

引用格式: 阎世杰, 王欢, 焦珂伟. 京津冀地区植被时空动态及定量归因[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 767-780. [Yan S J, Wang H, Jiao K W. Spatiotemporal dynamic of NDVI in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on MODIS data and quantitative attribution[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(5): 767-780.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180578

京津冀地区植被时空动态及定量归因

阎世杰^{1,2*}, 王欢^{2,3}, 焦珂伟⁴

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

Spatiotemporal Dynamics of NDVI in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on MODIS Data and Quantitative Attribution

YAN Shijie^{1,2*}, WANG Huan^{2,3}, JIAO Kewei⁴

1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: Vegetation is a sensitive indicator of global climatic changes, and hydrothermal conditions are the main abiotic factors that determine the phenology, spatial pattern, and dynamics of vegetation. Thus, against the background of a changing climate, the climate-vegetation relationship is a hot topic in current global change research. Using geodetector, this study integrated climatic factors (e.g., average temperature, precipitation, water vapor pressure, humidity, sunshine hours, standardized precipitation evapotranspiration index), topographic factors (e.g., slope and elevation), and anthropogenic factors to determine the dominant factors that influenced the normalized difference vegetation index (NDVI) in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015. Different seasons, geomorphological types, and vegetation types were considered during the quantitative attribution analysis. This study revealed the temporal and spatial pattern of vegetation, and the response of vegetation to climate and non-climate factors over the past 10 years, and provided a reference for the construction and restoration of ecological engineering. Trend analysis showed that the NDVI increased during this period, albeit with differences on different spatial scales. In montane regions, the NDVI increased more rapidly than in plains, terraces, and hills. In different vegetation-covered areas, the NDVI increased most rapidly in broadleaf forest, followed by shrubland and coniferous forest. Based on the results of the quantitative distribution analysis, at the temporal scale of one year, precipitation was the dominant factor driving NDVI and explained 39.4% of the spatial distribution, while the interaction of rainfall and land use was the dominant interaction factor, with a q value of 0.582. We observed seasonal and regional differences in the response of NDVI to climatic factors. In the four seasons, vapour pressure was the dominant factor for the spatial distribution of NDVI; humidity is the dominant factor in summer and autumn; and in winter, land use was the dominant

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-03-04.

基金项目: 中国科学院 A 类先导专项子课题 (XDA19030501); 新疆自治区重大科技专项 (2018A03004)。[**Foundation items:** The Pilot Project of Chinese Academy of Sciences, No.XDA19030501; Science and Technology Major Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2018A03004.]

作者简介: 阎世杰 (1994-), 男, 湖北宜昌人, 硕士, 研究方向为遥感图像处理, 深度学习等。E-mail: yansj@radi.ac.cn

factor for NDVI distribution. The explanatory power of the influencing factors on NDVI in the growing season differed in diverse geomorphological types. In montane areas, with increasing elevation, the q value of average temperature decreased. The explanatory power of impacting factors on NDVI of the growing season was different among diverse vegetation types. For different vegetation types, the explanatory power of precipitation on the spatial distribution of NDVI in the growing season was greater than that of mean temperature, with the q value ranked as following grassland > cultivated vegetation > shrubland > broadleaf forest > coniferous forest. In coniferous forest distributed areas, the explanatory power of single factors was insignificant; however, the interaction between two factors can greatly enhance the q value, and the interaction between moisture factors and topographic factors was the dominant factor.

Key words: spatial distribution; NDVI; spatial heterogeneity; quantitative attribution; geodetector; Beijing-Tianjin-Hebei region

***Corresponding author:** YAN Shijie, E-mail: yansj@radi.ac.cn

摘要:作为气候变化的敏感指示器,植被的物候、生长、空间分布格局等特征及其动态变化主要取决于气候环境中的水热条件,因此在气候变化背景下,气候-植被关系成为了全球变化研究的前沿和热点问题。本文综合平均温度、降水、水汽压、湿度、日照时数、SPEI等气候因子,坡度、坡向海拔等地形因子及人为活动因子,应用地理探测器方法针对2006–2015年京津冀地区不同季节NDVI、不同地貌类型区、不同植被类型区生长季NDVI的定量归因研究,揭示了过去10年间植被时空分布格局,及植被对气候、非气候因素响应的季节差异与区域差异,以期为生态工程的建设与修复提供参考意义。趋势分析表明:①2006–2015年京津冀地区NDVI呈现增加趋势,但存在显著的空间差异,如山地生长季NDVI的增长速率大于平原、台地、丘陵等地;②基于地理探测器的定量归因结果表明,降水是年尺度上NDVI空间分布的主导因子(解释力39.4%),土地利用与降水的交互作用对NDVI的影响最为明显($q=58.2\%$);③NDVI对气候因子的响应存在季节性及区域性差异,水汽压是春季NDVI空间分布的主导因子,湿度是夏、秋两季的主导因子,土地利用是冬季的主导因子;④影响因子对生长季NDVI的解释力因不同地貌类型区、不同植被类型区而差异显著。

关键词:NDVI;空间分布;空间异质性;定量归因;地理探测器;京津冀地区

1 引言

植被是地理环境的重要组成部分,是陆地生态系统的主体^[1-2]。植被通过能量传输和物质循环联系大气、水分和土壤^[3],在维护生物多样性和生态平衡、调节碳平衡、涵养水源、防风固沙和维护气候稳定等方面具有不可替代的作用^[4-6]。在全球变化背景下,研究植被变化及其对气候变化的响应已经成为研究全球变化与陆地生态系统关系中的重要内容^[7-8]。植被作为生态环境的敏感指示器^[9-11],容易受到气候变化及人类活动的影响^[12]。因此,监测植被动态变化对于揭示全球变化影响下的区域生态系统响应特征及评价区域生态环境质量具有重要意义^[13-14]。虽然已有研究表明近几十年全球许多地区的植被生长表现出增长态势^[15-16],但对于植被动态的认识以及对于植被影响因素与机制的探析仍存在不足。

京津冀地区是中国的政治、文化及国际交流中心,京津冀生态环境为京津冀一体化协同发展提供

了物质基础。《京津冀协同发展规划纲要》^[17]指出,生态环境保护作为京津冀协同发展3个率先突破之一,以“环”、“带”、“廊”、“养”等方式构建京津冀城市群生态体系。近几年政府在此先后实施了一系列环境保护、植被修复政策,如植树造林、退耕还林、城市绿地建设等措施,以提高人类的生存质量^[18]。已有研究表明,近年来京津冀地区NDVI呈现上升趋势^[19],孟丹等^[20]、晏利斌和刘晓东^[21]分别利用2001–2013年的MODIS/NDVI时序数据及1982–2002年的AVHRR/NDVI时序数据对京津冀地区NDVI变化及气候因子进行了研究,结果表明降水对于NDVI的影响大于温度。尽管已有研究探究了各气候要素与NDVI的相关关系,但各气候因子对NDVI影响的定量归因研究相对薄弱,且多为单要素的研究,对于多要素的耦合作用研究较少。

当前关于NDVI与气候因子相互关系的研究方法多为相关分析法,如偏相关分析、复相关分析等^[22-23]。交互作用的识别方法通常是在回归方程中加入两因子的相乘项,然而两因子协同作用并非一

