

北京植被时空变化与气候因子相关性

刘泽, 陈建平*

LIU Ze, CHEN Jianping*

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

School of Earth Science and Resources, China university of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要:基于北京市 2000—2015 年 SPOT 遥感影像归一化植被指数(NDVI),结合气温、降水量、日照时长等气候因子,采用一元线性回归分析法、趋势分析法、变异系数法及二阶偏相关系数法,剖析北京 NDVI 时空变化与气候因子的相关性;2000—2015 年间,北京植被覆盖变化总体呈缓慢波动上升趋势;中心城区多为低植被覆盖区,郊区多为高植被覆盖区;NDVI 呈上升趋势的面积占总面积的 73.09%,植被覆盖水平有所提升;多数区域 NDVI 波动较小,波动剧烈区域主要集中于东城区和西城区;由偏相关系数及其显著性可知,降水量对 NDVI 影响最大,气温次之,日照时长影响居后。

关键词:遥感数据;归一化植被指数;时空变化;气候因子;相关性分析;北京市

中图分类号:P627;S718.52⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2159-08

Liu Z, Chen J P. Correlation between temporal-spatial changes of vegetation and climate factors in Beijing. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2159-2166

Abstract: Based on the normalized vegetation index (NDVI) data of SPOT remote sensing images in Beijing from 2000 to 2015, combined with the data of climate factors such as temperature, precipitation and sunshine duration, univariate linear regression analysis, trend analysis, coefficient of variation and second-order partial correlation coefficient were used to analyze the correlation between temporal-spatial changes of NDVI and climate factors in Beijing. The change of vegetation cover in Beijing in the past 16 years showed a slow fluctuation and upward trend. The low vegetation coverage area was mainly distributed in the central urban area, and the high vegetation coverage area was mainly distributed in the outer suburbs. The area with increasing NDVI accounted for 73.09% of the total area, and the vegetation coverage level was improved. In most areas, the fluctuation of NDVI was small, and the areas with severe fluctuation were mainly concentrated in Dongcheng District and Xicheng District. According to the partial correlation coefficient and its significance, it is concluded that precipitation had the greatest impact on NDVI, followed by temperature and sunshine duration.

Key words: remote sensing data; NDVI; temporal and spatial change; climate factors; correlation analysis; Beijing

随着全球气候变化的加剧,气候变化对于生态系统的影响作用已经成为研究的热点问题^[1]。植被作为生态系统中重要的组成部分,对于生态系统的能量交换、水循环、元素循环等具有重要作用^[2-3]。归一化植被指数(NDVI)是反映土地覆盖植被状况的遥感指标,定义为近红外通道与可见光通道反射率之差与之和的商,NDVI 可以反映植被的生长情况,长时间的 NDVI 数据影像已经广泛应用于植被

动态监测及植被大尺度研究^[4-5]。2016 年北京市统计年鉴揭示,2000—2015 年,北京市城市绿化覆盖率由 36.5% 增至 59.0%,表明这期间北京市城市绿化建设取得较好成效。

许多学者通过研究不同尺度下植被覆盖的时空变化情况,发现气候因子是影响植被生长和发育情况的主要因素之一^[6-7]。张清雨等^[8]基于 GIMMS 数据和 MODIS 数据反演 30 年内蒙古生长季 NDVI

收稿日期:2021-10-14;修订日期:2021-10-29

资助项目:科技部深地资源勘查开采专项《深部成矿地质异常定量预测方法与模型》(编号:2017YFC0601502)

作者简介:刘泽(1996-),男,在读硕士生,地质工程专业。E-mail:1401175372@qq.com

*通信作者:陈建平(1959-),男,博士,教授,从事遥感信息提取、三维建模、地质大数据等研究工作。E-mail:3s@cugb.edu.cn

数据,发现 NDVI 与降水量显著相关,与气温的相关性较小。党跃军等^[9]基于 2003—2012 年归一化植被指数及气象数据,根据不同时间尺度分析气候与 NDVI 的相关性,发现月尺度上 NDVI 与气温呈显著相关,年尺度上气候和人类因素对 NDVI 影响不显著。谢胜金等^[10]利用 18 年的 SPOT-NDVI 数据,在不同时间尺度上分别对 NDVI 的时空变化特征及气候变化特征进行了分析。王华等^[11]利用 GEE 平台分析了近 20 年西藏巴宜区植被覆盖度的时空变化特征与驱动力,发现在巴宜区温度较降水量更能影响植被的覆盖情况,而且植被生长变化情况与人类活动有一定的相关性。崔珍珍等^[12]基于 1982—2015 年的 GIMMS NDVI3g.v1 数据,结合站点气象数据,发现在科尔沁沙地地区,降水量对植被覆盖的影响大于温度对植被覆盖的影响。

