



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目: 京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析
作者: 孟琪, 武志涛, 杜自强, 张红
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.018
收稿日期: 2021-02-17
网络首发日期: 2021-05-26
引用格式: 孟琪, 武志涛, 杜自强, 张红. 京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析. 应用生态学报. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202108.018>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

京津风沙源区不同分区植被覆盖度变化及归因分析

孟琪¹ 武志涛^{1*} 杜自强¹ 张红²

(¹山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; ²山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

*通信作者 E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn

摘要 以 2000—2018 年 MODIS NDVI 影像为数据源, 基于像元二分模型估算京津风沙源区植被覆盖度 (FVC), 分析京津风沙源区 FVC 的时空变化特征, 并结合自然因素和人类活动, 运用地理探测器模型探究自然、人类活动对区域尺度 FVC 空间分布的影响。结果表明: 2000—2018 年, 京津风沙源区 FVC 呈增加趋势, 增长速率为 0.013 (10 a)⁻¹, 植被增加率为 8.2%, FVC 较高的区域在燕山丘陵山地水源保护区, 其次是农牧交错带沙化土地治理区和浑善达克沙地治理区, FVC 较低的区域为北部干旱草原沙地治理区。不同分区各驱动因子对 FVC 空间分布的解释力不同。自然因素中, 年降水量是控制北部干旱草原治理区、浑善达克沙地治理区和燕山丘陵山地水源保护区 FVC 空间分布的主要驱动因子, 坡度是控制农牧交错带沙化土地治理区的主要驱动因子; 人类活动中, 年末大牲畜头数是控制北部干旱草原治理区和农牧交错带沙化土地治理区 FVC 空间分布的主要驱动因子, 人口密度是控制浑善达克沙地治理区和燕山丘陵山地水源保护区 FVC 空间分布的主要驱动因子; 其他因子对 FVC 空间分布的影响则存在区域差异。交互探测器结果显示, 双因子交互作用以双协同作用和非线性协同作用为主。人类活动与年降水量、坡度等自然因素的共同作用能够更充分地解释 FVC 空间分布。风险探测器识别的适宜植被生长的范围为年降水量 316.4~486.0 mm、平均相对湿度 48.4%~57.6%、年均温 2.5~7.9 °C 的区域, 其他驱动因子则在不同分区之间存在差异。

关键词 植被覆盖度; 自然因素; 人类活动; 地理探测器; 京津风沙源工程区

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.018

Variation in fractional vegetation cover and its attribution analysis of different regions of Beijing-Tianjin Sand Source Region, China.

MENG Qi¹, WU Zhi-tao^{1*}, DU Zi-qiang¹, ZHANG Hong²

(¹Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; ²College of Environment and Resource Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract In this study, based on the MODIS NDVI data from 2000 to 2018, we estimated the fractional vegetation cover (FVC) by using the dimidiate pixel model and analyzed the spatiotemporal characteristics of FVC in the Beijing-Tianjin sand source region (BTSSR). The geographical detector model was used to detect the impacts of natural and human factors on FVC spatial distribution at the regional scale. The results showed that the FVC of the BTSSR showed an increasing trend from 2000 to 2018, with an annual growth rate of 0.013 (10 a)⁻¹ and the vegetation increase rate of 8.2%. The areas with high FVC were concentrated in the Yanshan Mountain Water Source Protection Area, followed by the Pastoral Transitional Zone Desertified Land Control Area and the Otindag Sandy Land Area. The area with poor FVC was concentrated in the Northern Arid Grassland Area. Different driving factors in different regions had different explanatory power to FVC. Among the natural factors, annual precipitation was the main driving factors controlling the spatial distribution of FVC in the Northern Arid Grassland Area, the Otindag Sandy Land Area and the Yanshan Mountain Water Source Protection Area. Slope was the main driving factor controlling the spatial distribution of FVC in the Pastoral Transitional Zone Desertified Land Control Area. In human activities, the number of large livestock at the year-end was the main driving factor controlling the spatial

收稿日期: 2021-02-17

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目 (41977412, U1810101, 41871193) 和山西省高等学校科技创新项目 (2020L0014) 资助

作者简介: 孟琪, 女, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事植被变化与生态遥感研究。E-mail: mengqi4028@163.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41977412, U1810101, 41871193) and the Scientific and Technological Innovation Project of Higher Education Institutions in Shanxi Province (2020L0014).