定是相乘关系^[24],当两因子之间存在其他关系时,该方法会造成研究结果与实际情况之间存在一些偏差。全球变暖背景下,升温在昼夜、季节和纬度尺度分布上具有不对称性,植被与气候的相互作用不仅是非线性的^[25]、非平稳的,且具有较高的时空异质性。植被对气候变化的响应具有季节性和区域性差异。因此基于植被与气候之间的复杂相互关系,科学、准确、定量评估气候因子对植被生长的影响至关重要。

地理探测器方法基于空间方差分析,对变量无线性假设,物理含义明确,其大小反映了自变量对因变量解释的百分比^[26]。此外,地理探测器能够探测两变量之间真正的交互作用,而不仅限于计量经济学预先设定的乘性交互^[24]。该方法已被广泛用于社会科学^[27-28]、自然科学^[29-30]、人类健康^[31-32]、环境科学^[33]等多个领域。已有学者基于地理探测器方法分析NDVI驱动因素^[34-35],但并未考虑植被对气候响应的季节性和区域性差异,且并未对影响因子交互作用对NDVI的影响进行分析和探讨。因此,本文基于地理探测器方法,针对不同季节NDVI、不同地貌形态类型区、不同植被类型区生长季NDVI开展时空动态变化的多因子定量归因,以明晰京津冀地区植被变化的空间异质性,以及NDVI空间分布影响因素与作用机制。

2 研究区概况、数据源及研究方法

2.1 研究区概况

京津冀地区地处113°27'E-119°50'E,36°03'N-42°40'N(图1(a)),位于环渤海平原西部,华北平原北端,东临渤海,北倚燕山山脉,南部为华北平原,西靠太行山脉;东部南部地势平坦,西北部和北部地势较高^[36]。京津冀地区土地面积约21.8万km²,分布着平原、台地、丘陵、山地等多种地貌类型,总体以平原区为主(图1(b))。土地利用类型以耕地为主(图1(c)),2006年耕地面积占区域总面积的49.68%,其次为林地(20.49%)、草地(16.10%)与建设用地(8.87%)。过去10年间,耕地面积有所下降,相比于2006年,2015年耕地面积下降3.28%,其中水田减少1.91%;建设用地面积增加显著,增加3.59%;林地面积增加0.43%,草地面积下降0.45%,其他土地利用类型变化较小。植被类型较为丰富,针叶林、阔叶林、灌丛、草地、栽培植被均有分布(图1(d)),栽培植被和灌丛为主要植被类型。气候类

型为典型的温带半湿润半干旱大陆性季风气候,四季分明,冬季干燥寒冷,夏季高温多雨。年降水量500~700mm,年无霜期120~200d。

2.2 数据来源及处理

本文使用的数据、数据来源与计算方法如表1所示。NDVI原始数据为月合成数据,共120期,其中2015年9月影像质量较差,利用近3年同月影像平均值代替。使用京津冀边界数据掩膜提取京津冀地区NDVI,并以土地利用数据作为依据,剔除非植被区域,包括水体、建设用地及未利用地,剔除非植被信息后的有植被覆盖区域作为本文研究区。利用ANUSPLIN气象插值软件^[37],以DEM为协变量对气象站点数据进行空间插值得到1km分辨率栅格数据,为保证研究区边缘数据插值的准确性,选取周边数据作为补充,数据尽可能在研究区周边均有分布,共涵盖了京津冀及周边地区215个气象站点(图1(a)),用京津冀边界作为掩膜裁剪插值数据得到研究区气象栅格数据。以上气象及NDVI数据均归一到月尺度,年均NDVI为当年12个月NDVI值的平均值,多年平均NDVI为2006-2015年NDVI的平均值。结合前人研究,确定京津冀地区生长季为4-9月份^[38-40],使用对应月份的气象要素与NDVI数据进行年平均计算,得到生长季多年平均数据。根据周成虎等^[41]针对地貌分类的研究成果,研究区内地貌类型共6种:平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地及大起伏山地(图1(b))。

2.3 研究方法

2.3.1 趋势分析法

利用一元线性方程的斜率进行趋势分析。该方法基于栅格计算可模拟出研究区每个栅格的变化趋势,进而反映该区域的时空变化规律^[19],计算公式如下:

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

式中:Slope为像元NDVI的变化率,若值为正,表示NDVI呈现增加趋势,反之,植被指数呈减小趋势;n为监测年数,NDVI_i表示第i年的NDVI。使用F检验方法对趋势的显著性进行检验,显著性与Slope大小无关,仅代表趋势性变化的可信程度^[43],计算公式为:

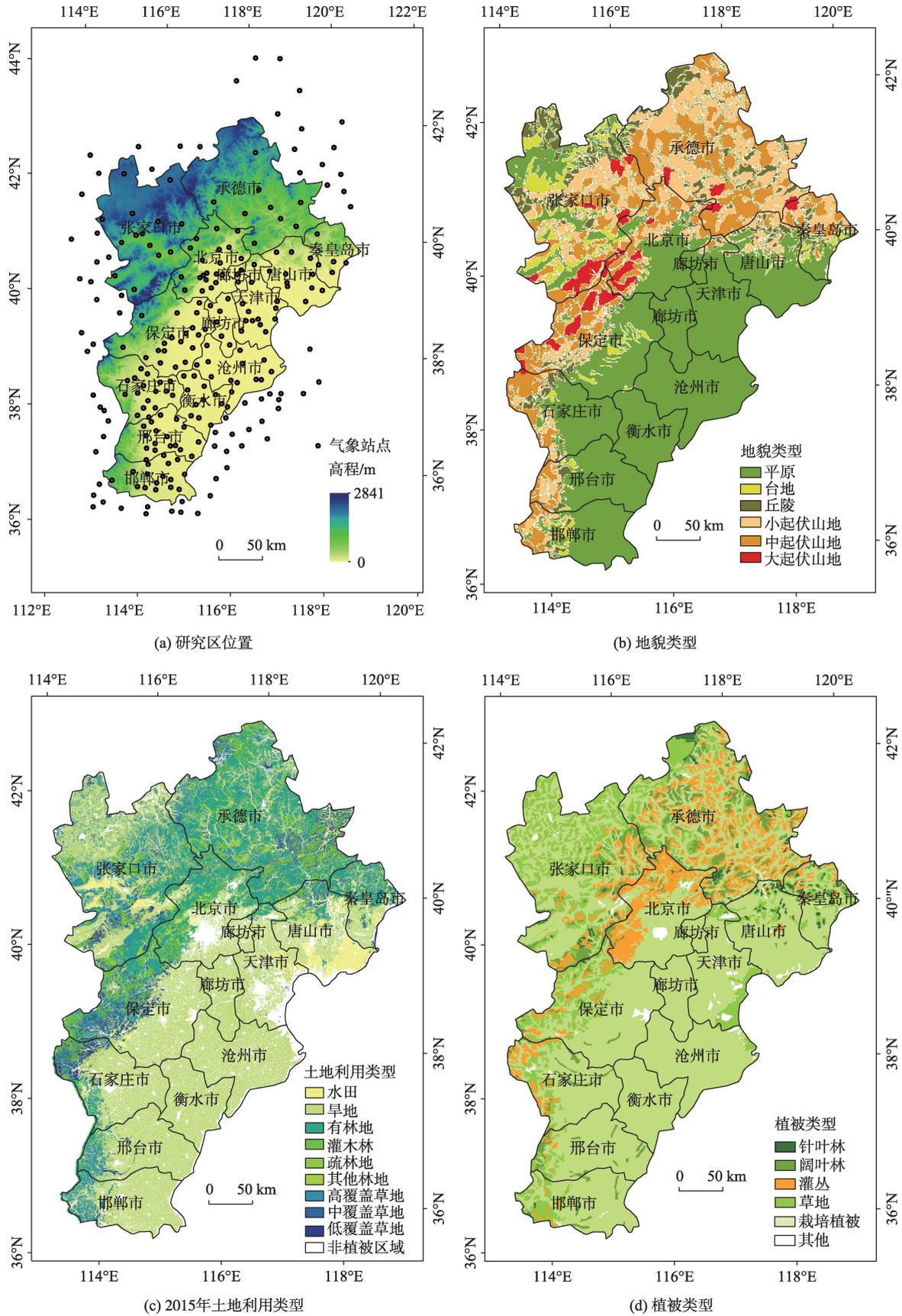


图1 京津冀地区概况

Fig. 1 Basics of the Beijing-Tianjin-Hebei region

表1 研究数据、数据来源及计算方法

Tab. 1 Research data, data sources and calculation methods

需要的数据	数据来源	计算方法
MODIS 中国 NDVI 月合成数据 (2006.01-2015.12)	中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gscloud.cn)	
气象数据(降水、平均温度、最高温度、最低温度、风速、日照时数、湿度和水汽压)	国家气象信息中心(http://data.cma.cn)	其中水汽压数据由湿度数据计算得到
标准化降水蒸散指数(SPEI)	由常规气象数据计算得到	SPEI 采用 Begueria 等 ^[42] 开发的 R 语言扩展包计算(http://cran.r-project.org/web/packages/SPEI)
30m、1000mDEM 数据	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	
植被类型数据(1:100 万) ^[41]	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	
地貌类型数据(1:100 万)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	
土地利用数据(2005, 2010, 2015)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	

$$F = U \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n \left(\hat{y}_i - \bar{y} \right)^2 \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2 \quad (4)$$

式中: F 为统计检验量; U 为误差平方和; Q 为回归平方和; y_i 为第 i 年 NDVI 的像元值; \hat{y}_i 为第 i 年 NDVI 的回归值; \bar{y} 为监测时段 NDVI 的平均值; n 为监测年数。根据检验结果将变化趋势分为 6 个等级^[19]: 极显著减少 ($Slope < 0, P < 0.01$)、显著减少 ($Slope < 0, 0.01 < P < 0.05$)、不显著减少 ($Slope < 0, P > 0.05$)、不显著增加 ($Slope > 0, P > 0.05$)、显著增加 ($Slope > 0, 0.01 < P < 0.05$)、极显著增加 ($Slope > 0, P < 0.01$)。

2.3.2 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[24]提出的通过探测事件空间分层异质性以揭示其背后驱动因子的一种统计学方法, 常用于空间分层异质性的影响因素与作用机制的研究。空间分层异质性是指层内方差之和小于区域总方差的现象。该方法的核心思想为: 如果某个自变量对因变量有重要影响, 则自变量与因变量的空间分布具有一致性^[26]。地理探测器包含因子探测器、交互作用探测器、风险探测器和生态探测器 4 个模块。本研究主要应用地理探测器的因子探测器及交互作用探测器模块。

因子探测器主要用来探测 NDVI 的空间分层异质性和不同气候因素对 NDVI 空间分异性的解释程度, 其解释力大小用 q 值衡量, 计算原理基于方差分析, 表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

其中:

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (6)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为自变量 X 的分层; N_h 和 N 为层 h 内和区域内的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是第 h 层的方差和因变量 Y 的方差; SSW 为层内方差之和, SST 为区域总方差。 q 的取值范围为 $[0, 1]$ 。 q 值越大表明变量 Y 的空间分层异质性越强, 自变量 X 对变量 Y 的解释力也越强。根据 q 值大小可看出各因子对 NDVI 影响的大小, 能够直观的判断 NDVI 的主导因子。地理探测器软件在生成 q 值的同时会对 q 进行显著性检验。

交互作用探测器可用来探测影响因子之间的两两交互作用对 NDVI 的影响。通过对比单因子 q 值及交互作用 q 值即可判断交互作用的方式和方向^[26], 交互作用判据如表 2 所示。

地理探测器要求输入变量为类别变量, 需对连

表2 NDVI 影响因子的交互作用类型

Tab. 2 Types of the interaction between two influencing factors of NDVI

判断依据	交互作用类型
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

注: $X1$ 和 $X2$ 代表 NDVI 的影响因子。

续型数据进行离散化处理。自然断点法是为减少同一分层差异,增大不同分层差异而采用的自然聚类方法,该方法使层内平均离散方差最小,层间平均离散方差最大^[44],在地理探测器的变量分类中应用广泛^[45-46]。因此本文采用自然断点法进行数据分类,将水汽压、日照时数、湿度、平均温度、降水、海拔、坡度等连续型数据分为9类。使用ArcGIS10.2中的渔网点功能生成间隔3 km的渔网点数据,提取栅格数据作为样本,剔除异常值后,共有12 107个数据参与计算。针对不同季节、不同地貌类型区、不同植被类型区,各影响因子采取一致的分层方法,确保在同样分层条件下探究影响因子对NDVI的影响,保证了结果的可比较性。

3 结果及分析

3.1 NDVI空间分布及时间动态变化

京津冀地区2006–2015年植被覆盖状况较好,植被覆盖区年NDVI均值达到0.52(图2(a)),生长季NDVI多年平均值达到0.67(图2(d)),NDVI空间分布不均衡,空间异质性较高。衡水市、承德市、邯郸市、北京市NDVI均值较高,年均值达到0.54以上,生长季NDVI均值高于0.70;张家口市、天津市、唐山市NDVI均值较低,年均值低于0.47,生长季均值低于0.65。NDVI整体呈现显著上升趋势,年均NDVI上升速率为0.107/10a(图2(b)),其中NDVI增加区域占植被覆盖区域总面积的97.61%,显著和极显著增加区域占总面积的81.74%(图2(c))。生