上述研究揭示,气候及人类活动对植被的发育有一定的影响作用,但前人研究大多选取气候因子中的降水量和气温 2 个因子,未研究其他气候因子(如日照时长、湿度、风速等)对于植被生长的影响;相关研究表明,其他气候因子也会对 NDVI 产生一定的影响,日照时长通过影响植物的光合作用等方面,对植被生长有显著影响,故本文增加日照时长这一气候因子;前人在研究气候因子与植被生长的关系时,通常采用相关系数和一阶偏相关系数,本文采用二阶偏相关系数,剔除了因变量之间的相互影响,使研究结果更具说服力^[13-15]。本次选用 2000—2015 年的 SPOT-NDVI 数据,结合该时间段的降水、气温、日照时长等气候因子,采用一元回归分析法、趋势分析法、变异系数法、二阶偏相关分析法等,研究北京市植被时空变化特征及气候因子对植被生长的影响规律,为北京市生态环境保护与优化(植被的养护)提供科学依据与借鉴。

1 研究区概况及数据来源

北京市总面积约为 16 410 km²,气候为温带季风性气候,夏季高温多雨、冬季寒冷干燥。多年平均气温为 9~19℃,降水季节分配不均匀,全年大部分的降水集中在夏季,多年平均日照时长为 2000~2800 h。

本次采用的遥感数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),NDVI 空间分布数据集是根据 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据并采用最大值合成法生成的年

度 NDVI 数据集。气温和降水量数据也来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),是基于全国气象站点日观测数据,采用空间插值的方法得到的。日照时数数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),利用中国地面 824 个基准、基本气象台站 1981—2015 年的日照时数年值资料,采用薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行空间插值,并综合全国 1 km 分辨率的地形图数据,生成日照时间数据集。以上数据经过图像掩膜后,提取北京市 2000—2015 年相关数据集。

2 研究方法

2.1 回归分析法

回归分析法是通过对大量统计数据进行处理,确定 2 个变量之间具体数量关系的一种分析方法^[16-17]。本次研究的计算公式如下:

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, a, b 为待定的参数; i 为年序号, $i = 1, 2, \dots, 16$; x_i 为自变量,本文指 2000—2015 年中第 i 年的 NDVI 最大值; ε_i 为随机变量。

2.2 趋势分析法

趋势分析法是一种分析时间对变量的影响的方法,其利用回归方程的斜率分析植被随着时间变化的趋势^[16, 18]。本次研究的计算公式如下:

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

式中,Slope 为像元回归方程的斜率,本文用其表征 NDVI 在 2000—2015 年 16 年的总体变化趋势; i 为年序号, $i = 1, 2, 3, \dots, n, n = 16$; NDVI_i 表示第 i 年的 NDVI 值。当 Slope > 0 时,表示随着时间的变化,NDVI 呈上升趋势;当 Slope < 0 时,表示随着时间的变化,NDVI 呈下降趋势;当 Slope = 0 时,表示植被覆盖水平没有变化。

2.3 变异系数法

变异系数表征变量的波动程度,通过计算变异系数,分析植被变化的波动程度^[19]。本次研究的计算公式如下:

$$C_v = \frac{1}{\overline{\text{NDVI}}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \quad (3)$$

式中, C_v 为变异系数; $\overline{\text{NDVI}}$ 为多年 NDVI 的均值; NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值。变异系数越大, 表示 NDVI 值的波动性越大; 变异系数越小, 表示 NDVI 值的波动性越小。

2.4 二阶偏相关系数法

偏相关分析指在剔除其他变量的线性影响下, 分析 2 个变量的线性相关性^[10,20]。当剔除一个变量的影响时, 得到的结果称为一阶偏相关系数; 当剔除 2 个变量的影响时, 得到的结果称为二阶偏相关系数^[21]; 当不剔除其他变量的影响时, 得到的结果称为相关系数。本次研究中, 由于采用了气温、降水量、日照时长 3 个气候因子, 在分析 NDVI 与一种气候因子的相关性时, 需要剔除剩余 2 个因子的影响, 故采用二阶偏相关系数。计算二阶偏相关系数, 首先要计算相关系数, 相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中, r_{xy} 为变量 x 和 y 之间的相关系数; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为变量 x 和 y 的均值; i 为样本个数, $i=1, 2, 3, \dots, n, n=16$ 。

计算完相关系数后, 再计算一阶偏相关系数, 一阶偏相关系数的计算公式如下:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中, $r_{xy \cdot z}$ 为剔除 z 变量影响后的变量 x 和 y 的一阶偏相关系数。

二阶偏相关系数由 $r_{xy \cdot z}$ 求得, 计算公式如下:

$$r_{ij \cdot hm} = \frac{r_{ij \cdot h} - r_{im \cdot h}r_{jm \cdot h}}{\sqrt{(1-r_{im \cdot h}^2)(1-r_{jm \cdot h}^2)}} \quad (6)$$

式中, $r_{ij \cdot hm}$ 为剔除 h 和 m 两个变量后, 变量 i, j 的相关系数。

最后还需要对二阶偏相关系数进行显著性检验, 本次研究采用 t 检验法, 公式如下:

$$t = \frac{r_{ij \cdot hm}}{\sqrt{1-r_{ij \cdot hm}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (7)$$

