季植被覆盖度与气象要素的年变化曲线，a-f 分别对应平均植被覆盖度、平均气温、累积降水、平均相对湿度、平均日照时数和平均地温的时间序列特征，(a1)-(f1)为原始变化曲线，(a2)-(f2)为去线性趋势后的变化曲线，(a3)-(f3)为累积距平曲线。其中 $p < 0.01$ 表示通过 99% 的显著性检验， $p > 0.05$ 表示未通过 95% 的显著性检验

Fig. 2 The annual variation curve of summer vegetation coverage and meteorological elements in North China during 2000 to 2018, a-f corresponds to the time series characteristics of VC, TEM, PRE, RHU, SSD, and GST, respectively: (a1)-(f1) are the original changes curve, (a2)-(f2) is the change curve after de-linear trend, (a3)-(f3) is the cumulative anomaly curve. Among them, $p < 0.01$ means pass 99% test, $p > 0.05$ indicates failure of 95% test

从多年平均夏季植被覆盖度的空间分布图来看(图 3a)，植被覆盖度的高值区主要分布在北京市和河北省的北部地区，而低值区则主要分布在西北部的山地，中部和东南方向为农作物区，由于 6 月份为农作物成熟期，作物收割等造成植被覆盖度偏低。2000-2018 年华北地区大部分区域植被覆盖度的线性趋势明显为正值，即该区域的植被覆盖度主要呈增加趋势(图 3b)，但是可以通过显著性检验的区域主要是华北地区的西北部(图 3c)，表明华北地区的植被覆盖度在西北部得到很好的改善，与 Ji 等 (2020) 阐述的中国北方变绿的结论一致。但也存在少部分退化的现象。植被覆盖度变异系数分布(图 3d)，表明华北区的中部和东南部年际变化较稳定，而西北部波动幅度较大。总体来说，植被覆盖度比较低的区域的变异系数较大，即植被覆盖度的变化幅度最大，如山西省等。从气象要素夏季多年平均的空间分布图来看，温度(图 4a)、降水(图 4b)、相对湿度(图 4c)和地温(图 4e)从西北向东南逐渐增加，日照时数(图 4d)从西北向东南逐渐减少。气象要素空间分布与植被覆盖度的特征基本一致，即夏季降水充足，相对湿度较高，温度适宜的区域对应的植被覆盖度较高，反之相反。华北地区夏季平均气温最低为 18.8°C ，最高温度为 28.5°C ，相差 9.7°C ；夏季降水量最低为 206.7mm ，最高为 641.3mm ，相差 434.6mm ；夏季平均相对湿度最低为 55.9% ，最高为 90.1% ，相差 34.2% ；夏

季平均日照时数最低为 5.3h，最高为 8.7h，相差 3.4h；夏季平均地温最低为 23.1℃，最高为 30.7℃，相差 7.6℃。不同区域气象要素相差较大且气象要素对不同区域的植被影响存在差异，因此，需从区域平均和空间分布角度来分析植被覆盖度与气象要素的关系。

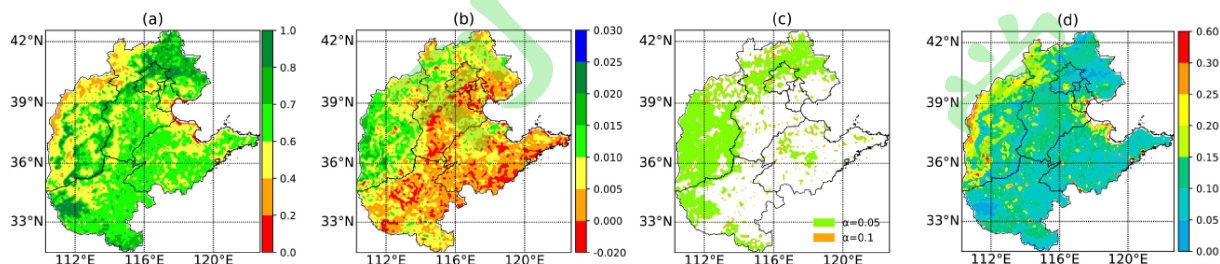


图 3 2000-2018 年华北夏季植被覆盖度平均值(a)，线性趋势系数(b)，线性趋势显著性水平(c)，变异系数(d)的空间分布图

Fig. 3 Vegetation coverage in the summer of North China during 2000 to 2018: (a) Mean value, (b) Linear trend coefficient value, (c) Linear trend significance level, (d) Variation coefficient

