

1998—2015 年北京市 NDVI 时空变化及其与气候因子的响应关系

谢胜金¹, 刘永和¹, 姚风欣²

(1.河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2.南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023)

摘要:为了研究植被生长与气候因子的响应关系,利用北京市 1998—2015 年的 SPOT-NDVI 数据,采用趋势分析法、偏相关和复相关分析法,并结合北京市的气象数据,在年、季尺度上,分别对 NDVI 的时空变化特征及其与气候变化的关系进行了分析。结果表明:(1) 年尺度上,山区的 NDVI 大于平原区;北京市植被空间变化率整体上呈增长趋势,中心城区周边的平原区植被空间变化率呈下降趋势;从年际变化分析,植被变化与降水的关系较于气温因素更密切。(2) 在季节空间变化尺度上,春季是植被面积区域显著增长的季节;植被的生长在不同季节对水热条件变化的敏感性不同,春、秋季植被生长对于气温的敏感性高于降水;夏季植被的生长对于降水的敏感性更高。(3) 当月的植被生长与提前一个月的降水和提前两个月的气温的变化较为密切。研究结果揭示了气候是影响植被分布的重要因子,了解气候的变化规律对于植被的保护具有重要的指导作用。

关键词:归一化植被指数; 北京地区; 时空变化; 气候变化; 人类活动

中图分类号:Q948.112

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0190-07

Spatial-Temporal Characteristics of NDVI and Its Relationship with Climate Change in Beijing from 1998 to 2015

XIE Shengjin¹, LIU Yonghe¹, YAO Fengxin²

(1.School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2.College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the response relationship between vegetation growth and climate factors, we based on the SPOT-NDVI data of Beijing from 1998 to 2015, using the trend analysis method, partial correlation and complex correlation analysis method, combining with the meteorological data of Beijing, we analyzed the relationship climate change with the temporal and spatial variation characteristics of NDVI at the annual and seasonal scales. The results show that: (1) on the annual scale, based on the spatial distribution analysis, the NDVI of the mountainous area is larger than that of the plain area; the spatial change rate of vegetation in Beijing is generally increasing, the spatial change rate of vegetation in the plain area around the central city shows a downward trend; based on the annual variation analysis, the vegetation changes have the closer relationship with precipitation than the temperature factor; (2) on the seasonal scale, the maximum area of spatial significant growth vegetation occurred in spring, the growth of vegetation is different in different seasons; the sensitivity of vegetation growth to temperature is higher than that to precipitation in spring and autumn; the growth of vegetation was more sensitive to precipitation in summer; (3) the vegetation growth of the month is more closely related to the precipitation of previous month and the temperature of previous two months. The results indicated that climate is an important factor affecting the distribution of vegetation, and understanding the law of climate change has an important guiding role for the protection of vegetation.

Keywords: NDVI; Beijing; spatial and temporal variation; climate change; human activity

收稿日期:2019-05-13

修回日期:2019-07-13

资助项目:河南省高等学校重点科研项目计划(19A170007);河南省自然科学基金资助项目(182300410155);国家自然科学基金(41105074)

第一作者:谢胜金(1992—),男,河南南阳人,在读研究生,主要从事地球探测与信息技术方面的研究 E-Mail:shengjinxie@163.com

通信作者:刘永和(1976—),男(满族),内蒙古人,副教授,博士,主要从事流域水文模型与气候变化 E-mail:yonghe_hpu@163.com

植被能够较直观地反映地区的生态环境现状,在陆地生态系统中起到纽带作用,沟通着大气循环圈、水文循环圈以及土壤圈,对于维持生态平衡起到重要的作用^[1-3]。归一化植被指数(NDVI)^[4]用于衡量地表植被的覆盖和植被生长状况的度量参数,能够较精准反映地表植被覆盖度和生长状况及其动态变化过程,在地理学等领域被广泛使用^[5-7]。影响NDVI最主要的因素有两大类:气候因素和人类活动因素^[8-11]。孙艳玲等分别从年、季、月3个时间尺度上分析影响华北平原植被变化的影响因素,在对华北平原1982—2006年植被的时空变化特征的分析中得到基于气候作用的影响下,人类活动对区域NDVI的变化也起到了重要作用^[12]。王永财等分析了海河流域不同的土地类型下植被覆盖度在空间区域上对于气候因子驱动分析^[5]。李军媛等通过对陕西省1982—2006年植被生长变化的分析,结果发现气温上升有利于植被的改善,月降水量小于100 mm时植被生长得到显著改善,大于100 mm无明显的改善^[13]。刘绿柳等通过流域尺度和栅格尺度分别分析黄河流域植被NDVI与气温、降水关系的时空变化^[14]。张清雨等分析了内蒙古近30 a生长期的NDVI与降水显著性相关,与温度的相关性较小^[15]。Zhao等对西北部的内陆干旱地区的植被变化进行分析,NDVI的变化与生长期时的降水量和蒸散发高度相关,与温度无关^[16]。上述的文献都论证气候和人类活动等因子在不同的地理条件下对植被的生长都有一定的响应作用。