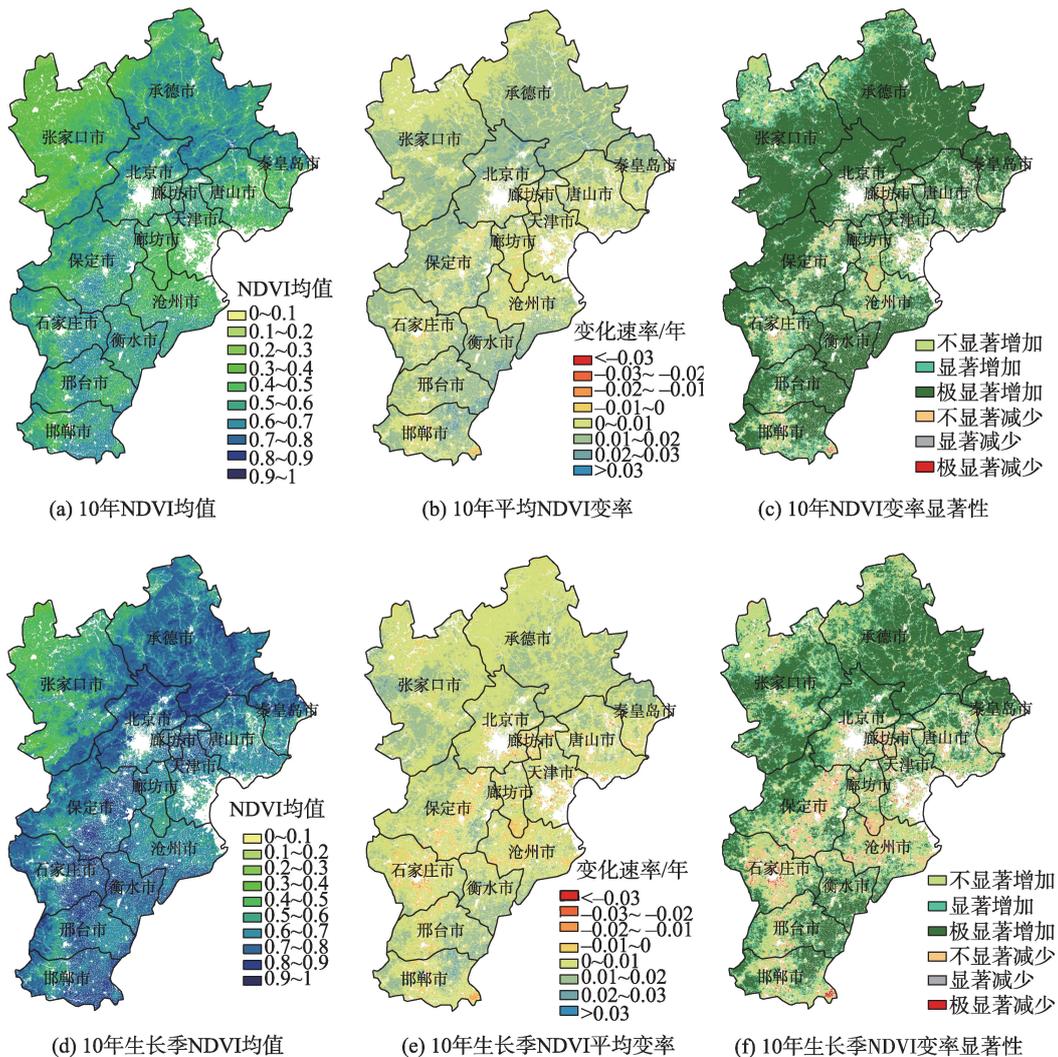


图2 2006–2015年京津冀地区NDVI、NDVI变率及其显著性的空间差异

Fig. 2 NDVI, NDVI variability and its significance level in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

长季 NDVI 上升速率为 0.069/10a (图 2(e)), 其中 NDVI 增加面积占比 91.01%, 显著及极显著增加面积占比达到 58.31% (图 2(f))。

3.2 不同季节 NDVI 主导因素地理探测

3.2.1 不同季节 NDVI 因子显著性探测

因子探测器结果显示不同季节京津冀地区 NDVI 的主导因素存在较大差异(图 3)。年尺度上多年平均 NDVI 的主导因素是降水, 能够解释 39.4% 的 NDVI 空间分布, 其次是土地利用类型, 能够解释 20.8% 的 NDVI 空间分布。春季水汽压是 NDVI 的主导因素, 解释力达到 26.9%, 排在第二、三位的主导因素分别为湿度、降水。夏季, 主导因素为湿度, 其次为降水。华北地区降水集中于夏季, 且常以暴雨形式降落, 土壤不能完全吸收雨水, 大部分降水泛滥造成土壤侵蚀, 而在未降雨时段里, 植被处于干旱状态, 此时大气中的湿度通过调节饱和和差控制植

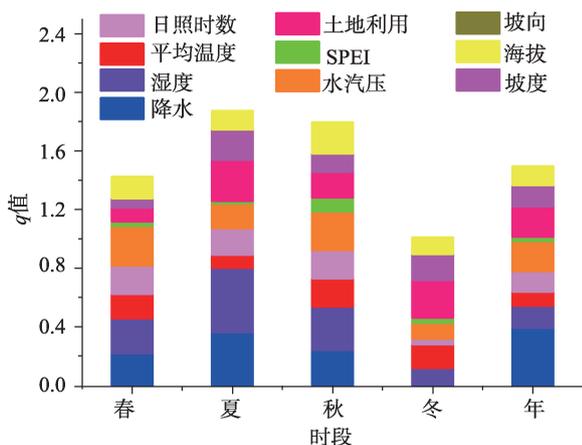


图 3 2006-2015 年京津冀地区不同季节植被 NDVI 影响因子 q 值

Fig. 3 The q values of the influencing factors of NDVI in different seasons in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

被的蒸腾作用, 进而影响植被生长, 因此夏季湿度对 NDVI 的解释力高于降水。冬季, NDVI 第一主导因素为土地利用, 此时植被大部分处于休眠期, 水热因子对 NDVI 的主导作用减弱, 不同土地利用类型之间 NDVI 差异显著。第二主导因素为坡度, 坡度通过控制土壤中的水分和养分影响植被分布, 随着坡度的增高, 空气对流加强导致地表持水能力弱, 且土壤养分向下沉淀, 对植被生长造成一定的不利因素^[36], 不同坡度梯度生长的植被具有显著差异。

3.2.2 不同季节 NDVI 主导交互作用探测

交互作用探测结果显示, 两因子交互作用均会增强对 NDVI 的解释力。不同季节 NDVI 的主导交互作用有所差异。将解释力排在前三位的主导交互作用进行统计, 得到表 3。年尺度上, 土地利用与降水的叠加是 NDVI 的主导交互因子, 能够解释 58.2% 的 NDVI 空间分布, 意味着相同的降水水平与不同的土地利用类型, 或不同的降水水平与相同的土地利用类型, NDVI 数值差异较大。春季, 降水和水汽压的协同作用是 NDVI 的主导因子, 能够解释 56.5% 的 NDVI 空间分布, 降水和湿度的交互作用次之, 水分条件是春季植被生长的主导因素。夏季, 湿度和土地利用的协同作用是 NDVI 的主导因子, 湿度和水汽压的主导交互作用次之。秋季, 土地利用和水汽压的交互作用是主导交互因子, 土地利用和湿度的交互作用次之, 土地利用和海拔的交互作用是第三主导交互因子, 二者呈现非线性增强趋势, 其交互作用 q 值(0.531)大于土地利用(0.177)和海拔 q 值(0.110)之和, 表明不同海拔地区的相同土地利用类型, 或相同海拔的不同土地利用类型 NDVI 数值差异较大。其原因在于: 海拔高的地区温度相对较低, 水热条件相对较差, 叶子往往较先脱落, 因此即使相同植被, 在不同海拔分布区域其 NDVI 值差异较大。冬

表 3 2006-2015 年京津冀地区不同季节 NDVI 影响因子交互作用 q 值

Tab. 3 The interaction q value of the influencing factors of NDVI in different seasons in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