式中, $r_{ij \cdot hm}$ 是二阶偏相关系数, n 为样本数, m 为自由度个数。

3 NDVI 时空变化分析

3.1 NDVI 时间变化特征

根据北京市 2000—2015 年的 NDVI 值, 提取每一年的 NDVI 平均值进行回归分析, 得到 2000—2015 年北京 NDVI 变化趋势(图 1)。由图 1 可知, 这 16 年间 NDVI 平均值在 0.69~0.75 之间波动, 最大值出现在 2008 年, 最小值出现在 2002 年, NDVI 值总体呈缓慢波动上升趋势。其中有 3 个时间段 NDVI 值增加趋势较明显, 分别是 2002—2004 年、2007—2008 年、2010—2012 年; 2008—2010 年, NDVI 值减少趋势较明显; 2012—2015 年, NDVI 变化趋势较平缓。2007—2008 年, 北京奥运会筹备期的生态工程建设, 可以较好地阐释北京市 NDVI 值在 2008 年出现峰值的原因^[22]; 2008—2010 年, 北京市经济的发展及人口密度的上升, NDVI 值出现减少的趋势; 2010 年以后, 随着北京市生态工程建设的持续开展, 植被覆盖情况得到很好的改善。

3.2 NDVI 空间变化分析

3.2.1 空间分布特征

根据北京市 2000—2015 年的 NDVI 数据, 计算得到这 16 年的 NDVI 均值数据, NDVI 值范围在 0.24~0.87 之间。根据 NDVI 值, 将北京市分为 4 个等级的植被覆盖区, 分别是低覆盖区(0~0.4)、中覆盖区(0.4~0.6)、中高覆盖区(0.6~0.8)及高覆盖区(0.8~1.0)。根据以上 4 个等级, 将 NDVI 均值数据进行重分类, 得到图 2。根据图 2 分析可知, 北京

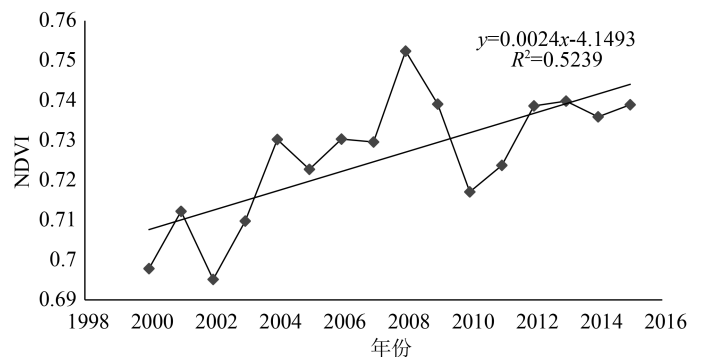


图 1 北京市 2000—2015 年 NDVI 变化趋势

Fig. 1 Change trend of NDVI in Beijing from 2000 to 2015

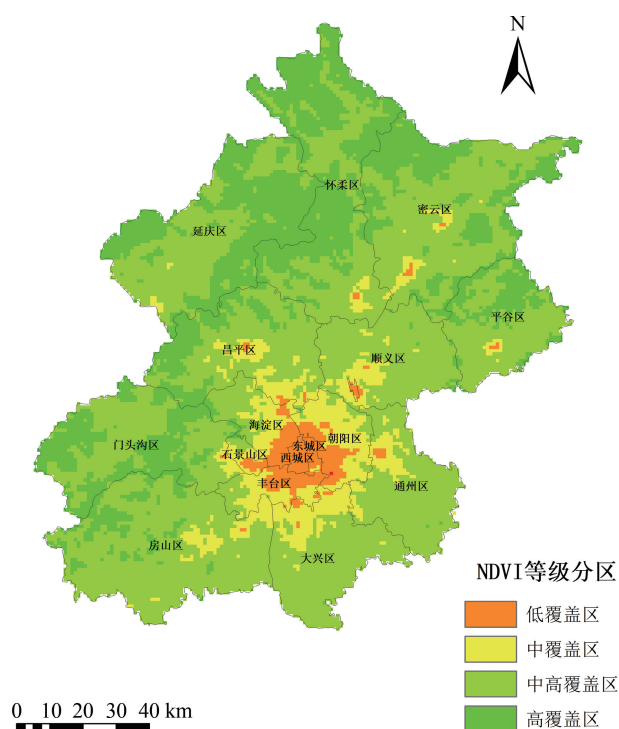


图2 2000—2015年北京市平均NDVI空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of average NDVI in Beijing
from 2000 to 2015

市低覆盖区面积所占比例最低,仅占3.07%。低覆盖区主要分布于城中六区,其中西城区和东城区绝大部分为低覆盖区;东城区和西城区作为北京市人口密度最高的2个城区,人类活动相对密集,其经济发展水平也位于北京市的前列,这些因素导致这2个区的植被覆盖程度相对不高。中覆盖区面积占9.67%,主要分布于朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区及这些区的相邻区域。中高覆盖区面积所占比例最高,占总面积的59.07%,主要分布于北京的郊区。高覆盖区面积占29.19%,主要分布于北京北部和西部的山区,人类活动较少。