北京市城市绿化覆盖率从1998年的35.60%增至2015年的59.0%(2016北京市统计年鉴表),但城市扩张过程势必对植被的分布有强烈的影响。同时,过去几十年,气候变暖导致了我国北方干旱化过程^[17-18],也会影响到北京地区山区的自然植被变化。习近平总书记在十九大报告中提出,必须树立和践行“绿水青山就是金山银山”的理念,而研究北京地区植被变化有助于了解该区域的生态环境状况。有关北京市植被覆盖变化过程,已有一些学者做了部分研究,如胡云峰等研究北京市的绿化建设存在明显的时空差异,空间上中心城区绿化建设成果缓慢,城市边缘和远郊建设成果显著,时间上2005—2010年植被改善明显^[19]。孙晓鹏等通过研究2008年前后北京市的NDVI变化,发现植被显著性变化主要集中在低海拔、小坡度人类活动密集区^[20]。崔娟敏等在1992—2013年分3个时间段对北京市山区的高海拔区和山前平原对比分析植被变化情况,结果表明主要影响因素是人类的活动^[21]。贾宝全等基于北京市TM卫星影像数据的基础上,根据不同区域的植被差值指数,表明北京市的燕山山区北部、五环以内和五

环至六环之间区域植被显著性退化^[1]。

目前,针对北京市植被时空变化的研究较少,在贾宝全对北京市研究一文中提出从植被变化的驱动力来看,不能明确植被变化与气候变化间的直接关联性,仅仅总结人为因素对植被的影响^[1]。孙晓鹏和崔敏娟以及胡云峰等人基于植被空间分布的研究,并没有对影响植被变化的气候因素进行进一步的分析。本研究相对于之前已有的研究,样本时间序列更长,且在年尺度上进一步分析季尺度植被的时空变化及其气候影响因素,能够更加精确掌握在季节尺度上植被变化。目前,针对植被覆盖度变化与气候因子的相关性分析,主要有两种较常用的分析方法,如重心模型^[22-23]和偏相关及复相关分析法^[5],重心模型侧重于轨迹分析而偏相关及复相关侧重于空间分析。本文在植被空间变化分析的基础上进一步通过偏相关及复相关分析影响植被变化的气候因子,补缺北京市植被变化对于气候因子响应的过程。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京地区总面积16 410.54 km²,位于华北平原北部,地势西北高东南低。西部、北部、和东北部三面环山,而北京市西部及北部的山区面积占北京市总面积的62%,东南部主要为平原地区(图1)。受北温带半湿润大陆性气候影响,季节性降水比较明显,降水多集中在夏季。

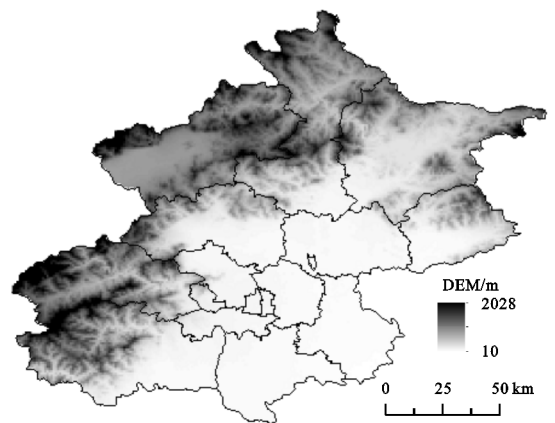


图1 北京市DEM示意图

1.2 数据的来源

遥感数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),所用的NDVI空间分布数据集是基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,采用最大值合成法生成的1998年以来植被指数数据集。空间气温和降水数据同样来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),数据发布的时间序列1998—2015年,气温和

降水的空间数据集是基于中国 2 400 多个气象站点的逐日观测数据,通过空间插值生成;气候要素的插值主要是运用澳大利亚的 ANUSPLIN 插值软件。通过运用 ArcGIS 软件掩膜提取出北京市逐年年平均气温与降水的空间栅格数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 趋势分析 NDVI 趋势分析法是以时间为序列,利用回归斜率分析植被的空间变化特征^[9,11,19,24-26]。本文采用该模型分析 1998—2015 年,北京市的植被指数 NDVI 的变化情况。公式如下:

Slope = \frac{n \sum_{k=1}^n kx_k - \sum_{k=1}^n k \sum_{k=1}^n x_k}{n \sum_{k=1}^n k^2 - (\sum_{k=1}^n k)^2} \tag{1}

式中: n 为研究时段年数;Slope 表示年际变化率; x_k 表示第 k 年的 NDVI 值($k=1,2,3,\cdots,18$); k 表示不同年份数。

1.3.2 偏相关分析 地理要素之间的相关分析是为了揭示要素间相互关系的紧密程度。在多要素系统中,研究某一要素对另一要素的影响程度,可先不考虑其他要素的影响,用偏相关来表示两要素之间的紧密程度,度量偏相关程度的统计量称为偏相关系数^[27]。为了计算偏相关系数,首先需要计算相关系数^[5]。计算公式如下:

r_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}

式中: r_{xy} 为变量 x 和 y 之间的相关系数; n 表示样本个数;