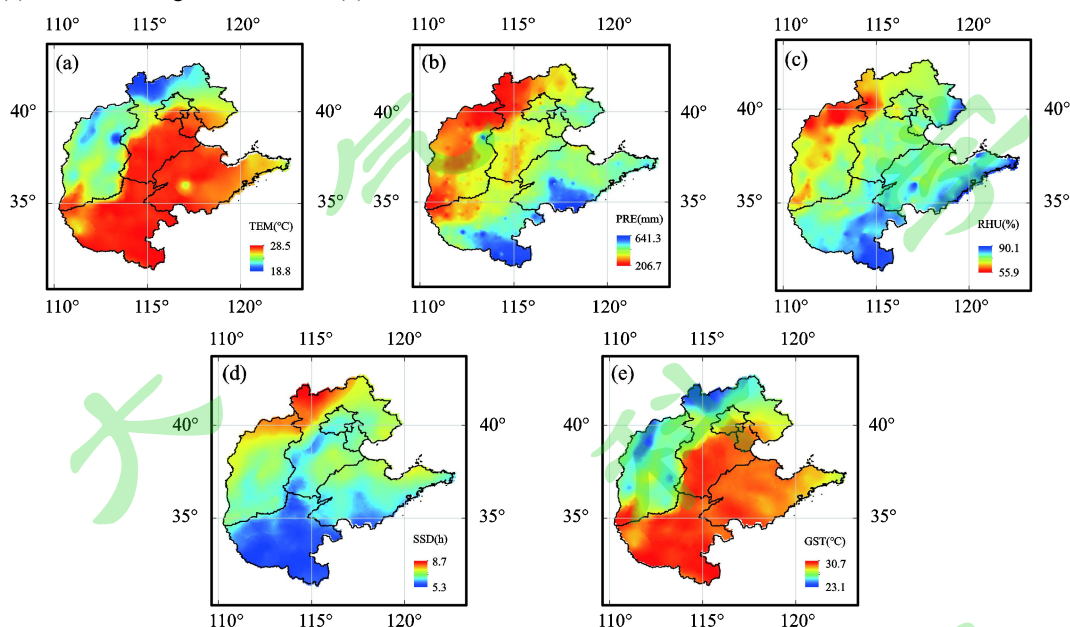


图 4 2000-2018 年华北夏季(a)温度(单位: °C)，(b)降水(单位: mm)，(c)相对湿度(单位: %)，(d)日照时数(单位: h)以及(e)地温(单位: °C)的多年气候态空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of climatology in the summer of North China during 2000 to 2018: (a) TEM (°C), (b) PRE (mm), (c) RHU (%), (d) SSD (h), (e) GST (°C)

3.2 植被覆盖度与气象要素的回归分析

2000-2018 年华北夏季各气象要素序列与植被覆盖度序列的相关系数(表 1)，降水、相对湿度与植被覆盖度呈显著的正相关，而气温、日照时数、地温与植被覆盖度则均呈显著的负相关。同期气象要素对植被覆盖的相关系数由大到小依次为日照时数，相对湿度，地温，降水和气温。考虑到气象要素早于植被的变化，故超前一月气象要素与植被覆盖度的相关性由强到弱依次为日照时数、地温、气温、相对湿度和降水。表 1 中，植被覆盖度与同期的降水、相对湿度和日照时数的相关性较

好，与超前一月的气温和地温的相关性较好，夏季植被覆盖度与超前两个月和超前一个季各气象要素基本不存在显著的相关。因此，在构建气象要素影响植被模型时，我们主要考虑同期日照时数，超前一月地温，同期相对湿度，超前一月气温和同期降水。

夏季(JJA)植被覆盖度与夏季和夏季超前一月(MJJ)各自的温度、降水、相对湿度、日照时数和地温的相关性分布结果(图 5)。其中，降水和相对湿度与植被覆盖度在华北大部分均呈正相关，气温、日照时数和地温与植被覆盖度在华北大部分均呈负相关。这与 Li 等(2020)提出的温度与干旱地区 NDVI 呈负相关的结论一致。五个气象要素回归植被覆盖度的回归方程为 $Y=-0.0047T+0.0001P+0.0028R-0.0127S-0.0062G$ ，从回归系数的正负来看，温度升高不利于植被覆盖度增加，这可能是由于夏季温度过高并超过植被生长的适宜温度，从而导致酶失活，抑制植被生长(周广胜等, 2004)。此外，温度升高使得蒸散量增加(Shen et al., 2015)从而加剧华北地区土壤水分流失，造成区域性干旱，植被需水量不能达到饱和态，不利于植被生长。日照则会影响植物的光合作用，进而影响植物的生长，当光照过剩会抑制植被的生长，从而不利于植被覆盖度增加。

从区域平均的时间序列来看，影响华北地区植被覆盖变化的相关系数比较高的因子是日照时数、地温和相对湿度，但是从空间分布来看，主要是相对湿度。故影响该区域植被生长的重要气象要素是相对湿度。从偏最小二乘回归系数来看，相对较大的是相对湿度，而相对湿度与温度和降水密切相关(孙康慧等, 2019)，即该地区植被覆盖度变化是温度和降水共同作用的结果。但是 Qu 等(2015)提出影响华北地区植被的关键因子是降水，这可能是由于研究时只考虑了温度和降水，未考虑温度和降水共同作用对植被的影响，或者是由于研究的季节差异产生不同的结果。