	春	夏	秋	冬	年
主导交互作用 1	降水∩水汽压	湿度∩土地利用	土地利用∩水汽压	土地利用∩平均温度	土地利用∩降水
q 值	0.565	0.634	0.539	0.434	0.582
主导交互作用 2	降水∩湿度	湿度∩水汽压	土地利用∩湿度	土地利用∩海拔	降水∩海拔
q 值	0.505	0.631	0.535	0.404	0.543
主导交互作用 3	土地利用∩水汽压	湿度∩平均温度	土地利用∩海拔	土地利用∩水汽压	降水∩水汽压
q 值	0.472	0.627	0.531	0.395	0.532

季,土地利用和平均温度的交互作用是NDVI的主导交互作用,土地利用和海拔的交互作用次之。

3.3 生长季NDVI主导因素空间异质性地理探测

3.3.1 不同地貌类型区生长季NDVI影响因素地理探测

(1)NDVI分布特征及时间变化

大起伏山地区生长季NDVI均值最高,中起伏山地区次之,均高于0.730;台地丘陵区生长季NDVI均值最低,小于0.600(表4)。由地貌类型叠加土

地利用类型可知,不同地貌类型区,土地利用结构具有显著差异(图4)。山地丘陵区,随着地形起伏度的上升,林地面积大幅上升,耕地面积大幅下降,生长季NDVI均值呈上升趋势。平原、台地地区,植被类型以耕地为主,2006–2015年NDVI呈显著上升趋势,增长率大于0.05/10 a。丘陵地区,耕地占据植被分布区总面积的45.30%,NDVI以0.074/10a的速率呈极显著上升趋势。小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地地区,林地是主要植被类型,NDVI以大于0.08/10a的速率呈极显著上升趋势。

表4 2006–2015年不同地貌类型区生长季NDVI及其变率均值

Tab. 4 Averages of NDVI and its variability in different geomorphological areas from 2006 to 2015

	平原	台地	丘陵	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地
均值	0.671	0.550	0.591	0.691	0.733	0.750
变率/a	0.0052	0.0069	0.0074	0.0089	0.0087	0.0081
变率显著性	显著	显著	极显著	极显著	极显著	极显著

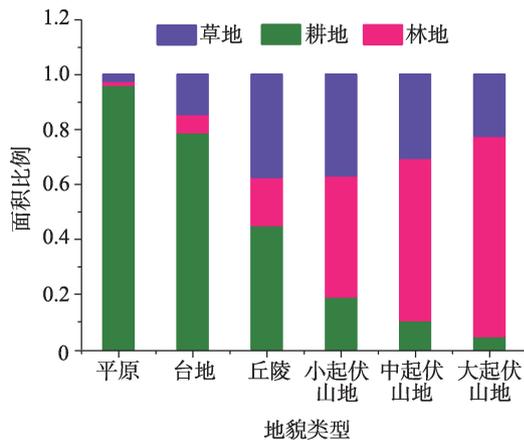


图4 2006–2015年京津冀地区不同地貌类型植被覆盖区中植被类型分布比例

Fig. 4 Proportion of vegetation types in different geomorphological areas that have vegetation cover in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

(2)NDVI影响因子的显著性探测

植被对气候变化的响应在不同地貌类型区有所区别,存在空间差异^[47]。这种差异不仅表现为植被活动多年平均状况的差异,而且表现为植被活动的变化趋势和变化过程的区域差异^[48]。影响因子在不同地貌类型区对NDVI的解释力差异显著(图5)。降水对生长季NDVI的控制作用在台地、丘陵地区最为显著,其解释力高达63.8%以上。山地地区,随着地形起伏度的上升,地势相对陡峭,地形更为复杂,气候差异显著,降水的解释力逐渐降低。湿度

在台地地区对NDVI的解释力高达67.1%、丘陵地区次之,达到62.8%,但在大起伏山地地区却不显著。在山地丘陵区,随着地形起伏度上升,温度对NDVI的解释力下降,具体体现为 q 值在山地丘陵区的排序为:丘陵>小起伏山地>中起伏山地>大起伏山地(不显著)。京津冀地区属温带大陆性季风气候,植物生长季的水热组合条件最为适宜,因此SPEI对NDVI空间分布的解释力较低。土地利用类型在相对平坦区域解释力不显著,如平原、台地、丘陵地区。此外,大起伏山地地区土地利用类型多

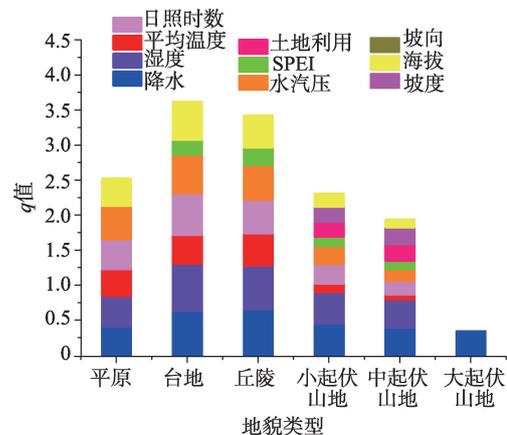


图5 2006–2015年京津冀地区不同地貌类型区生长季NDVI影响因子 q 值

Fig. 5 The q values of the influencing factors of NDVI in the growing season in different geomorphological areas in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

为林地、高覆盖草地,其他用地类型不足区域面积的10%,NDVI差异相对较小,因此土地利用类型在该区对NDVI空间分布的解释力不显著。坡度、坡向因子在坡面尺度为植被生长的关键因子,但在以地貌类型为基础的宏观尺度上,对生长季NDVI的解释力不显著。

(3) NDVI影响因子的交互作用探测

不同地貌类型区NDVI影响因子两两交互均会增强对NDVI的解释力(表5)。平原地区,日照时数和水汽压的交互作用是生长季NDVI空间分布的主导交互作用,能够解释58.6%的NDVI空间分布;其次是日照时数和湿度的交互作用。台地地区,湿度与其他因子的协同作用较为显著,具体体现在排在前三位的主导交互作用均为湿度叠加某一影响因子。山地丘陵区,土地利用与降水的交互作用对生长季NDVI空间分布影响显著,小起伏山地及大起伏山地地区,土地利用与降水的交互作用是第一主导因子,丘陵及中起伏山地地区,为第二主导因子。平原及台地地区,植被类型多为农业用地,受耕作、灌溉等人类活动影响较大,因此土地利用类型与降水的交互作用对NDVI解释力较小。

3.3.2 不同植被类型区生长季NDVI时间变化及空间分布定量归因

(1) NDVI空间分布特征及时间变化

选取京津冀地区主要植被类型进行NDVI空间分布及时间变化特征分析,包括针叶林、阔叶林、灌

丛、草地和栽培植被。如表6所示,结果表明阔叶林分布区生长季NDVI均值最高,其次为灌丛和针叶林分布区,NDVI均值均高于0.730。草地NDVI均值最低,栽培植被次之,其NDVI均值低于0.670。针叶林、阔叶林、灌丛和草地呈极显著增加趋势,NDVI增长率大于0.07/10a,栽培植被呈显著增加趋势,增长率为0.062/10a。