偏相关计算公式如下:

r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \tag{3}

式中: $r_{xy,z}$ 为变量 z 固定后变量 x 和 y 的偏相关系数,即 xy 相关中剔除了 z 的影响;最终还需要对偏相关系数进行显著性检验,一般采用 t 检验法,其统计量公式为:

t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1-r_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \tag{4}

式中: $r_{xy,z}$ 为偏相关系数; n 为样本数; m 为自由度个数。

1.3.3 复相关分析 研究几个要素与某一个要素的相关关系即用复相关分析法。设 x 为因变量, y,z 为自变量,将 x 与 y,z 之间的复相关系数记为 $r_{x,yz}$ 其计算公式为:

r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1-r_{xy}^2)(1-r_{xz,y}^2)} \tag{5}

复相关的显著性检验,采用 F 检验法,其统计量计算公式:

F = \frac{r_{x,yz}^2}{1-r_{x,yz}^2} \times \frac{n-k-1}{k} \tag{6}

式中: $r_{x,yz}$ 为复相关系数; n 为样本数; k 为自变量个数。

2 结果与分析

北京市的地形总体分布为西北高,东南低。北京的西部(太行山余脉)、北部(燕山山脉)以及东北部是高山地区,NDVI 值比较大;东南部主要是平原为主,NDVI 值较低,其中北京市中心城区的 NDVI 值最低(图 2A)。山区植被指数比平原的略高,这与胡云峰的结果一致^[19]。

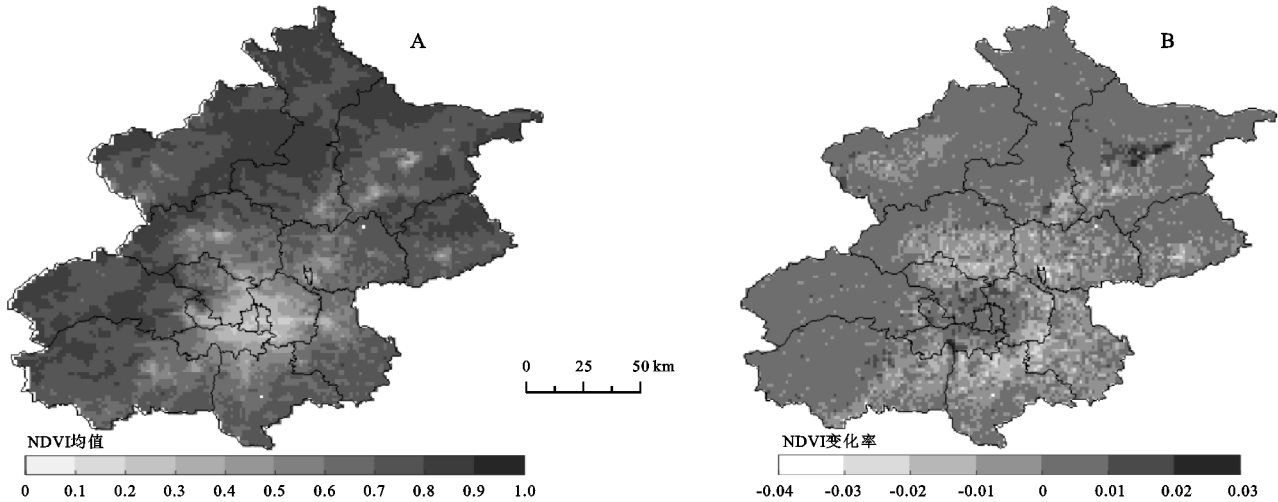


图 2 北京市 1998—2015 年 NDVI 年均值和 NDVI 的变化率

北京市 1998—2015 年植被的空间变化率可以看出,大致分为圈层分布;山区海拔较高植被覆盖相对稳定,植被显著性下降主要分布在海拔较低平原区^[28]。北京市中心城区以及密云水库附近地区的植

被变化率呈显著性上升趋势,中心城区周边的平原区显著性下降趋势,山区地区大部分区域植被呈现轻微增长趋势;相反,山区中延庆县地区有大面积的植被呈现显著性下降趋势(图 2B)。密云水库的植被变化

率显著性上升是由于 2004 年之后采用跨流域调水、节流等方案保护密云水库周围的生态环境^[29-30]。延庆县属于小盆地地形,中部植被显著性下降的区域主要是平原区,平原区交通比较发达,以及人口多造成植被生长受到一定的影响。北京市中心城区的植被显著性上升以及中心城区周边植被显著性下降可以从两个方面来解释,一是从人类活动的因素分析可能是由于北京市中心城区的生态环境治理力度近年来进一步加强,尤其是工业和经济产业向城区周边迁移,给 NDVI 的变化带来显著改善,符合孙晓鸥对北京中心城区周边的研究^[20],企业外迁迅速扩展平原地区发展符合刘涛^[31]等研究的北京市制造业分布的圈层结构演变。空间变化率显著性上升的面积在不断的扩大,反映出近年来北京市环境生态的治理取得一定的成效。另一方面是气候对于北京市中心城区植被具积极地响应关系,下文中进一步分析植被生长