3.2.2 空间变化趋势分析

为进一步分析北京市NDVI的变化趋势,根据公式(2)得到北京市2000—2015年NDVI的变化趋势(图3-a),并对其进行显著性检验。上文提及, $Slope > 0$,表征NDVI的变化呈上升趋势; $Slope < 0$,表征NDVI的变化呈下降趋势。分析图3-a可知,NDVI呈上升趋势的面积占总面积的73.09%。东城区和西城区绝大部分区域的NDVI呈上升趋势,说

明这16年间,北京市较重视中心区域的绿化及植被养护工作,并取得较好的成效。海淀区、朝阳区、丰台区及石景山区的NDVI呈上升趋势的面积也达到50%以上。门头沟区、房山区、密云区、怀柔区及延庆区的大部分区域NDVI呈上升趋势。NDVI呈下降趋势的面积占总面积的26.91%,主要分布于顺义区、大兴区、昌平区等区域,这几个区的NDVI呈下降趋势的面积占比较高,说明这16年间,其经济发展较迅速,人类活动范围增大,导致其NDVI呈下降趋势。

根据检验结果,有71.91%的区域通过了显著性检验($p < 0.05$),60.48%的区域通过了极显著性检验($p < 0.01$)。为了更清晰地表达北京市NDVI的变化趋势,将显著性检验结果与NDVI变化斜率结果进行空间叠加,得到图3-b和表1。极显著改善区域占总面积的51.72%,主要分布于东城区、西城区及北京市的北部和西部;极显著退化区域占总面积的8.76%,主要分布于大兴区、通州区、顺义区、昌平区。北京市中心城区植被覆盖情况呈显著性改善的原因,主要是北京市这16年间中心城区生态治理的力度进一步加强,并且部分工业企业向北京市周边城区进行迁移^[23]。

3.2.3 空间变化稳定性分析

变异系数可以反映这一时间段NDVI空间变化的稳定性,变异系数越高,说明NDVI变异稳定性越剧烈。根据公式(3),计算出北京市2000—2015年NDVI值的变异系数 C_v ,变异系数范围在0.017~0.533之间。根据前人的研究^[24]及北京市植被覆盖的实际情况,将变异系数分为4个等级,当 $C_v < 0.05$ 时,NDVI变异程度为非常稳定;当 $0.05 < C_v < 0.1$ 时,NDVI变异程度为稳定;当 $0.1 < C_v < 0.15$ 时,NDVI变异程度较小;当 $C_v > 0.15$ 时,NDVI变异程度为剧烈。根据以上4个等级,将 C_v 值的计算结果进行重分类,得到图4。根据图4可知,北京市NDVI变异程度稳定的区域居多,变异较剧烈的区

表1 2000—2015北京市NDVI变化趋势显著性

Table 1 Statistics of significance of NDVI
change trend in Beijing from 2000 to 2015