表 1 2000-2018 年华北夏季各气象要素序列与植被覆盖度序列的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of meteorological element series and vegetation coverage series in the summer of North China during 2000 to 2018

	JJA	MJJ	AMJ	MAM
TEM	-0.39	-0.58*	-0.33	-0.35
PRE	0.47*	0.45	0.26	0.42
RHU	0.68**	0.57*	0.23	0.23
SSD	-0.75***	-0.72***	-0.23	-0.28
GST	-0.61**	-0.68**	-0.40	-0.41

其中*表示通过 95%检验，**表示通过 99%检验，***表示通过 99.9%检验

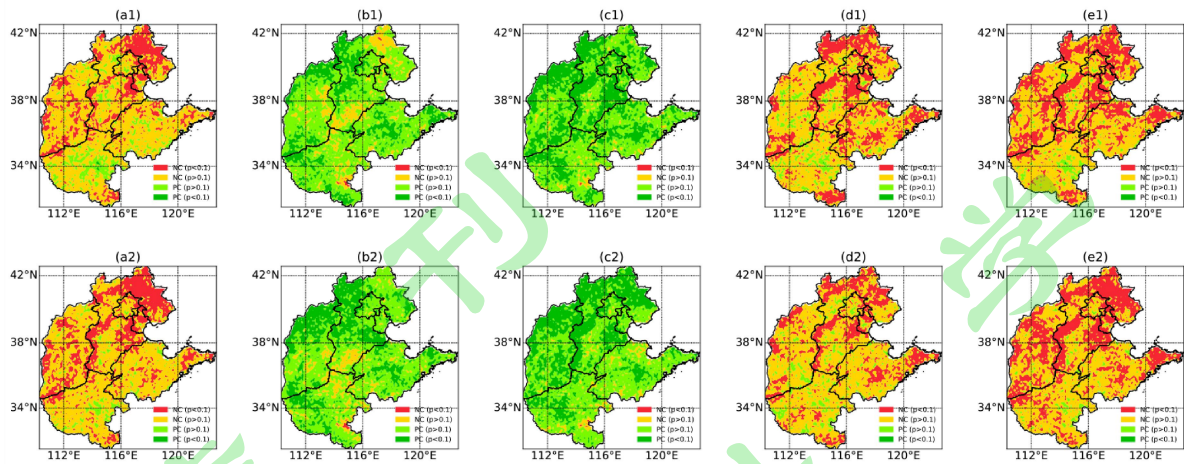


图 5 2000-2018 年华北夏季 (6-8 月) 植被覆盖度与夏季气温、降水、相对湿度、日照时数和地温的相关系数 ((a1)-(e1)), 夏季植被覆盖度与夏季超前一月 (5-7 月) 的气温、降水、相对湿度、日照时数和地温的相关系数 ((a2)-(e2)), 其中 Negative correlation (NC) 表示负相关, Positive correlation (PC) 表示正相关, $p<0.1$ 表示通过 90% 检验, $p>0.1$ 表示未通过 90% 检验

Fig. 5 Correlation coefficient between summer vegetation cover and TEM, PRE, RHU, SSD, GST of JJA ((a1)-(e1)), Correlation coefficient between summer vegetation cover and TEM, PRE, RHU, SSD, GST of MJJ ((a2)-(e2)) in North China during 2000 to 2018. Among them, NC means Negative correlation and PC means Positive correlation, $p<0.1$ means pass 90% test, $p>0.1$ indicates failure of 90% test

4 气象要素影响植被覆盖度模型

4.1 区域平均值的影响模型

结合前面的公式 (2), 采用 2000-2015 年的植被覆盖度与气象要素的观测数据, 按自变量依次递减的原则 (李彦等, 2005), 并应用多元线性回归和偏最小二乘回归的方法拟合确定模型对应的自变量参数值, 我们构建了气象要素影响植被覆盖度的定量化模型。累计有 4 组 26 个模型, 包括 1 个五变量模型、5 个四变量模型、10 个三变量模型和 10 个二变量模型。各模型对应的拟合相关系数、均方根误差和符号一致率 (见表 2)。