的气候因子驱动力的空间分布。

2.1 年际空间植被变化的气候因子驱动力分析

气候的变化被普遍认为是影响地表植被变化的重要的因素之一。已有的许多研究表明气候因子与植被指数(NDVI)之间相关程度较为紧密。本文通过对北京市近 18 a 的 NDVI 值与年平均气温和降水进行空间相关性分析(图 3),可以看出在北京市仅有 8.82% 的地区植被与气温的显著性相关($p<0.05$),分布在平原区气温与 NDVI 呈正相关以及在山区气温与 NDVI 呈负相关性(如图 3A)。年降水量与 NDVI 的相关关系,15.86% 地区的植被与降水通过显著性检验($p<0.05$)且呈正相关(如图 3B),主要分布在北京城区、密云县与平谷区交界位置、房山区以及大兴区,北京市的西北地区大面积的降水并不显著可能是由于该区域降水较少,没有明显的降水变化趋势响应 NDVI 的植被变化。

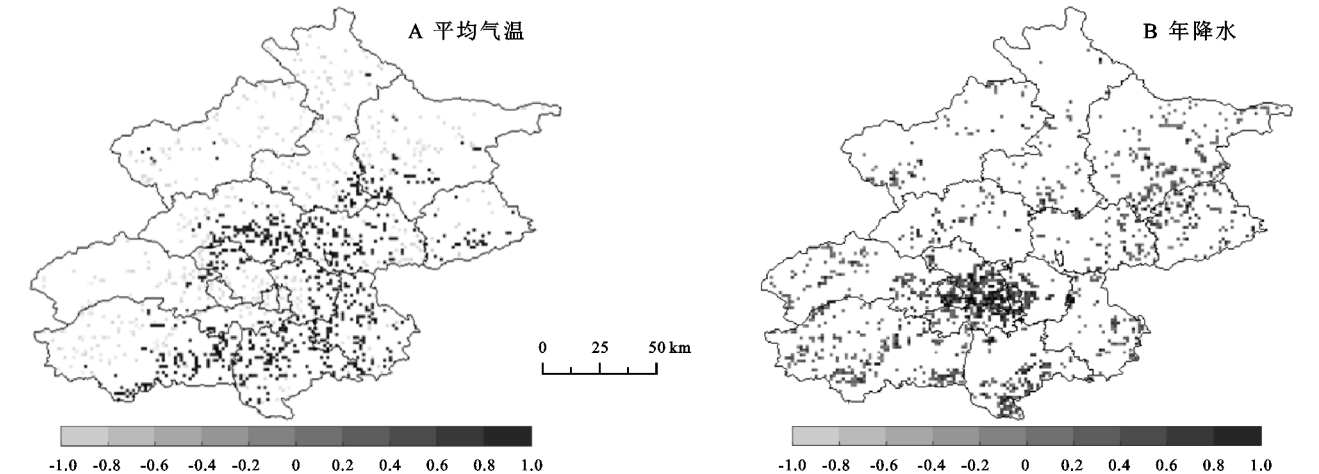


图 3 1998—2015 年北京市年均 NDVI 与平均气温和年降水的相关性

气候是影响植被分布最重要的因子,气候因子往往作用在大的空间尺度的基础上分析植被的变化,而人类的活动对可在短时间内对区域的植被产生直接的干扰。针对区域影响植被的覆盖因素进行分析,采用偏相关和复相关分析法,计算方法参照前文的研究方法,采用的 t 检验和 F 检验均通过 $p<0.05$ 水平的显著性检验,分区准则如表 1 所示^[5]。

表 1 北京市植被覆盖驱动力因子分区准则

NDVI 变化类型	分区准则		
	$r_{nt,p}$	$r_{np,t}$	$R_{nt,p}$
气温驱动	$t \geq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$	
降水驱动	$t \geq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$	
气温和降水驱动	$t \leq t_{0.05}$	$t \leq t_{0.05}$	$F \geq F_{0.05}$

注: $r_{nt,p}$ 代表 NDVI 与气温的偏相关系数; $r_{np,t}$ 代表 NDVI 与降水的偏相关系数; $R_{nt,p}$ 代表气温与降水对 NDVI 的复相关系数。

针对北京市植被覆盖变化驱动因子的分析(图 4),气温驱动因子主要分布于围绕北京市中心城区的平原区域,如:昌平区、顺义区、通州区、大兴区和房山

区等区域,占北京市面积的 8.6%;降水驱动因子主要呈较集中分布于中心城区较为集中,以及山区部分呈小块状分布,占北京市面积的 15.5%;气温和降水的驱动因子共同作用的区域,呈点状分布,主要分布在山区,占北京市面积的 22.2%;图中白色区域是未通过显著性检验区域,说明气温和降水因子不是该区域植被变化的主要驱动力。从气候因子分析,说明北京市城区的植被变化主要是受到降水驱动力,平原区域的植被变化主要是对气温驱动更敏感,山区主要是受气温与降水共同作用驱动的影响。