(2) NDVI影响因子的显著性探测

因子探测结果显示不同植被类型区生长季NDVI主导因子不同,且影响因子在不同植被类型区解释力有所差异(图6)。影响因子对针叶林NDVI空间分布的主导作用不显著。阔叶林、灌丛、栽培植被分布区,主导因子均为湿度,解释力高于33%,其次为降水(解释力高于31%)。草地、栽培植被分布区解释力排在前三位的影响因子均为水分因子,包括降水、湿度、水汽压。温度对生长季NDVI空间分布的控制作用小于水分条件,其原因在于京津冀地区植被生长季为4-9月,该时段内温度处于植被生长的适宜温度,水分条件是植被生长的限制因子。降水对各植被类型NDVI的解释力由大到小排序为:草地>栽培植被>灌丛>阔叶林>针叶林。标准化降水蒸散指数SPEI对各植被类型NDVI的解释力由大到小排序依次为:草地>灌丛>阔叶林>栽培植被>针叶林。针叶林具有耐寒、耐旱特征,对SPEI敏感性较低,栽培植被受人为灌溉等活动影响较大,对SPEI敏感性亦较弱。坡度、海拔、坡向等地

表5 2006-2015年京津冀地区不同地貌形态类型区生长季NDVI影响因子交互作用q值

Tab. 5 The interaction *q* values of the influencing factors of NDVI in different geomorphological areas in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

	平原	台地	丘陵	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地
主导交互作用1	日照时数∩水汽压	湿度∩日照时数	平均温度∩湿度	降水∩土地利用	湿度∩土地利用	土地利用∩降水
<i>q</i> 值	0.586	0.755	0.760	0.634	0.587	0.570
主导交互作用2	日照时数∩湿度	湿度∩干旱指数	降水∩土地利用	湿度∩土地利用	降水∩土地利用	土地利用∩湿度
<i>q</i> 值	0.575	0.744	0.758	0.606	0.579	0.513
主导交互作用3	降水∩湿度	湿度∩土地利用	日照时数∩湿度	湿度∩平均温度	湿度∩日照时数	降水∩海拔
<i>q</i> 值	0.539	0.743	0.750	0.596	0.502	0.485

表6 2006-2015年京津冀地区不同地貌类型区生长季NDVI及其变率均值

Tab. 6 Averages of NDVI and its variability in different geomorphological areas in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

	针叶林	阔叶林	灌丛	草地	栽培植被
均值	0.7360	0.7480	0.7370	0.6200	0.6610
变率/a	0.0085	0.0077	0.0088	0.0080	0.0062
变率显著性	极显著	极显著	极显著	极显著	显著

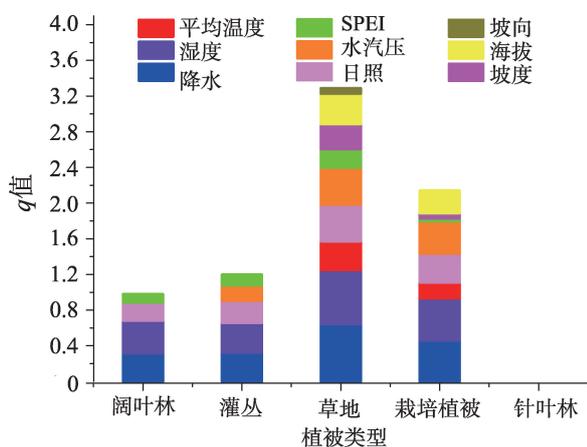


图6 2006–2015年京津冀地区不同植被类型分布区生长季NDVI影响因子 q 值

Fig. 6 The q value of the influencing factors of NDVI in the growing season for different vegetation types in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006-2015

形因子对针叶林、阔叶林、灌丛植被类型分布区主导因素不显著。海拔对草地、栽培植被生长季NDVI的解释力均高于25%；坡度对草地的解释力为28%，但在栽培植被地区仅为5.8%；坡向仅在草地地区对NDVI空间分布具有显著的解释力，为6%。

(3) NDVI影响因子交互作用探测

不同植被类型区因子的交互作用均会增强对生长季NDVI空间分布的解释力(表7)。尽管单因子对针叶林分布区生长季NDVI解释力较低且不显著，但双变量交互作用会大大增强影响因子对针叶林生长季NDVI的解释力，呈非线性增强趋势，排在前三位的主导因子解释力均高于0.550，交互因子均为水分因子叠加地形因子。湿度与其他因子的协同作用在阔叶林、灌丛、栽培植被地区较为显著，排在前三位的主导因子均为湿度与其他因子的交互作用。草地地区，降水与其他因子的交互作用较为显著，排在前三位的主导交互作用均为降水叠加

某一影响因子，解释力均高达0.720以上。

4 讨论

本研究发现京津冀地区过去十年间NDVI呈显著上升趋势，生长季NDVI增加速率为0.069/10a，李卓等^[19]研究了2005–2015年生长季的NDVI变化趋势，结果表明NDVI以0.065/10a的速率呈显著上升趋势，与本文研究结果较为一致。孟丹等^[20]采用偏相关和复相关方法研究了京津冀地区NDVI变化特征及驱动力，结果表明降水对植被的影响大于温度，且区域内植被覆盖变化主要受非气候因子驱动，前者与本研究结论一致，后者与本研究存在一定差异。原因在于偏相关及复相关方法是基于时间尺度的相关分析，侧重于NDVI时间变化的归因，而地理探测器方法是基于空间尺度的归因分析，侧重于NDVI空间分布的定量归因，为减弱气候波动带来的误差，本文采用影响因子的十年均值参与计算，因此地理探测器方法在一定程度上忽略了人类活动变化引起的植被变化。虽然本文选取了土地利用作为人类活动因素的指标进行了定量归因，但人类活动对于植被生长的影响十分复杂。特别是随着城市化的不断发展，人类活动的范围和强度不断增加，如人口迁移、农业政策、耕作措施等均会对植被生长造成一定影响。因此，细化人类活动对植被生长的影响，聚焦关键人类活动因子，消除或减弱影响植被生长的不利因素，对于区域生态安全具有重要意义。充分考虑人类活动对植被生长的影响，及植被空间分布与时间动态变化的耦合分析将是下一步工作的重点。

植被对气候因子的响应具有季节差异(图3)。冬季，平均温度较低，甚至低于部分植被的发育起

表7 2006–2015年京津冀地区不同地貌形态类型区生长季NDVI影响因子交互作用 q 值

Tab. 7 The interaction q value of the influencing factors of NDVI in different geomorphological areas in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2015

	针叶林	阔叶林	灌丛	草地	栽培植被
主导交互作用1	湿度∩海拔	湿度∩海拔	湿度∩平均温度	降水∩平均温度	湿度∩水汽压
q	0.646	0.556	0.488	0.727	0.587
主导交互作用2	降水∩海拔	湿度∩平均温度	湿度∩日照时数	降水∩海拔	湿度∩平均温度
q	0.571	0.536	0.486	0.726	0.575
主导交互作用3	湿度∩坡度	湿度∩坡度	湿度∩水汽压	降水∩坡度	湿度∩日照时数
q	0.556	0.525	0.485	0.725	0.569