从多元线性回归与偏最小二乘回归拟合的相关系数来看, 均通过了 99% 的显著性检验, 符号一致率都保持在 75% 以上。就四组模型的统计量平均值而言, 五变量模型对应的相关系数最大, 均方根误差最小, 其次为四变量、三变量和二变量模型。此外, 偏最小二乘回归方法构建的模型与多元线性回归方法的模型相比, 发现前者的相关系数更大, 均方根误差更小。由于气温和地温, 相对湿度与气温和降水等之间存在一定的相关性 (孙康慧等, 2019), 偏最小二乘方法建模可以去除变量之间的交互线性相关, 有利于模型的模拟结果更好。四组模型中的最优模型 (见表 3), 其中五变量模型对应的拟合相关系数最大, 四变量和三变量模型的相关系数也都在 0.7 以上, 但二变量模型的拟合相关系数低于 0.7, 则效果相对较差, 即在构建气象要素对植被覆盖度影响的统计模型中需要多考虑各种气象要素的影响。故在构建空间分布模型时主要考虑五变量模型。

表 2 气象要素对植被覆盖度影响的定量化模型对应的统计

Table 2 Statistical data of impact model of meteorological elements on vegetation coverage

自变量	多元线性回归			偏最小二乘回归		
	复相关系数	均方根误差	符号一致率(%)	相关系数	均方根误差	符号一致率(%)
五变量模型 T.P.R.S.G	0.76*	0.0133	81	0.85**	0.0116	88
四变量模型 T.P.S.G	0.76*	0.0127	81	0.84**	0.0117	88
T.R.S.G	0.75*	0.0130	81	0.83**	0.0119	88
P.R.S.G	0.73*	0.0136	88	0.85**	0.0114	88
T.P.R.G	0.70*	0.0142	75	0.82**	0.0124	75
T.P.R.S	0.69*	0.0144	94	0.83**	0.0120	88
三变量模型 T.S.G	0.74**	0.0126	81	0.80**	0.0130	94
P.S.G	0.72*	0.0131	88	0.85**	0.0114	88
R.S.G	0.70*	0.0136	88	0.84**	0.0118	88
P.R.G	0.69*	0.0139	75	0.83**	0.0122	75
T.R.G	0.68*	0.0140	75	0.81**	0.0127	81
T.P.G	0.68*	0.0140	75	0.80**	0.0130	75
T.R.S	0.68*	0.0141	88	0.82**	0.0123	88
T.P.S	0.67*	0.0142	94	0.82**	0.0123	94
T.P.R	0.66*	0.0145	81	0.81**	0.0128	81
P.R.S	0.66*	0.0146	94	0.81**	0.0127	94
二变量模型 R.G	0.67**	0.0138	81	0.82**	0.0126	75
P.G	0.66**	0.0139	81	0.81**	0.0127	75
R.S	0.65*	0.0141	94	0.81**	0.0128	94
S.G	0.64*	0.0143	88	0.80**	0.0129	81
P.R	0.62*	0.0148	88	0.75**	0.0146	81
P.S	0.62*	0.0148	94	0.79**	0.0133	94
T.P	0.59*	0.0152	81	0.77**	0.0138	81
T.G	0.59*	0.0152	75	0.77**	0.0138	75
T.R	0.58*	0.0154	81	0.80**	0.0131	81
T.S	0.58*	0.0154	88	0.76**	0.0139	88

其中*表示通过 99%的检验，**表示通过 99.9%的检验

表 3 四组气象要素影响植被模型中的最优模型

Table 3 The best model among the four groups of meteorological factors affecting vegetation models

方法	自变量	模型方程	R	RMSE	符号一致率(%)	
					(2000-2015)	(2016-2018)
MLR	T.P.R.S.G	y=0.0007+0.0383T+0.0001P-0.0002R-0.0197S-0.0365G	0.76*	0.0133	81	100
建模	T.P.S.G	y=0.0008+0.0375T+0.0001P-0.0193S-0.0358G	0.76*	0.0127	81	100
	T.S.G	y=0.0002+0.0500T-0.0235S-0.0431G	0.74**	0.0126	81	100
	R.G	y=0.0019+0.0057R-0.0119G	0.67**	0.0138	81	67
PLS	T.P.R.S.G	Y=-00047T+0.0001P+0.0028R-0.0127S-0.0062G	0.84**	0.0116	88	100

建模	P.R.S.G	$Y=0.0001P+0.0027R-0.0145S-0.0096G$	0.85**	0.0114	88	100
	P.S.G	$Y=0.0001P-0.0165S-0.0126G$	0.85**	0.0114	88	100
	R.G	$Y=0.0057R-0.0119G$	0.82**	0.0126	75	67

其中*表示通过 99%的检验，**表示通过 99.9%的检验

用 2016-2018 年的观测数据，对表 3 中选定的 8 种 VCR 模型对植被覆盖度的模拟能力进行独立样本检验。8 种模型对华北地区植被覆盖度的拟合曲线(图 6)，2000-2015 年历史拟合值而言，8 种模型的模拟值与观测值较接近，能够较好地拟合植被覆盖度的年变化特征，对于 2002 年和 2008 年附近的年代际调整特征也能很好的再现，但在 2003 年、2011 年和 2018 年等极端异常值年份的偏差相对较大。2016-2018 年的独立样本模拟来看，8 个模型均能基于气象要素模拟植被覆盖度的变化特征，即均有一定的模拟能力。