2.2 北京市植被覆盖年际变化特征与气候要素变化的关系

1998—2015 年北京市地区的逐年 NDVI 总体上呈上升趋势($SLOPE=0.001\ 6$)(图 5A)。北京市地区逐年平均气温和逐年降水量总体上呈上升趋势(图 5B,5C),降水年际上升趋势相比气温的年际上升趋势较明显,有利于植被的生长。北京市城区 NDVI

在 2006—2008 年呈显著增加趋势,2008—2012 年 NDVI 变化趋势下降,2008 年峰值的出现可能是与北京市奥运会的筹备相关,2008 年之后的城市绿化建设有所放缓趋势,这与胡云峰的结论一致^[19]。

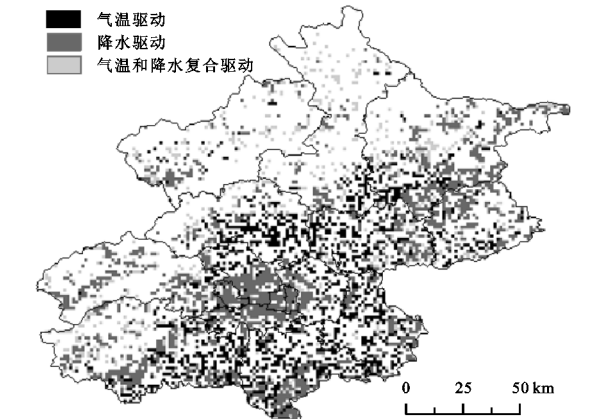


图 4 1998—2015 年北京市植被覆盖变化气候因子驱动力

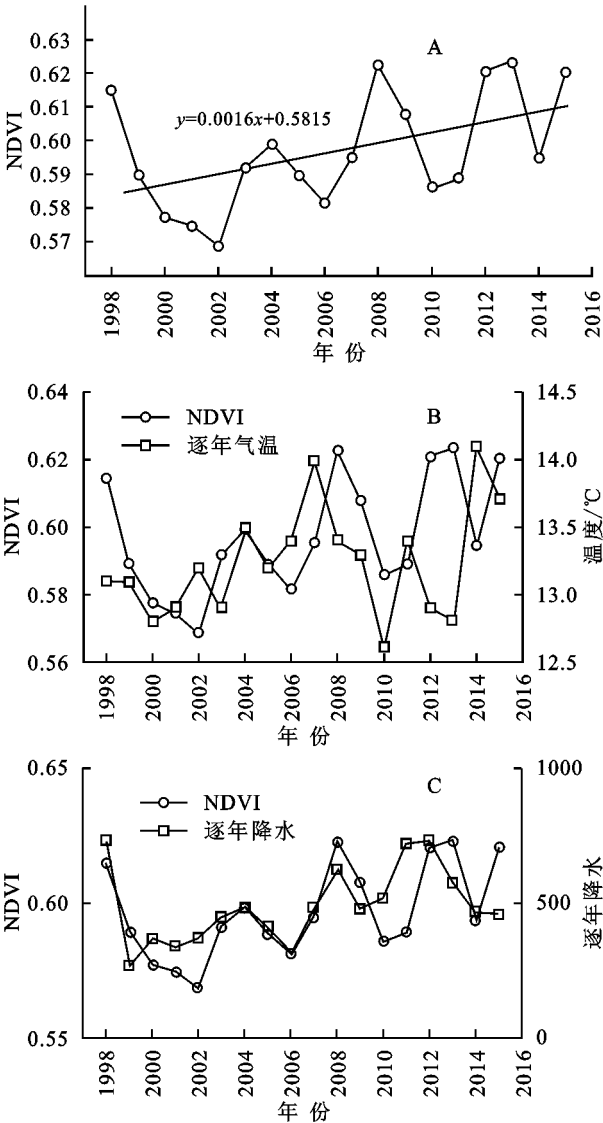


图 5 1998—2015 年北京市逐年 NDVI、年平均气温和年降水量
通过 1998—2015 年对年均 NDVI 值分别与逐年

降水和气温的相关分析可以看出(表 2),北京市的 NDVI 与年降水量的成显著性正相关,与气温的相关性并不显著。这表明了北京市植被的变化与气温相比受降水的响应更显著。气候要素变化在时间上具有分配不均匀的特点,仅从年际变化角度分析植被变化不能充分地说明植被受哪个气候因子的影响更大,因此进一步细化分析季尺度下植被的时空变化与气候因子的关系具有重要的研究价值。