点温度, 植被生长缓慢, 对水分、光照等因子的需求减弱, 因此除平均温度外, 降水、湿度、日照、水汽压等气候因子对NDVI的解释力均在冬季达到最低。平均温度对植被生长的解释力在夏季最低, 仅能解释8.8%的NDVI空间分布, 原因在于京津冀地区属于温带大陆性气候, 夏季高温多雨, 温度不再是植被生长的限制因子, 且升温对植被生长具有正负效应^[49], 适度增温能够提高光合作用效率, 从而促进植被生长; 负效应在于温度上升会增加水分消耗而影响植物生长, 且高温会造成部分植物体内酶加速变性, 抑制植被生长。温度在夏季对植被生长表现出的正负效应使得平均温度对NDVI的解释力降低, 此时湿度、降水等水分因子是影响NDVI的主导气候因子, 春季土地利用类型对于NDVI的影响较其他季节弱, 仅能解释9.4%的NDVI空间分布。春季植被开始生长, 由于降水、湿度、温度、日照等气象因子及海拔、坡度、坡向等地形因子空间分布的异质性, 不同植被的生长状况有所差异, 即使是相同植被处于不同的气候、地形背景下其生长速率亦有所区别。因此, 同一土地利用类型, 其春季植被覆盖度差别明显。土地利用类型对NDVI的解释力降低。尽管在微观尺度上, 不同坡向接收太阳能辐射大小不同, 同时由于山脉的阻隔, 不同坡向上的气流降水存在差异^[53], 导致不同坡向植被类型及生长状况有所差异, 但在区域尺度上, 坡向对NDVI的解释力在不同时段均不显著。

受复杂的气候、地形、人类活动等要素的综合影响, 植被对环境因子的响应机制存在显著的空间异质性。如山地丘陵区, 随着地形起伏度的上升, 温度对生长季NDVI空间分布的解释力逐渐降低(图5)。其原因在于, 随着地形起伏度的上升, 温度不仅呈现出水平地带性分异规律, 且呈现出垂直地带性分异规律, 温度的空间异质性增强, 而植被常以群落形式分布, 此时同一温度分层条件下, NDVI数值差异相对加大, 因此温度对NDVI空间分布的解释力降低。土地利用类型在地势相对平坦地区, 包括平原、台地、丘陵区, 对NDVI空间分布的解释力不显著, 其原因在于这3种地貌类型区主要用地类型为耕地, 分别占地貌区总面积的74.87%、70.33%、42.82%, 植被区总面积的96.47%、79.18%、45.30%(图4)。由于作物种类、生长状况、耕作方式均有差异, 因此即使土地利用类型均为旱地, 其

内部NDVI差异较大, 土地利用类型对NDVI解释力较低, 甚至呈现不显著特征。

5 结论

本文基于MODIS-NDVI遥感数据, 结合2006–2015年气象、土地利用、地形数据, 利用趋势分析法、地理探测器方法对京津冀地区不同季节NDVI、不同地貌类型区、不同植被类型区生长季NDVI进行趋势分析及定量归因, 揭示了10年间植被时空分布格局, 及植被对气候、非气候因素响应的季节差异与区域差异。地理探测器方法的应用不仅能够量化影响因子对NDVI的解释力, 且能够量化因子间交互作用对NDVI的影响, 更加全面、准确地揭示影响因子对NDVI的影响程度及作用机制。本文主要结论如下:

(1) 2006–2015年京津冀地区植被覆盖区NDVI呈现增长趋势, 年均NDVI增长率为0.107/10a, 生长季NDVI增长速率为0.069/10 a。NDVI及其变率空间分布不均衡。例如, 山地丘陵区, 随着地形起伏度的上升, 生长季NDVI呈上升趋势。不同植被类型区, 阔叶林分布区生长季NDVI最高, 灌丛、针叶林次之, 草地地区生长季NDVI最低。

(2) NDVI主导因子具有季节差异。水汽压是春季NDVI空间分布的主导因子, 湿度是夏、秋两季的主导因子, 土地利用是冬季的主导因子。年尺度上, 降水是NDVI的主导因子, 降水与土地利用的交互是NDVI的主导交互因子。平均温度对NDVI的解释力在夏季最低, 降水对NDVI的解释力在冬季最低。

(3) 影响因子对生长季NDVI的解释力因不同地貌类型区而差异显著。例如山地丘陵区, 随着地形起伏度的增加, 温度对NDVI的解释力呈下降趋势, 即 q 值表现为: 丘陵>小起伏山地>中起伏山地>大起伏山地。

(4) 不同植被类型区, 生长季NDVI空间分布影响机制差异显著。针叶林地区, 影响因子单要素主导作用不显著, 水分条件和地形因子的协同作用是主导交互作用因子, 对NDVI空间分布的解释力达到55%以上。降水对植被生长的影响大于平均温度, 对生长季NDVI空间分布的解释力排序如下: 草地>栽培植被>灌丛>阔叶林>针叶林。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云.1982-1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J].地理学报,2003,58(1):119-125. [Piao S L, Fang J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999[J]. *Acta Geographica Science*, 2003,58(1): 119-125.]
- [2] 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. [Wang Y C, Sun Y L, Wang Z L. Spatial-temporal change in vegetation cover and climate factor drivers of variation in the Haihe River Basin in 1998-2011[J]. *Resources Science*, 2014,36(3):594-602.]
- [3] 陈效速,王恒.1982-2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].地理学报,2009,64(1):84-94. [Chen X Q, Wang H. Spatial and temporal variation belts and vegetation cover degrees in inner Mongolia from 1982 to 2003 [J]. *Acta Geographica Science*, 2009,64(1):84-94.]
- [4] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming[J]. *Nature*, 2008,451(7174):49-52.
- [5] Penuelas J, Rutishauser T, Filella I. Phenology feedbacks on climate change[J]. *Science*,2009,324(5929):887-888.
- [6] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity[J]. *Philosophical Transactions Biological Sciences*,2010,365(1555):3227.
- [7] 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. [Jia B Q. Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(5):1654-1666.]
- [8] 杜加强,舒俭民,张林波,等.黄河上游不同干湿气候区植被对气候变化的响应[J].植物生态学报,2011,35(11):1192-1201. [Du J Q, Shu J M, Zhang L B, et al. Responses of vegetation to climate change in the headwaters of China's Yellow River Basin based on zoning of dry and wet climate[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011,35 (11):1192-1201.]
- [9] 杨思遥,孟丹,李小娟,等.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,2018,38(3):1028-1039. [Yang S Y, Meng D, Li X J, et al. Multi-scale response of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought in North China in 2001-2014[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(3):1028-1039.]
- [10] Schwartz M D. Green-wave phenology[J]. *Nature*,1998, 394(6696):839-840.
- [11] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe [J]. *Nature*,1999,397(6721): 659.
- [12] Arneth A. Climate science: Uncertain future for vegetation cover[J]. *Nature*,2015,524(7563): 44-45.
- [13] 成方妍,刘世梁,尹艺洁,等.基于MODIS NDVI的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J].生态学报,2017,37(3):788-797. [Cheng F Y, Liu S L, Yin Y J, et al. The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi based on MODIS NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(3):788-797.]
- [14] 刘军会,高吉喜,王文杰.青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J].山地学报,2013,31(2):234-242. [Liu J H, Gao J X, Wang W J. Variations of vegetation coverage and its relations to global climate changes on the Tibetan Plateau during 1981—2005[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013,31(2):234-242.]
- [15] Zhang Y, Song C, Band L E, et al. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening?[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,191:145-155.
- [16] Zhu Z, Piao S, Myneni R B, et al. Greening of the Earth and its drivers[J]. *Nature Climate Change*,2016,6(8):791-795.
- [17] 京津冀协同发展领导小组.京津冀协同发展规划纲要[R].北京:中共中央政治局,2015. [Leading group for coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei region. Outline of the plan for coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei region[R]. Beijing: Political Bureau of the Central Committee of the Communist Party of China, 2015.]
- [18] 王静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响[J].生态学报,2017,37(21):7019-7029. [Wang J, Zhou W Q, Xu K P, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation cover and its relationship with urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei megaregion from 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(21): 7019-7029.]
- [19] 李卓,孙然好,张继超,等.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J].生态学报,2017,37(22):7418-7426. [Li Z, Sun R H, Zhang J C, et al. Temporal-spatial analysis of vegetation coverage dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(22):7418-7426.]
- [20] 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. [Meng D, Li X J, Gong H L, et al. Analysis of spatial-temporal change of NDVI and its climatic driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei metropolis circle from 2001 to 2013[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015,17