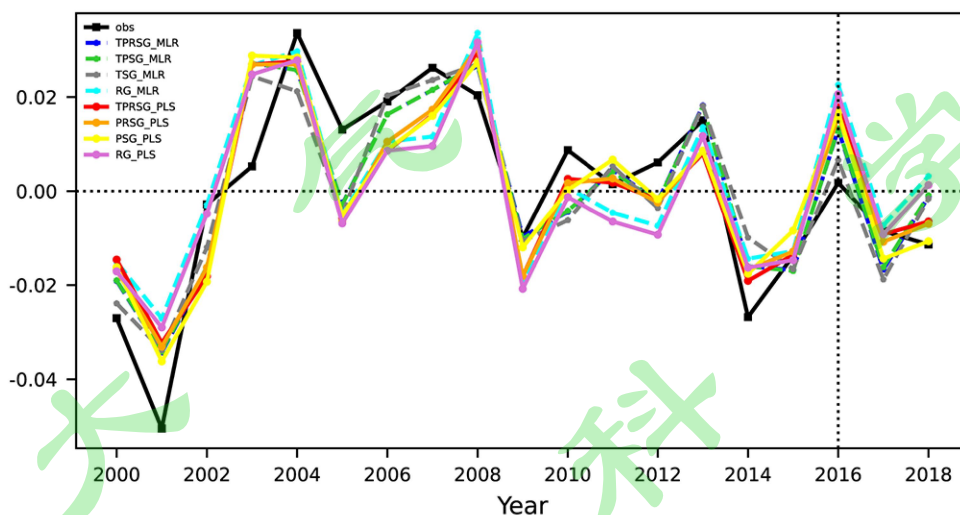


图 6 2000-2018 年华北地区 VCR 的观测值与模型拟合值曲线。其中，2000-2015 年为历史拟合值，2016-2018 年为独立样本模拟值

Fig 6 Curves of observed and 8 models fitting values of VCR in North China during 2000-2018. Among them, 2000-2015 are historical fitted value, and 2016-2018 are independent sample simulated values

4.2 五变量模型模拟植被覆盖度的空间分布

为了与时间序列的超前滞后特征保持一致，选用 2000-2015 年超前一个月的气温和地温和同期的降水、相对湿度和日照时数的观测数据，结合多元线性回归以及偏最小二乘回归方法构建的五变量模型(TPRSG)模拟植被覆盖度的空间分布。TPRSG 模型模拟植被覆盖度的统计量(见表 4)，可以看出，偏最小二乘回归方法建模得到的符号一致率、相关系数均值比多元线性回归方法大，均方根误差均值小，即去除变量之间的共线性相关后，对于模拟效果有一定改进。由于相对湿度回归植被覆盖度大部分可以通过显著性检验，故将相对湿度去除后对于模型的拟合能力有很大的变化。2016-2018 年独立样本检验的实况和模拟值(图 7)，多元线性回归与偏最小二乘回归在 2016-2018 模

拟的植被覆盖度距平值的空间分布与观测值的总体趋势基本一致。多元线性回归和偏最小二乘回归方法对 2000-2015 年模型拟合的符号一致率平均值分别为 68%和 71%，相关系数为 0.46 和 0.61 均通过 95%的显著性检验，2016-2018 年的独立样本模拟距平的符号一致率为 55%和 57%。对比多元线性回归和偏最小二乘回归的模拟结果可以发现，偏最小二乘回归对于距平趋势拟合结果较多元线性回归更好，说明偏最小二乘回归方法建模能更好地再现气象要素对植被覆盖度的影响。因此，结合气象要素构建的植被覆盖度定量化影响模型，可以较好地再现植被覆盖度较往年同期偏高偏低的区域，在实际业务中具有一定的应用价值。

表 4 TPRSg 模型模拟植被覆盖度的统计量

Table 4 The statistics value of TPRSg model simulating vegetation coverage

方法	相关系数	均方根误差	符号一致率(%)				
	2000-2015	2000-2015	2000-2015	2016	2017	2018	2016-2018
MLR 建模	0.46	0.044	68	49	59	56	55
PLS 建模	0.61	0.039	71	51	59	62	57