表 2 北京市植被年 NDVI 与年平均降水与气温的相关系数

参数	NDVI 与降水	NDVI 与气温
系数	0.65*	0.11

注: * 为在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

2.3 植被季节变化与气候要素的变化关系

2.3.1 北京市 NDVI 季节空间变化特征 北京市 1998—2015 年不同季节的年均 NDVI 空间分布特征(附图 2A—C)。由于华北平原地区冬季植被处于休眠期,植被变化不明显,仅分析春、夏和秋季植被覆盖的空间分布及变化特征。对比分析揭示了 NDVI 的季节性差异较为明显,NDVI 植被指数夏季生长状况优于秋季,春季的植被生长状况最差。

北京市 1998—2015 年不同季节的 NDVI 空间变化特征如下(附图 2D—F)。春季植被的显著性增长区域主要分布在山区以及中心城区呈散点状;夏季北京市植被显著性增长区域较少,主要分布在中心城区以及密云县密云水库附近;在密云水库的区域秋季植被显著性增长面积大于夏季。综合分析,山区的植被显著性变化最为显著的季节是秋季。3 个季节中显著性减少区域主要分布在北京市中心城区周边,植被覆盖显著性减少区域面积最大的季节是春季占总面积的 7.9%,其次是夏季占总面积的 3.9%。中心城区的植被变化在 3 个季节中都出现散点状显著性增长趋势,最主要的原因可能是由于人类活动因素^[32]。

2.3.2 植被的季节变化和气候因子的季节性 前人针对华北平原年内的 NDVI 做了季节变化趋势的快慢的对比分析。在此基础上,本文研究了北京市 1998—2015 年 NDVI 季节性变化特征(表 3)。1998—2015 年北京市地区春、夏和秋季植被变化呈增加趋势,其中秋季植被增长趋势最为显著,其次是夏季的增长趋势大于春季。夏季的植被变化趋势与全年植被变化趋势相关系数达到 0.97,且显著($p < 0.001$)。当相关系数值越小,即植被季节性变化更为显著。

2.3.3 气候因子的季节变化 根据 1998—2015 年气候因子在不同季节的变化趋势分析(表 4)。从降

水因素分析,北京市近 18 a 来秋季的降水增加趋势最大,达到 1.17 mm/a;夏季和秋季降水变化趋势与全年的降水变化趋势相关系数分别达到 0.87,0.41,且分别通过 $p<0.01$ 和 $p<0.05$ 的显著性检验。从气温因素分析,18 a 来秋季的气温增加趋势最大,达到 0.19 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$,夏季的气温变化趋势与降水趋势相反为-0.08 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。秋季的气温变化趋势与全年的气温变化趋势较为一致,相关系数达到 0.50 且通过 $p<0.01$ 的显著性检验。综上可得出,夏季气温呈下降趋势而降水呈增长趋势,与全年气候的相关性均通过显著性检验,气候干湿趋势显著;秋季气温和降水都呈现增长趋势,与全年的气候因素的相关性较显著,气候暖湿趋势显著。

表 3 北京市 1998—2015 年不同季节年际 NDVI 变化率及季节植被与全年植被相关系数

要素	春	夏	秋
年际变化率	0.0004	0.0014	0.0031
与全年植被变化的 相关系数	0.75**	0.97**	0.66**

注: * 为在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

表 4 北京市 1998—2015 年不同季节气温和降水的变化率和与全年气候因素的相关系数

气候要素	要素	春	夏	秋
气温	变化率	-0.16	-0.08	0.19
	与全年气温的相关系数	0.26	0.33*	0.50**
降水	变化率	-0.27	0.66	1.17
	与全年降水的相关系数	0.29	0.87**	0.41*

注: * 为在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

2.3.4 气候因素对于不同季节植被的影响作用 由于年际气温或降水具有不均一性,仅从年际气候变化来分析植被是受气温或降水的影响较大,不具有代表性,所以进一步分析季节气候变化趋势对于 NDVI 的影响具有较大的意义。各季 NDVI 与气温和降水分别进行相关分析(表 5)可知,不同季节植被对于气候要素的变化的响应不同。从 NDVI 与气温的关系分析,春季和秋季植被的生长与气温的关系较紧密,呈负相关且显著;夏季植被生长与气温相关性较差不

显著。从 NDVI 与年均降水的关系分析,春、夏植被生长与降水都呈现显著性正相关,秋季呈负相关。春季的 NDVI 与气温和降水的都显著相关,说明春季降水的增加或气温的降低有利于植被的生长。整体分析得出,北京市植被的生长在不同季节对水热条件变化的敏感性不同,春、秋季的 NDVI 对于气温的敏感性高于降水;夏季植被的生长对于降水的敏感性高于气温。