类型	极显著 退化	显著 退化	不显著 退化	不显著 改善	显著 改善	极显著 改善
占比/%	8.76	4.09	14.07	15.03	6.35	51.72

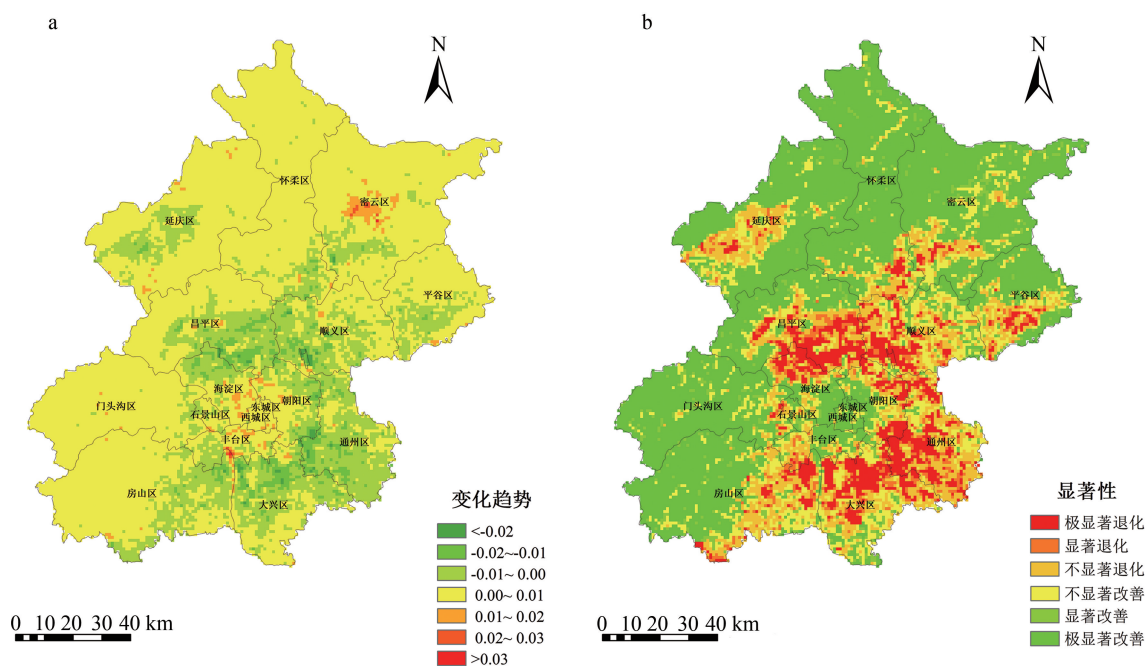


图 3 2000—2015 北京市 NDVI 变化趋势及显著性检验

Fig. 3 Change trend and significance of NDVI in Beijing from 2000 to 2015

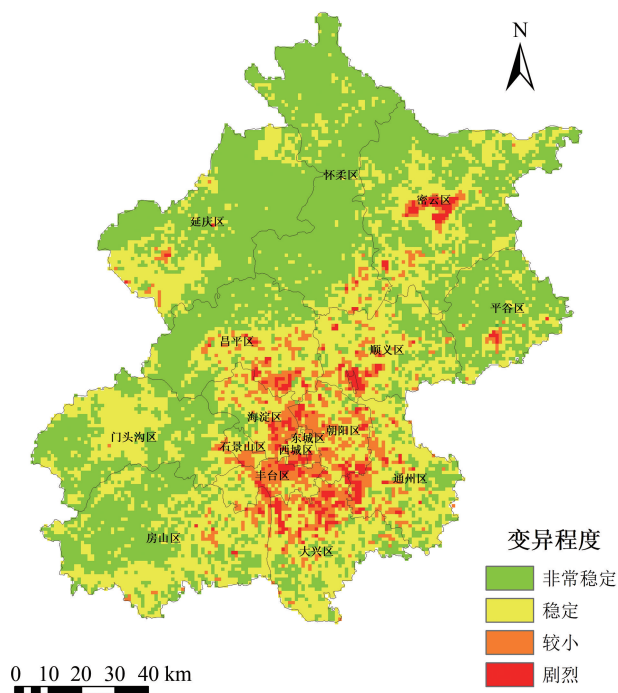


图 4 2000—2015 年北京 NDVI 变化稳定性

Fig. 4 Changes and stability of NDVI in Beijing from 2000 to 2015

域主要分布在城六区。变异程度为非常稳定的区域占总面积的 52.59%, 主要分布在怀柔区、延庆区、平谷区; 变异程度为稳定的区域占总面积的 37.89%, 北京每个区都有分布, 在顺义、门头沟等区覆盖面积较大。变异程度为较小的区域占总面积的 7.14%, 主要分布于城六区及房山区的小部分区域。变异程度为剧烈的区域占总面积的 2.38%, 主要分布于中心城区, 其他区也有分布。

4 NDVI 对气候因子的响应

为了得出 NDVI 与气候因子的关系, 分别将 NDVI 数据与气温、降水量、日照时长等数据进行二阶偏相关分析, 得到不同气候因子对于 NDVI 的影响。

4.1 温度与 NDVI 的二阶偏相关分析

通过公式 (4)、(5)、(6), 计算得到剔除降水量、日照时长 2 个气候因子后的气温与 NDVI 的二阶偏相关系数, 并进行了显著性检验, 结果如图 5 所示。北京市气温与 NDVI 的二阶偏相关系数变化范围为 $-0.76 \sim 0.86$, NDVI 值与气温呈正相关的面积占总面积的 68.30%。其中 4.81% 通过了显著性检验 ($p < 0.05$), 1.32% 通过了极显著性检