其中 2000-2015 年为建模拟合值，2016-2018 年为独立样本模拟值

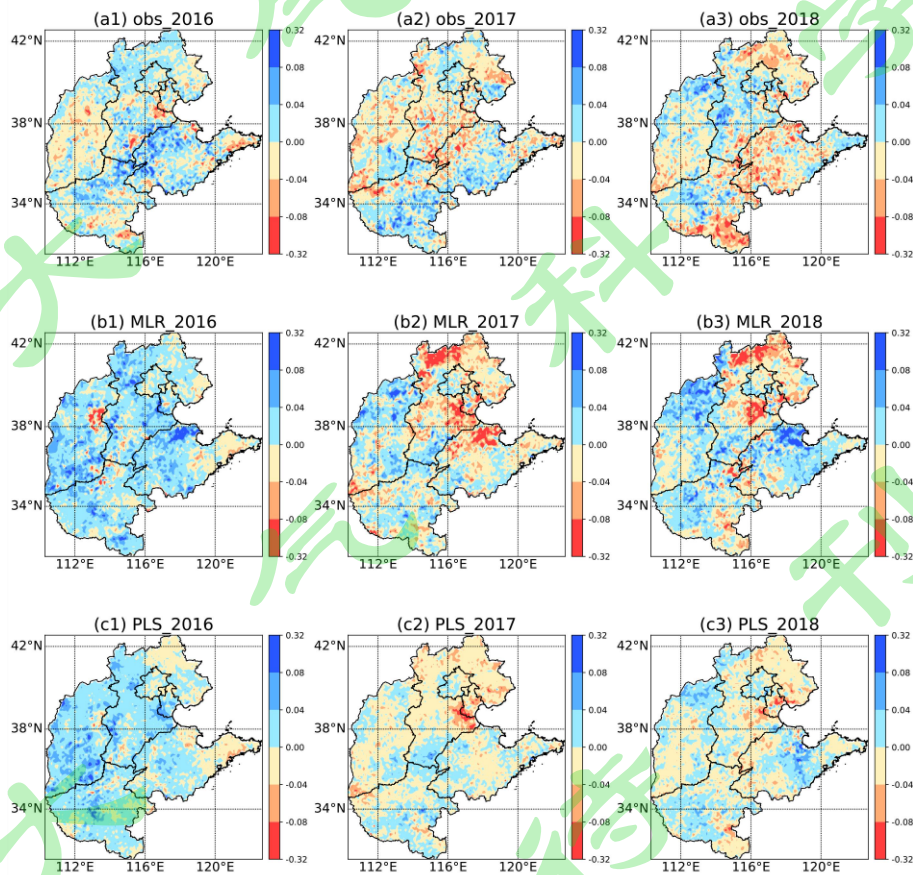


图 7 2016-2018 华北夏季植被覆盖度距平的观测值 ((a1)-(c1))，多元线性回归 (MLR) 方法建模的模拟值 ((a2)-(c2))，偏最小二乘回归 (PLS) 方法建模的模拟值 ((a3)-(c3))

Fig. 7 The observed value of VCR in North China during 2016 to 2018 ((a1)-(c1)), the fitting value of MLR ((a2)-(c2)), PLS ((a3)-(c3))

5 小结与讨论

华北植被对气候变化极其敏感,且缺少有效的模型定量刻画气象要素对植被覆盖度的可能影响,故本文开展了植被覆盖度和气象要素的区域平均以及空间分布的特征分析,结合两者的关系构建了模型,并比较了偏最小二乘回归与多元线性回归方法建模的优缺点,给出了 2016-2018 年的独立样本模拟结果。主要结论如下:

(1)从空间分布来看华北西北部的区域植被得到改善,少部分区域植被在退化。气温、降水、相对湿度和地温从西北向东南逐渐增加,日照时数逐渐减少。从时间序列角度来看,气温、日照时数和地温呈上升趋势,降水和相对湿度呈下降趋势。

(2)气温、日照时数和地温与植被覆盖度呈负相关,降水和相对湿度与植被覆盖度呈正相关,且可通过 95%的显著性检验,相关性强弱顺序依次为同期日照时数、前一月地温、同期相对湿度、前一月气温和同期降水。

(3)通过比较区域平均和空间分布植被覆盖度与气象要素的相关系数以及偏最小二乘的回归系数,表明影响华北地区植被覆盖度变化最重要的气象因子是相对湿度,即温度和降水共同作用对华北地区植被覆盖度的影响较为重要。

(4)使用多元线性回归和偏最小二乘回归方法构建的 8 种模型的拟合值与观测值的变化趋势基本一致,基本可以较好的拟合植被覆盖的年变化特征。空间分布的五变量模型模拟的植被覆盖度距平基本一致,因此可较好的模拟华北不同区域植被覆盖度的距平变化。两种方法拟合效果相差不大,但偏最小二乘回归模拟效果更优。

气象要素与植被之间的非线性关系,没有从植被生长模型的角度开展相关的数值模拟研究,所以得到的线性相关模型研究结论可能存在一定的误差。因此,在下一步工作中需要更为深入考虑气象要素对植被覆盖度影响以及两者之间的非线性关系。