表 5 1998—2015 年北京市不同季节植被 NDVI 与气温和降水的相关系数

季节	NDVI 与气温	NDVI 与降水
春季	-0.57**	0.36*
夏季	0.25	0.31*
秋季	-0.33*	-0.06

注: * 为在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

2.4 逐月 NDVI 与气候要素的相关性与时滞性分析

已有研究表明,植被变化对气候因素的响应具有一定的时滞性^[12,33-36],本文采取对北京市(3—11 月)内逐月的 NDVI 与同期以及提前 1—2 月的气候因子的响应进行分析(表 6)。从气温的变化来分析,5 月份的 NDVI 与同期以及提前 1—2 月的气温呈负相关性都较为显著,表明 3—5 月份的气温的上升对 5 月份植被的生长起到阻碍作用;8 月 NDVI 与提前两个月的气温呈正相关最大值,且通过($p<0.01$),表明 6 月份的气温对 8 月份的植被生长起到促进作用。提前两月的气温与 NDVI 相关系数更紧密,且 5 月、8 月、9 月份都通过显著性检验,可以说明提前两个月的气温对当月植被的生长变化关系具有更密切。从降水的变化来分析,同期的降水与 NDVI 的相关性均不显著;当月 NDVI 与提前一个月降水的相关系数分析中,7 月、9 月、10 月均通过($p<0.05$);当月 NDVI 与提前两个月的降水的相关性分析中,仅有 6 月、8 月份显著。当月 NDVI 与同期以及提前 1—2 月的从降水的变化来分析,提前一个月的降水相关系数较大的月份较多,且较显著。总体分析,当月 NDVI 与提前两个月气温以及提前一个月的降水关系更密切,因此植被的生长对于气温和降水的响应均具有一定滞后性。

表 6 北京市植被逐月 NDVI 与气候因子的相关性

项目	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
气温	同期	-0.497**	0.093	-0.485**	-0.229	-0.311	-0.453**	-0.21	-0.291
	前 1 月	-0.447**	-0.260	-0.351*	-0.060	-0.266	-0.352	-0.110	-0.417
	前 2 月	-0.130	-0.150	-0.604**	-0.019	-0.226	0.504**	-0.357*	-0.137
降水	同期	-0.108	0.301	0.235	-0.169	-0.010	0.178	-0.053	0.069
	前 1 月	-0.157	-0.088	0.326	0.271	0.419*	0.059	0.373*	0.448**
	前 2 月	-0.007	-0.155	-0.047	0.372*	0.177	0.439**	-0.036	0.286

注: * 为在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著。

3 结论

(1) 空间上,近 18 a 来北京市植被空间分布呈现山区的 NDVI 大于平原区,中心城区植被指数最低;北京市植被的空间变化率总体上呈上升趋势,说明近 18 a 北京市的植被覆盖得到改善。1998—2015 年北京市中心城区植被的空间变化率显著性上升和围绕中心城区的平原区植被的空间变化率显著性下降,主要是由于工业和经济产业向城区周边迁移以及加大了对中心城区生态环境的治理力度,其次通过气候因子的相关性分析,气候因子对植被生长也具有一定的响应作用。

(2) 时间上,从北京市植被年际变化来看,植被变化对于降水的响应较气温更密切;季节变化上,北京市植被对于气候(水、热)变化的敏感性不同^[12],春、夏季的植被生长对于气温的敏感性高于降水,夏季的植被生长对于降水的敏感性高于气温。月变化上看,NDVI 对于气温和降水的响应均存在一定的滞后性分别为 2 个月份和 1 个月份。

(3) 采用偏相关和复相关分析法分析北京市的气候驱动因子,结果表明中心城区主要受到降水驱动力,中心城区周围的平原区主要受到气温驱动力,山区部分主要是受气温和降水共同作用的复合驱动力;也表明植被的生长状况在不同的地理位置对于气候的敏感性不同。

参考文献:

- [1] 贾宝全.基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析[J].生态学报,2013,33(5):1654-1666.
- [2] 李跃鹏,刘海艳,周维博.陕西省 1982—2015 NDVI 时空分布特征及其与气候因子相关性[J].生态科学,2017,36(6):153-160.
- [3] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [4] Wessels K J, Prince S D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability: A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007,68(2):271-297.
- [5] 王永财,孙艳玲,王中良.1998—2011 年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].资源科学,2014,36(3):594-602.
- [6] 王娟,李宝林,余万里.近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):132-138.
- [7] 郑海亮,房世峰,刘成程,等.青藏高原月 NDVI 时空动态变化及其对气候变化的响应[J].地球信息科学学报,2019,21(2):69-82.
- [8] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其