网络首发时间: 2021-05-26 13:23:18 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20210525.1446.002.html>

distribution of FVC in the Northern Arid Grassland Area and the Pastoral Transitional Zone Desertified Land Control Area, and the population density was the main driving factor controlling the spatial distribution of FVC in the Otindag Sandy Land Area and the Yanshan Mountain Water Source Protection Area. There were regional differences in the influence of other factors on FVC spatial distribution. The results of the interaction detector showed that the two-factor interactions were mainly the double-synergy and nonlinear synergy. The interaction of human activities with annual precipitation and slope could more fully explain the spatial distribution of FVC. The range of suitable vegetation growth identified by the risk detector was the area with 316.4-486.0 mm of annual precipitation, 48.4%-57.6% of average relative humidity and 2.5-7.9 °C of average annual temperature, while other driving factors were different in different zones.

Key words fractional vegetation cover; natural factor; human activity; geographical detector model; Beijing-Tianjin sand source region.

植被是陆地生态系统重要组成部分,是联结大气、水、生物、岩石、土壤等自然地理环境要素的纽带^[1]。植物通过光合作用进行物质循环、能量流动和信息传递,为人类的生存和发展提供环境和物质资源,同时也为其他生物的繁衍和栖息提供食物和场所^[2]。植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[3]。植被是干旱区生态建设中的重要部分,而覆盖度是评判生态环境状况的重要指标^[4]。获取地表植被覆盖度及其变化信息,对于揭示地表空间变化规律、探讨变化的驱动因子、评价区域生态环境具有重要的现实意义^[5]。

近年来,基于遥感影像数据对 FVC 空间分布特征与影响因素研究有了很大进展,如王金强等^[6]基于 TM/OLI 影像数据,分析了西北干旱内陆绿洲区的 FVC 和植被变化情况;韩富圆等^[7]基于 Landsat 遥感数据,对武汉地区 FVC 的变化进行检测分析;裴志林等^[8]采用 MODIS NDVI 数据计算黄河上游 FVC,并分析了空间分布状况及变化特征。这些研究揭示了 FVC 的空间分异特征,并采用相关分析^[9]、残差分析^[10]等方法定性或半定量地分析了 FVC 变化的驱动因素,而对驱动因子是如何影响 FVC 空间分布变化的定量研究尚少。地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法,不仅能够定量分析各个因子所占的权重,还能分析多因子之间的交互作用^[11],探测两因子交互作用是地理探测器模型的独特优势^[12]。

以往的相关研究对认识植被变化的自然驱动力具有重要意义。实际上,随着人类活动对自然环境干预强度的不断加大,植被变化不仅受自然因素的影响,人类活动对植被变化的影响也在逐渐增大。因此,本研究在分析京津风沙源区 FVC 驱动因子时,不仅考虑自然因素对植被变化的影响,也选取了部分人类活动因子来量化人类活动对植被的影响。本研究基于 MODIS NDVI 遥感数据,采用像元二分模型法估算京津风沙源区 FVC,分析 2000—2018 年京津风沙源区 FVC 时空变化格局,利用地理探测器模型对京津风沙源区 FVC 驱动因子及影响力进行探测,分析研究区 FVC 变化的驱动力,以期京津风沙源区生态安全和植被恢复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