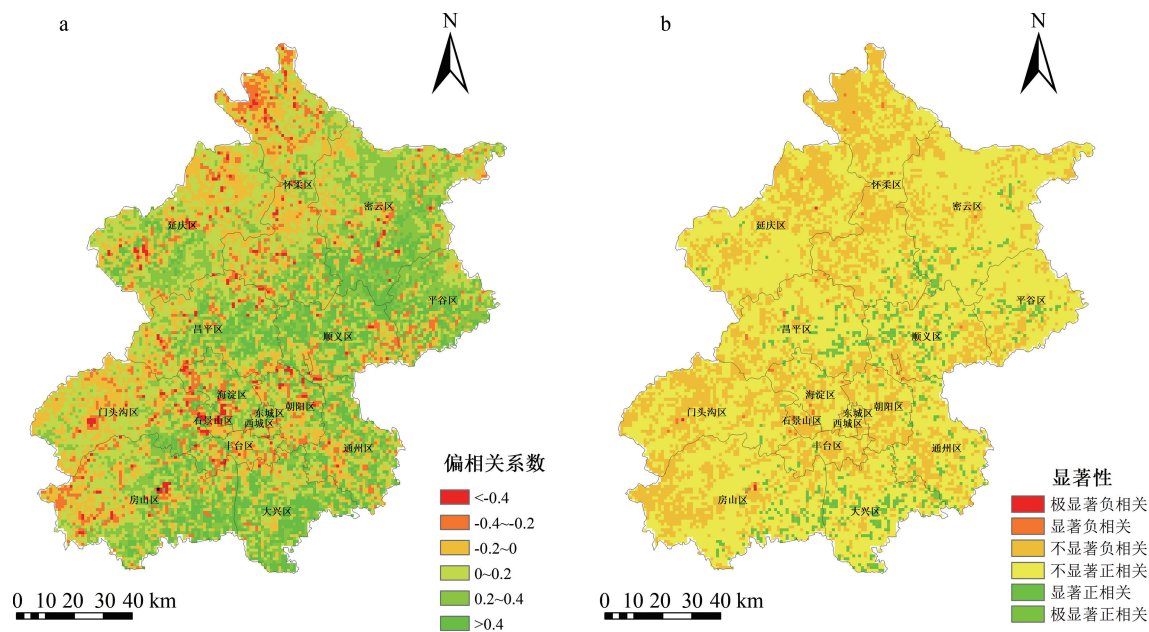


图 5 2000—2015 年北京市 NDVI 与气温二阶偏相关系数(a)及显著性检验(b)

Fig. 5 Partial correlation coefficient between NDVI and temperature in Beijing from 2000 to 2015 (a) and significance (b)

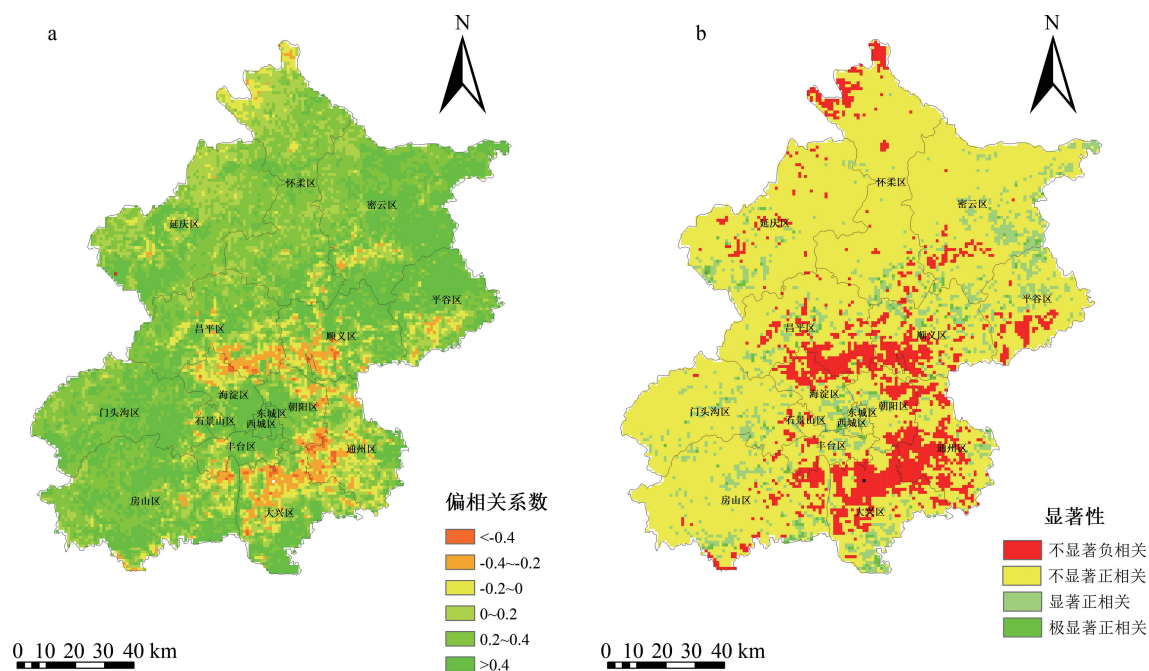


图 6 2000—2015 年北京市 NDVI 与降水量二阶偏相关系数(a)及显著性检验(b)

Fig. 6 Partial correlation coefficient between NDVI and precipitation in Beijing from 2000 to 2015 (a) and significance (b)

验($p < 0.01$), 主要分布在顺义区、房山区、大兴区等区, 中心城区基本不分布。NDVI 值与气温呈负相关的面积占总面积的 31.7%, 其中只有 0.26% 通过了显著性检验($p < 0.05$); 只在北京的西部及北部有零星分布。

4.2 降水量与 NDVI 的二阶偏相关分析

通过上文提到的公式, 计算得到剔除气温、日照时长这 2 个气候因子后的降水量和 NDVI 二阶偏相关系数, 并进行了显著性检验, 结果如图 6 所示。北京市降水量与 NDVI 的二阶偏相关系数范围为