- 影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [9] 冯敏,孙艳玲,刘斌,等.华北地区植被 NDVI 与不同气候指标的相关分析[J].水土保持通报,2014,34(1):246-251.
- [10] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [11] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):8799-8812.
- [12] 孙艳玲,郭鹏.1982—2006 年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J].生态环境学报,2012,21(1):7-12.
- [13] 李军媛,晏利斌,程志刚.陕西省植被时空演变特征及其对气候变化的响应[J].中国水土保持,2011,29(6):29-32.
- [14] 刘绿柳,肖风劲.黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化[J].生态学杂志,2006,25(5):477-481.
- [15] 张清雨,赵东升,吴绍洪,等.基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究[J].地理科学,2013,33(5):594-601.
- [16] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the north-western China [J]. Journal of Arid Environments, 2011,75(10):946-952.
- [17] 贾艳青,张勃.近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系[J].土壤学报,2019,56(2):1-15.
- [18] 姜江,姜大膀,林一骅.中国干湿区变化与预估[J].大气科学,2017,41(1):43-56.
- [19] 胡云锋,赵冠华,张云芝.北京城市绿化的时空动态分析[J].地球信息科学学报,2018,20(3):332-339.
- [20] 孙晓鹏,王天明,邬建国,等.北京市 2008 年奥运前后植被覆盖变化趋势[J].应用生态学报,2012,23(11):3133-3140.
- [21] 崔娟敏,季文光,李洋宰.基于 NDVI 的山区土地生态环境质量时空变化研究[J].江苏农业科学,2018,46(8):264-267.
- [22] 宋鹏飞,季民,李刚.山东省近 10 年植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J].测绘通报,2018,501(12):117-121.
- [23] 宋鹏飞,季民,刘泽群,等.山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J].测绘科学,2020(3):1-8.
- [24] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(7):1377-1382.
- [25] Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,83(1):287-302.

(3) 1990 年、2000 年、2015 年景观格局脆弱度全局 Moran's I 均大于 0, 表明 3 个时期景观格局脆弱度存在正的相关现象; 研究期内全局 Moran's I 波动中呈上升趋势, 散点大部分位于第一、三象限内, 空间分布上表现为高值—高值、低值—低值的集聚状态。

(4) 在总体空间分布上, 1990—2015 年高低值区域形成明显的空间集聚, 且分布范围由相对集中转变为较为分散; 从具体表现来看, 1990 年高一高值集聚区主要分布在汾河的中段, 低—低值集聚区主要分布在汾河下游入黄口处以及流域的东南部; 2000 年高一高值集聚区向西北、西南、东部进行了转移, 低—低值集聚区主要分布在汾河中下游; 2015 年景观格局脆弱度空间分布范围较为分散, 集群分布发生明显的变化。

参考文献:

[1] 王宪礼, 布仁仓, 胡远满, 等. 辽河三角洲湿地的景观破碎化分析[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 299-304.

[2] 赵宏飞, 何洪鸣, 白春昱, 等. 黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 49-57.

[3] 段翰晨, 王涛, 薛娴, 等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局: 以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 917-928.

[4] 曾光, 高会军, 朱刚. 近 40 年来山西省湿地景观格局变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 103-108.

[5] 李帅, 马文超, 顾艳文, 等. 宁夏黄河流域景观破碎化时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3312-3320.

[6] 付刚, 肖能文, 乔梦萍, 等. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2551-2562.

[7] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.

[8] 简卿, 张立强, 张蓬涛, 等. 基于显隐性分析的青龙满族自治县景观生态风险评价空间分异研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 228-235.

[9] 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 247-257.

[10] 张金茜, 李红瑛, 曹二佳, 等. 多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2897-2906.

[11] 杨海乐, 陈家宽. 流域生态学的发展困境: 来自河流景观的启示[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3084-3095.

[12] 梁二敏, 张军民. 新疆玛纳斯河流域景观格局变化的生态安全分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 170-175.

[13] 陈希, 王克林, 祁向坤, 等. 湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应[J]. 经济地理, 2016, 36(5): 175-181.

[14] 韩振华, 李建东, 殷红, 等. 基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 701-705.

[15] 宁静, 张树文, 王蕾, 等. 农林交错区景观敏感性分析: 以黑龙江省牡丹江地区为例[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 35-38.

[16] 褚艳玲, 宫之光, 杨志振. 21 世纪以来中国航空货运空间变化研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 335-341.

[17] Cliff A D, Ord J K. Spatial Autocorrelation[M]. London: Pion, 1973.

[18] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.

(上接第 196 页)

[26] 李卓, 张继超, 孙然好, 等. 气候和地形对植被覆盖动态演化的影响研究[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 35-43.

[27] 袁兴仁. 评《现代地理学中的数学方法》一书[J]. 地理学与国土研究, 1997(3): 47.

[28] 孙晓鹏, 王天明, 邬建国, 等. 北京市 2008 年奥运前后植被覆盖变化趋势[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3133-3140.

[29] 夏军, 李璐, 严茂超. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(6): 319-323.

[30] 曹荣龙, 李存军, 刘良云, 等. 基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 158-160.

[31] 刘涛, 曹广忠. 北京市制造业分布的圈层结构演变: 第一、二次基本单位普查资料的分析[J]. 地理研究, 2010,

29(4): 716-726.

[32] 胡云锋, 赵冠华, 张云芝. 北京城市绿化的时空动态分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 332-339.

[33] 贾文雄, 陈京华. 1982—2014 年祁连山植被生长季 NDVI 变化及其对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 264-268.

[34] 刘洋, 李诚志, 刘志辉. 1982—2013 年基于 GIMM—NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.

[35] 刘正才, 屈瑶瑶. 基于 SPOT-VGT 数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 80-87.

[36] 李舒婷, 周艺, 王世新, 等. 2001—2015 年内蒙古 NDVI 时空变化及其对降水和气温的响应[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(1): 48-55.