参考文献(References)

- 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 2017. 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, 37(2): 576-592. A Duo, Zhao Wenji, Gong Zhaoning, et al. 2017. Temporal analysis of climate change and its relationship with Vegetation cover on the north china plain from 1981 to 2013 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 37(2): 576-592. doi: 10.5846/stxb201507301600
- 曹芸. 2011. 日照时数 3S 集成模型研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Cao Yun. 2011. 3S Integration Model of Sunshine Duration [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology. doi: 10.7666/d.y1891485
- Chen C, He B, Guo L, et al. 2018. Identifying Critical Climate Periods for Vegetation Growth in the Northern Hemisphere [J]. Journal of Geophysical Research, 123(8): 2541-2552. doi: 10.1029/2018JG004443
- Duo A, Zhao W, Qu X, et al. 2016. Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33 years [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 53: 103-117. doi: 10.1016/j.jag.2016.08.008

- Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, et al. 2012. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007-an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers [J]. *Remote Sensing of Environment*, 121: 144-158. doi: 10.1016/j.rse.2012.01.017
- 高春娟, 夏晓剑, 师恺, 等. 2012. 植物气孔对全球环境变化的响应及其调控防御机制 [J]. *植物生理学报*, 48(1): 19-28.
- Gao Chunjuan, Xia Xiaojian, Shi Kai, et al. 2012. Response of stomata to global climate changes and the underlying regulation mechanism of stress responses [J]. *Plant Physiology Journal (in Chinese)*, 48(1): 19-28. doi: CNKI:SUN:ZWSL.0.2012-01-007
- 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 2017. 黄土高原植被恢复潜力研究 [J]. *地理学报*, 72(5): 863-874. Gao Haidong Pang Guowei Li Zhanbin, et al. 2017. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 72(5): 863-874. doi: 10.11821/dlxb201705008
- Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. 2017. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(2): 143-160. doi: 10.1007/s11442-017-1369-5
- 侯美亭, 赵海燕, 王笋, 等. 2013. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 18(3): 353-364. Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. 2013. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18(3): 353-364. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11137
- 侯美亭, 胡伟, 乔海龙, 等. 2015. 偏最小二乘 (PLS) 回归方法在中国东部植被变化归因研究中的应用 [J]. *自然资源学报*, 30(003): 409-422. Hou Meiting, Hu Wei, Qiao Hailong, et al. 2015. Application of Partial Least Squares (PLS) Regression Method in Attribution of Vegetation Change in Eastern China [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 30(003): 409-422. doi: 10.11849/zrzyxb.2015.03.005
- Hu P, Wang M H, Yang L, et al. 2018. Water Vapor Transport Related to the Interdecadal Shift of Summer Precipitation over Northern East Asia in the Late 1990s [J]. *Journal of Meteorological Research*. 32(5): 1-13. doi: CNKI:SUN:QXXW.0.2018-05-009
- 黄辉, 于贵瑞, 孙晓敏, 王秋风, 等. 2007. 华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟 [J]. *生态学报*, 27(12): 5209-5221. Huang Hui, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. 2007. The environmental responses and simulation of canopy conductance in a winter wheat field of North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 27(12): 5209-5221. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.12.031
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18(4): 465-476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in china and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18(4): 465-476. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001
- Ji Y H, Zhou G S, Wang S D, et al. 2020. Prominent vegetation greening and its correlation with climatic variables in northern China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192(10). doi: 10.1007/s10661-020-08593-8
- Jiang L, Guli-Jiapaer, Bao A, et al. 2017. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 599-600: 967-980. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.012
- Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y, et al. 2001. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 22(7): 1377-1382. doi: 10.1080/01431160119381
- Kong D, Zhang Q, Singh V P, et al. 2017. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982-2013) [J]. *Global and Planetary Change*, 148: 1-8. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.10.020
- 李明星, 马柱国. 2012. 中国气候干湿变化及气候带边界演变: 以集成土壤湿度为指标 [J]. *科学通报*, 57(Z2): 2742-2756. Li Mingxing, Ma Zhuguo. 2012. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2012, 57(Z2): 2742-2756. doi: 10.1007/s11434-012-5428-0
- 李彦, 陈祖森, 张保, 等. 2005. 参考作物蒸发蒸腾量的多元线性回归模型研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 28(1): 70-72. LI Yan, Chen Zusen, Zhang Bao, et al. 2005. Study on the method of reference crop evapo-transpiration by dependence