-0.54~0.83。研究区 NDVI 值与降水量呈正相关的区域占总面积的 87.11%, 其中有 10.25% 通过了显著性检验 ($p<0.05$), 有 1.22% 通过了极显著性检验 ($p<0.01$), 均匀分布在北京各个区, 基本上每个区都分布有极显著正相关区域及显著正相关区域。研究区 NDVI 值与降水量呈负相关的区域占总面积的 12.89%, 其中没有区域通过显著性检验 ($p<0.05$)。

4.3 日照时长与 NDVI 二阶偏相关分析

根据上文提到的公式, 计算剔除气温、降水量这 2 个气候因子后的日照时长与 NDVI 二阶偏相关系数, 并进行显著性检验, 结果如图 7 所示。北京市日照时长与 NDVI 的二阶偏相关系数范围为 -0.79~0.88。研究区 NDVI 值与日照时长呈正相关的面积占总面积的 39.80%, 其中有 3.99% 通过了显著性检验 ($p<0.05$), 有 0.57% 通过了极显著性检验 ($p<0.01$), 这些区域主要分布在朝阳区、海淀区、昌平区、顺义区、房山区及大兴区, 东城区和西城区不分布。NDVI 值与日照时长呈负相关的面积占总面积的 61.20%, 其中有 6.56% 通过了显著性检验 ($p<0.05$), 只有 0.46% 通过了极显著性检验 ($p<0.01$), 主要分布于北京市的西部, 以及怀柔区

的北部和密云区。

4.4 气候因子对 NDVI 值的影响

根据以上计算结果, 统计气温、降水量、日照时间与 NDVI 的二阶偏相关系数及显著性检验的分布情况 (表 2)。由表 2 可知, 从二阶偏相关系数均值及正、负相关及其显著性比例看, 降水量是 3 种气候因子中最能影响 NDVI 值的因子, 其次是气温, 再次是日照时长。

表 2 各气候因子与 NDVI 值二阶偏相关系数及其显著性

Table 2 Statistics of second-order partial correlation coefficient and significance between climate factors and NDVI value

气候因子	二阶偏相关系数均值	二阶偏相关系数范围	显著正相关占比 /%	极显著正相关占比 /%	显著负相关占比 /%	极显著负相关占比 /%
气温	0.1171	-0.76~0.86	68.30	4.81	1.32	31.70
降水量	0.2742	-0.54~0.83	87.11	10.25	1.22	12.89
日照时长	-0.0985	-0.79~0.88	38.80	3.99	0.57	61.20

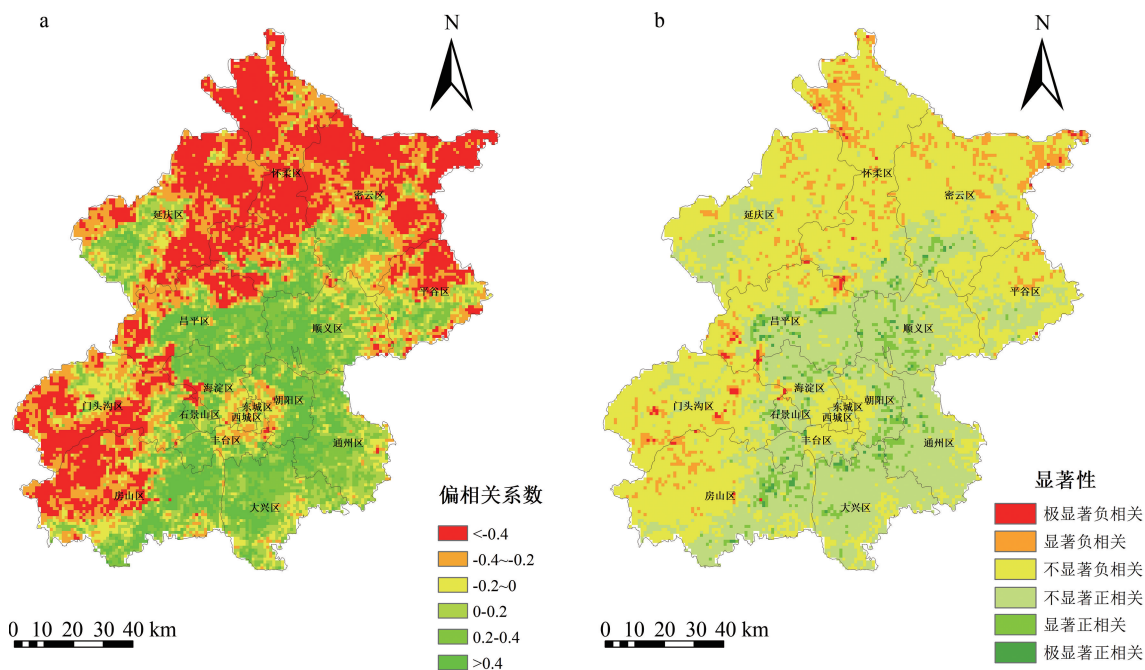


图 7 2000—2015 年北京市 NDVI 与日照时长二阶偏相关系数 (a) 及显著性检验 (b)