京津风沙源区是国家为改善和优化京津及周边地区生态环境状况、减轻风沙灾害而划分的生态建设工程治理区^[13]。京津风沙源区(38°50'—46°40' N、109°30'—119°20' E)涵盖北京、天津、河北、山西、内蒙古(自治区、直辖市)的 75 各县(旗、市、区),国土总面积 45.8 万 km²^[14-15]。该区地貌类型多样,地势西高东低,分布有山地、丘陵、盆地,山川相间,盆地四周断层发育,坡度较陡;山地海拔较高,坡度陡峻,丘陵面积辽阔,黄土覆盖^[16]。研究区气候类型复杂多样,包含暖温带半湿润区、温带半湿润区、温带半干旱区、温带干旱区,冬季寒冷干燥而漫长,夏季炎热多雨而短暂^[17],年平均气温 7.5 °C,年均降水量 459.5 mm,由东南向西北递减,全年降水不均,多集中在夏季^[18]。年均蒸发量约 2500 mm,约为年降水量的 5 倍^[19];春季多风沙天气,占全年大风日数的 70%,是京津地区沙尘的主要来源之一^[20]。根据地貌类型和植被覆盖,京津风沙源工程区分为北部干旱草原治理区、浑善达克沙地治理区、农牧交错带沙化土地治理区和燕山丘陵山地水源保护区 4 个亚区(图

1)。

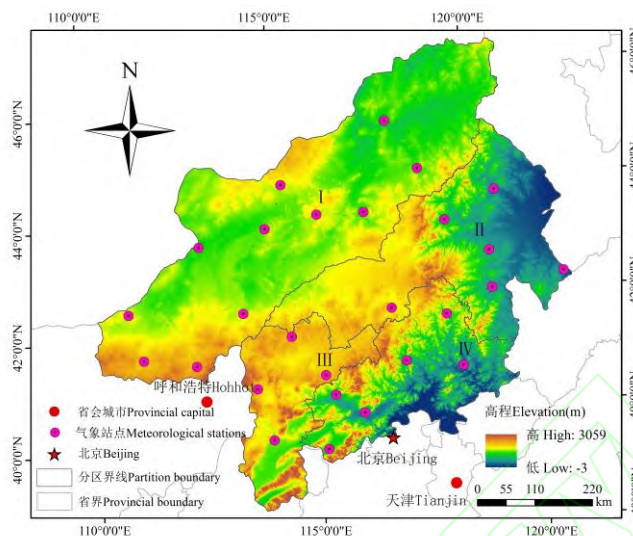


图1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of the study area.

I: 北部干旱草原治理区 Northern arid grassland area; II: 浑善达克沙地治理区 Otindag sandy land area; III: 农牧交错带沙化土地治理区 Pastoral transitional zone desertified land control area; IV: 燕山丘陵山地水源保护区 Yanshan mountain water source protection area.
下同 The same below.

1.2 数据来源与预处理

本研究采用美国 USGS 数据中心 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 发布的时间分辨率为 16 d、空间分辨率为 250 m 的 MOD13Q1 数据产品, 研究区覆盖 8 景影像, 分别为 h25v03、h25v04、h26v03、h26v04、h26v05、h27v03、h27v04、h27v05, 采用最大值合成法合成逐月 NDVI 数据集。气候数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的中国地面气候资料月值数据集, 包括年降水量、年均温、平均相对湿度, 采用反距离权重插值法 (inverse distance weight, IDW) 对气象数据进行空间插值, 插值处理后的栅格空间分辨率为 90 m。数字高程模型 (DEM) 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据网 (<http://dwtkns.com/srtm/>), 空间分辨率为 90 m, 使用 ArcGIS 中的 3D 分析模块提取坡度信息。标准化降水蒸散指数 (SPEI) 是反映区域干旱情况的重要指标, 本研究将选取的地面气象站的逐日气候资料处理为逐月气候资料, 并采用 Thornthwaite 方法计算获得干旱指数数据集。

各旗、县 2000—2018 年的年末大牲畜头数、人口密度数据源于《内蒙古统计年鉴》^[21]、《山西省统计年鉴》^[22]、《河北省统计年鉴》^[23]、《北京市统计年鉴》^[24]、《天津市统计年鉴》^[25]。因为京津风沙源治理工程于 2002 年全面启动, 所以各县累计造林面积数据选自 2002—2018 年《中国林业统计年鉴》^[26]。