- (8):1001-1007.]
- [21] 晏利斌,刘晓东.1982-2006年京津冀地区植被时空变化及其与降水和地面气温的联系[J].生态环境学报,2011,20(2):226-232. [Yan L B, Liu X D. Spatial-temporal changes in vegetation cover and their relationships with precipitation and surface air temperature over Beijing-Tianjin-Hebei region from 1982-2006[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011,20(2):226-232.]
- [22] 韦振锋,任志远,张翀,等.西北地区植被覆盖变化及其与降水和气温的相关性[J].水土保持通报,2014,34(3):283-289. [Wei Z F, Ren Z Y, Zhang C, et al. Changes of vegetation cover and its correlation with precipitation and temperature in Northwest China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(3):283-289.]
- [23] 张琪,袁秀亮,陈曦,等. 1982-2012年中亚植被变化及其对气候变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(1):13-23. [Zhang Q, Yuan X L, Chen X, et al. Vegetation change and its response to climate change in Central Asia from 1982 to 2012[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1):13-23.]
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134. [Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.]
- [25] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等.植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J].生态学报,2018,38(6):2229-2238. [Ji-ao K W, Gao J B, Wu S H et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):2229-2238.]
- [26] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.
- [27] 韩冬,乔家君,马玉玲.基于空间界面视角的新时期乡村性空间分异机理——以河南省巩义市为例[J].地理科学进展,2018,37(5):655-666. [Han D, Qiao J J, Ma Y L. Rurality spatial differentiation mechanism in the new era based on the perspective of spatial interface: A case study of Gongyi City, Henan Province[J]. Progress in Geography, 2018,37(5):655-666.]
- [28] 谢帅,刘士彬,段建波,等. OSDS 注册用户空间分布特征及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2016,18(10):1332-1340. [Xie S, Liu S B, Duan J B, et al. Spatial distribution characteristics of OSDS registered users and its influencing factors[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(10):1332-1340.]
- [29] 通拉嘎,徐新良,付颖,等.地理环境因子对螺情影响的探测分析[J].地理科学进展,2014,33(5):625-635. [Tong L G, Xu X L, Fu Y, et al. Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model [J]. Progress in Geography, 2014,33(5):625-635.]
- [30] 熊俊楠,赵云亮,程维明,等.四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1443-1456. [Xiong J N, Zhao Y L, Cheng W M, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1443-1456.]
- [31] Wang J F, Xu C D, Tong S L, et al. Spatial dynamic patterns of hand-foot-mouth disease in the People's Republic of China[J]. Geospat Health, 2013,7(2):381-390.
- [32] 李媛媛,徐成东,肖革新,等.京津唐地区细菌性痢疾社会经济影响时空分析[J].地球信息科学学报,2016,18(12):1615-1623. [Li Y Y, Xu C D, Xiao G X, et al. Spatial-temporal analysis of social-economic factors of bacillary dysentery in Beijing-Tianjin-Tangshan, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(12):1615-1623.]
- [33] Zhou C, Chen J, Wang S. Examining the effects of socio-economic development on fine particulate matter (PM_{2.5}) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique[J]. Science of the Total Environment, 2017,619:436-445.
- [34] 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. [Xiao J Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of South China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(24):8799-8812.]
- [35] 李俊刚,闫庆武,熊集兵,等.贵州省煤矿区植被指数变化及其影响因子分析[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):374-378. [Li J G, Yan Q W, Xiong J B, et al. Variation of vegetation index in coal mining areas in Guizhou province and its affecting factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016,32(3):374-378.]
- [36] 何腾飞,王秀兰,宋亚男.基于高光谱遥感的京津冀地区植被分布规律及影响因素分析[J].林业调查规划,2014,39(5):15-19. [He T F, Wang X L, Song Y N. Vegetation distributional pattern and influence factors analysis in Beijing-Tianjin-Hebei area based on hyperspectral remote sensing[J]. Forest Inventory and Planning, 2014,39(5):15-19.]
- [37] 刘志红, Li L T, Tim R M, 等.专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100. [Liu Z H, Li L T, Tim R M, et al. Introduction of the pro-

- fessional interpolation software for meteorology data: Ausplin[J]. *Meteorological Monthly*, 2008,34(2):92-100.]
- [38] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. *Global Change Biology*, 2006,12(4):672-685.
- [39] Chen X, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China[J]. *Global Change Biology*, 2005,11(7):1118-1130.
- [40] 王宏,李晓兵,李霞,等.基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化[J].*生态学报*,2015,27(2):504-515. [Wang H, Li X B, Li X, et al. The variability of vegetation growing season in the Northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(2):504-515.]
- [41] 周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究[J].*地球信息科学学报*,2009,11(6):707-724. [Zhou C H, Cheng W M, Qian J K, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009,11(6):707-724.]
- [42] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. *International Journal of Climatology*, 2014,34(10):3001-3023.
- [43] 陈亮,陈世俭,蔡晓斌,等.基于时序NDVI的三峡库区植被覆盖时空变化特征分析[J].*华中师范大学学报(自然科学版)*, 2017(3):407-415. [Chen L, Chen S J, Cai X B, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics of vegetation cover in the Three Gorges Reservoir Area based on time series NDVI data[J]. *Journal of Central China Normal University*, 2017(3):407-415.]
- [44] 毕硕本,计晗,陈昌春,等.地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J].*地理科学进展*,2005,34(1):118-127. [Bi S B, Ji H, Chen C C, et al. Application of geographical detector in human-environment relationship study of prehistoric settlements[J]. *Progress in Geography*, 2005,34(1):118-127.]
- [45] Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,1(1):161-173.
- [46] Gao J B, Wang H. Temporal analysis on quantitative attribution of Karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China[J]. *Catena*, 2019, 172:269-377.
- [47] 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. [Feng M, Sun Y L, Liu B, et al. Correlation between NDVI and different climate indices in North China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(1):246-251.]
- [48] 张学珍,戴君虎,葛全胜.1982-2006年中国东部春季植被变化的区域差异[J].*地理学报*,2012,67(1):53-61. [Zhang X Z, Dai J H, Ge Q S. Spatial differences of changes in spring vegetation activities across Eastern China during 1982-2006[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1):53-61.]
- [49] 戈峰.现代生态学,第2版[M].北京:科学出版社,2008:41-41. [Ge F. *Modern Ecology*, the second version[M]. Beijing: Science Press, 2008:41-41.]