Fig. 7 Partial correlation coefficient between NDVI and sunshine time in Beijing from 2000 to 2015 (a) and significance (b)

5 讨论与结论

(1)一元回归分析法分析表明,2000—2015 年北京市 NDVI 变化总体上呈缓慢波动上升趋势,反映北京市在这 16 年间植被生长情况较好,其中 2002—2004 年、2007—2008 年、2010—2012 年这 3 个时段的 NDVI 变化上升趋势较明显,NDVI 值的最大值出现在 2008 年、最小值出现在 2002 年。2007—2008 年,北京奥运会筹备期的生态工程建设,可以较好地阐释北京市 NDVI 在 2008 年出现峰值的原因^[22];2008—2010 年,北京市经济的发展及人口密度的上升,导致 NDVI 出现下降的趋势;2010 年以后,随着北京市生态工程建设的持续开展,植被覆盖情况得到了很好的改善。

(2)北京市这 16 年的 NDVI 空间分布规律为中心城区 NDVI 较低,以低覆盖区为主。中心城区周边的 NDVI 较高,以中高覆盖区为主。中心城区人类活动相对密集,经济发展水平也位于北京市的前列,这些因素导致这两个区的植被覆盖程度相对不高;而中心城区周边区域因人类活动较少,故植被覆盖程度较高。通过趋势分析法获知,北京市这 16 年的 NDVI 变化呈上升趋势的面积占比为 73.09%,表明北京市比较重视中心区域的绿化及被养护工作,取得了较好的成效。

(3)2000—2015 年,北京市 NDVI 变异系数介于 0.017~0.533 之间,其中,变异程度较稳定的区域占总面积的 90.48%,变异程度不稳定的区域面积占总面积的 9.52%。NDVI 值波动较剧烈的区域主要集中在东城区和西城区。

(4)通过二阶偏相关系数分别计算 NDVI 与气温、降水量及日照时长 3 个气候因子的相关程度。根据 3 个气候因子与 NDVI 值的二阶偏相关系数及其显著性分析可知,降水量对 NDVI 的影响最大,气温对 NDVI 的影响居中,日照时长对 NDVI 的影响较小。

致谢:审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见、建议,在此致以衷心谢意。本文数据来源:中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)、国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),特此感谢。

参考文献

[1] 李晓兵,陈云浩,张云霞,等.气候变化对中国北方荒漠草原植被的

- 影响[J].地球科学进展,2002,(2): 254-261.
- [2] 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,(12): 109-113.
- [3] 魏吉鑫,刘斯文,李海藩,等.江西赣州废弃离子型稀土矿修复区植被高光谱特征与健康状况评价[J].地质通报,2020,39(12): 2037-2043.
- [4] Huete A. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,83(1): 195-213.
- [5] 刘恒,汤弟伟,孙毅,等.武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(5): 245-253.
- [6] Zhu L J, Ming J J, Zhu L K. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106545.
- [7] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020,75(5): 961-974.
- [8] 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.
- [9] 党跃军,王礼霄,严俊霞.山西省 2003—2012 年植被时空变化格局及对气候因子的响应[J].水土保持研究, 2015,22(2): 235-240.
- [10] 谢胜金,刘永和,姚凤欣.1998—2015 年北京市 NDVI 时空变化及其与气候因子的响应关系[J].水土保持研究,2020,27(3): 190-196.
- [11] 王华,杨乾鹏,郭山川,等.Landsat 时序数据支持下的藏东南植被时空变化监测[J].测绘通报,2020,(11): 7-12.
- [12] 崔珍珍,马超,陈登魁.1982—2015 年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J].干旱区研究,2021,38(2): 536-544.
- [13] 侯美亭,胡伟,乔海龙,等.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,2015,30(3): 409-422.
- [14] 张凯选,范鹏鹏,王军邦,等.西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究[J].生态环境学报,2019,28(6): 1080-1091.
- [15] 许玉凤,潘网生,张永雷.贵州高原 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J].生态环境学报,2020,29(8): 1507-1518.
- [16] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [17] 杜灵通,徐友宁,宫菲,等.宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响[J].地质通报,2018,37(12): 2215-2223.
- [18] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等.黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J].中国环境科学,2021,41(8): 3832-3841.
- [19] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5): 705-716.
- [20] 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.
- [21] 李双双,张玉凤,汪成博,等.气候变化和生态建设对秦岭—淮河北植被动态的影响[J].地理科学进展,2021,40(6): 1026-1036.
- [22] 孙晓鹏,王天明,郭建国,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.
- [23] 刘涛,曹广忠.北京市制造业分布的圈层结构演变——基于第一、二次基本单位普查资料的分析[J].地理研究,2010,29(4): 716-726.
- [24] 廖春贵,胡宝清,熊小菊,等.广西植被时空变化及其对气候响应[J].森林与环境学报,2018,38(2): 178-184.