FVC 实测数据采用传统的针刺法 (图 2), 即选择 30 m×30 m 的刻度样线, 每隔 1 m 用探针垂直下刺, 若有植物, 记作 1, 无则记作 0, 然后计算其盖度^[13]。每个采样地点均通过 GPS 进行定位, 然后在 ArcGIS 中将所有采样点空间矢量化。基于采样点提取相应的栅格值, 野外实测 FVC 数据与 MODIS 估算得到的 FVC 值进行相关分析, 以此来验证 MODIS NDVI 数据的精度。

由于数据源和空间分辨率不同, 结合模型的运算能力与研究任务的精度要求, 基于最邻近距离法对数据进行重采样^[27]。由于地理探测器模型输入的自变量必须为离散型数据, 因此, 基于标准差分级法对数据进行离散化处理。

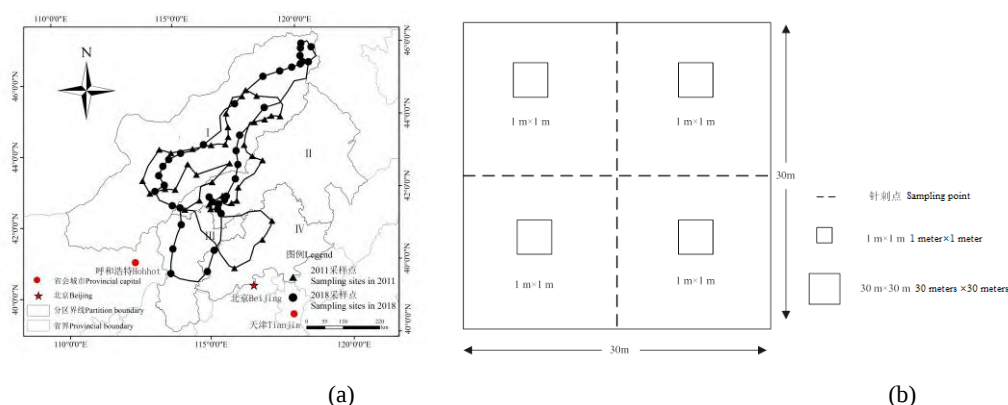


图2 野外采样点 (a) 与样地样方设计方案 (b)
Fig.2 Field sampling points (a) and the design of sample plot and quadrat (b).

1.3 植被覆盖度计算

像元二分模型假设每个像元的光谱信息均是纯植被和纯土壤两种组分以面积比例加权而成的线性组合^[28], 即;

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的 NDVI 值。理论上 $NDVI_{soil}$ 值应该接近 0, $NDVI_{veg}$ 代表全植被覆盖像元的最大值, 但是由于受光照条件、时空变化、影像质量、植被类型等众多因素影响, $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的实际值会发生变化。在运用像元二分模型估算 FVC 时, 通常根据经验取置信区间内 NDVI 的最小值和最大值为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$, 本研究采用 0.5% 的置信度截取 NDVI 的上下阈值, 选取累计频率为 0.5% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$, 累计频率 99.5% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{veg}$ 估算京津风沙源区的 FVC。

根据研究区实际情况, 同时参考前人^[29-31]研究相关或类似区域 FVC 的分类标准, 将 FVC 分为 4 类, 分别是无植被覆盖度 ($0 \leq FVC \leq 0.05$)、低植被覆盖度 ($0.05 < FVC \leq 0.25$)、中植被覆盖度 ($0.25 < FVC \leq 0.5$) 和高植被覆盖度 ($FVC > 0.5$)。

1.4 植被变化率计算

植被变化率指某时间段内植被活动整体趋势的变化^[32], 计算公式如下:

$$RCR = Slope / mean \times N \times 100\% \quad (2)$$

式中: RCR 为植被的变化率; Slope 为 N 年植被指标变化的斜率; mean 为 N 年植被指标的平均值; N 是时间序列长度。

1.5 地理探测器

地理探测器能够探测各因子对模型的贡献率, 能从庞大的空间数据库中提取有用的空间关联规则^[12]。运用地理探测器模型, 将 FVC 作为因变量, 计算研究区 FVC 分异决定力值 (q), 其模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2}{n \sigma^2} \quad (3)$$

式中: q 是度量空间分异性的指标; h ($=1, 2, \dots, L$) 为分类数目; n_h 和 n 分别为层 h 和全区的样本单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的方差。 q 值范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 说明影响因子对 FVC 的解释力越强^[33]。