- Analysis [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University (in Chinese), 28(1): 70-72. doi: 10.3969/j.issn.1007-8614.2005.01.017
- Li P, Hu Z, Liu Y, et al. 2020. Shift in the trend of browning in Southwestern Tibetan Plateau in the past two decades [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 287: 107950. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.107950
- Liu Z S, Yang W H, Yu X L. 2019. A new predictive model for Plants Photosynthesis Influenced by Major Climatic Conditions [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 291. doi: 10.1088/1755-1315/291/1/012016
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999 [J]. Science, 300(5625): 1560-1563. doi: 10.1126/science.1082750
- Piao S, Nan H, Huntingford C, et al. 2014. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity [J]. Nature Communications, 5(1). doi: 10.1038/ncomms6018
- Potter C S, Brooks V. 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI [J]. International Journal of Remote Sensing, 19(15): 2921-2948. doi: 10.1080/014311698214352
- Prescott, J. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation [J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 64: 114-118.
- Qu B, Zhu W, Jia S, et al. 2015. Spatio-Temporal Changes in Vegetation Activity and Its Driving Factors during the Growing Season in China from 1982 to 2011 [J]. Remote Sensing, 7(10): 13729-13752. doi: 10.3390/rs71013729
- Shen M, Piao S, Jeong S, et al. 2015. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(30): 9299-9304. doi: 10.1073/pnas.1504418112
- Shi W, Tao F, Zhang Z, et al. 2013. A review on statistical models for identifying climate contributions to crop yields [J]. Journal of Geographical Sciences, 23(3): 567-576. doi: 10.1007/s11442-013-1029-3
- 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 2019. 1980~2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 455-468.
- Sun Kangfang, Zeng Xiaodong, Li Fang. 2019. Climate Change Characteristics in Ecological Fragile Zones in China during 1980-2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 455-468.
- Tian H, Lu C, Yang J, et al. 2015. Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: Current status and future directions [J]. Global Biogeochemical Cycles, 29(6): 775-792. doi: 10.1002/2014GB005021
- 王长燕, 赵景波, 李小燕. 2006. 华北地区气候暖干化的农业适应性对策研究 [J]. 干旱区地理, 29(05): 32-38.
- Wang Changyan, Zhao Jingbo, Li Xiaoyan. 2006. Study on agricultural adaptation to warming and drying climate in North China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 29(05): 32-38. doi: 10.3321/j.issn:1000-6060.2006.05.005
- 王惠文. 1999. 偏最小二乘回归方法及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 200-210.
- Wang Huiwen. 1999. Partial Least-Squares Regression-Method and Applications (in Chinese) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 200-210.
- Wang J, Wang K L, Zhang M Y, et al. 2015. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China [J]. Ecological Engineering, 81: 451-461. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.022
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 27-59, 188-194.
- Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Analysis and Prediction Techniques (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 27-59, 188-194.
- Xiao J, Moody A. 2005. Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982-1998 [J]. International Journal of Remote Sensing, 26(11): 2371-2390. doi: 10.1080/01431160500033682
- 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 等. 2018. 华北地区 2001-2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应 [J]. 生态学报, 38(3): 1028-1039.
- Yang Siyao, Meng Dan, Li Xiaojuan, et al. 2018. Multi-scale responses of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in North China in 2001-2014 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 38(3): 1028-1039. doi: 10.5846/stxb201611242398

- Zhao L, Dai A, Dong B, et al. 2018. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982–2013 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249: 198-209. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.11.013
- 张茂省, 卢娜. 2013. 植被生态对气候变化和人类活动的响应——以陕西省榆林能源化工基地为例 [J]. *地质论评*, 59(05): 909-918. Zhang Maosheng, Lu Na. 2013. Responses of vegetation ecology to the climate changes and human activities—a case study at Yu Lin energy & chemical industry base [J]. *Geological review (in Chinese)*, 59(05): 909-918. doi: 10.3969/j.issn.0371-5736.2013.05.012
- Zheng Y, Han J, Huang Y, et al. 2017. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China [J]. *Ecological Indicators*, 92: 18-29. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.06.040
- Zhou C, Shi R, Zhang C, et al. 2014. Spatio-temporal distribution of NDVI and its correlation with climatic factors in Eastern China during 1998-2008 [J]. *Proceedings of SPIE*, 9221. doi: 10.1117/12.2060768
- 周丹, 罗静, 郑玲, 等. 2019. 基于格点数据的华北地区气象干旱特征及成因分析 [J]. *水土保持研究*, 26(04): 195-202. Zhou Dan, Luo Jin, Zheng Lin, et al. 2019. Characteristics and causes of meteorological drought in north china based on grid data [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 26(04): 195-202. doi: CNKI:SUN:STBY.0.2019-04-032
- 周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 等. 2004. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展 [J]. *气象学报*, 62(5): 692-707. Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Bai Liping, et al. 2004. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62(5): 692-707. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.014
- 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 等. 2019. 2006-2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力 [J]. *生态学报*, 39(5): 1583-1594. Zhu Cong, Peng Wenfu, Zhang Lifang, et al. 2019. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 39(5): 1583-1594. doi: 10.5846/stxb201805040993