风险探测器用于计算各驱动因子在不同子区域的 FVC 均值, 并进行显著性检验, 均值显著性越大的子区域, FVC 越大, 用于识别 FVC 好的区域^[34]。

交互作用探测用于识别不同因子 X (年降水量、年均温、平均相对湿度、坡度、年末大牲畜头数、人口密度、累计造林面积) 间的双因子交互作用对 Y (FVC) 的空间分异解释力是增强还是减

地理探测器正确引用:

- [1] Wang JF, Li XH, Christakos G, Liao YL, Zhang T, Gu X & Zheng XY. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science 24(1): 107-127.
 - [2] Wang JF, Zhang TL, Fu BJ. 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators 67: 250-256.
 - [3] 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报 72(1): 116-134.
- [Wang JF, Xu CD. 2017. Geodetector: Principle and prospective. Acta Geographica Sinica 72(1):116-134.]

弱^[35]，交互作用结果如表 1 所示。

表1 双因子交互作用结果类型
Table1 Types of two-factor interaction result

交互作用类型 Types of interaction	q 值比较 q value comparison
非线性拮抗作用 Nonlinear antagonism	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单拮抗作用 Single antagonism	$\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$
双协同作用 Double synergy	$\text{Max}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) + q(X_2)$
独立作用 Independent action	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性协同作用 Nonliner synergy	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

X₁: 自变量 1 Independent variable 1; X₂: 自变量 2 Independent variable 2.

1.6 指标选取及信息提取

1.6.1 指标选取

有研究表明，气候因子对京津风沙源工程区植被具有显著影响，如裴亮等^[36]研究表明，京津风沙源工程区植被与降水的相关性最强；严恩萍等^[37]发现，年降水量是控制京津风沙源生态工程区植被生长的主要因子。京津风沙源区地貌差异大，山地、平原和高原是主要的地貌类型。而京津风沙源区自古以来便是牧区，过度放牧是造成植被退化的主要原因之一。2002 年正式实施京津风沙源生态治理工程，该区域成为受人类活动干扰强烈、生态环境脆弱的区域，受人类活动影响较大，鉴于以上原因，选取年末大牲畜头数、累计造林面积、人口密度等人类活动数据。依据系统性、科学性、可量化、可获取等原则，本研究选择气候、地形、人类活动 3 大类、10 个驱动因子，探测各因子对京津风沙源工程区不同分区 FVC 的影响。

1.6.2 信息提取

针对京津风沙源工程区不同分区，将各驱动因子均按照 1 标准差进行分类^[14]，其中，北部干旱草原治理区得到 31541 行数据，浑善达克沙地治理区得到 17061 行数据，农牧交错带沙化土地治理区得到 7784 行数据，燕山丘陵山地水源保护区得到 10836 行数据。此方法可确保在同样的分层条件下探究各因子对 FVC 空间分布的影响，保证不同分区之间结果的可比性。

1.7 精度验证方法

本研究采用同月份较高分辨率影像与实测数据验证相结合的方法，对基于 MODIS NDVI 数据估算的 FVC 进行验证。为了验证模型计算结果的准确性，分别使用 2011 年 7 月野外观测的 42 个采样点和 2018 年 8 月野外观测的 38 个采样点的实测数据进行相关分析。以相关系数（R²）、均方根误差（RMSE）为评价指标来验证模型模拟的精度，各指标计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{si} - \bar{C}_s)(C_{oi} - \bar{C}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{si} - \bar{C}_s)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{oi} - \bar{C}_o)^2}} \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{si} - C_{oi})^2} \tag{5}$$

式中：N 表示样本个数；C_{si} 表示模拟结果值；C_{oi} 表示实测结果值；C_o 为实测结果均值。

2 结果与分析

2.1 精度验证

由图 3 可以看出，基于像元二分模型估算的 FVC 模拟值与 2011 年 7 月和 2018 年 8 月实测 FVC 值之间的拟合精度较高，R² 分别为 0.8367 和 0.8669（P<0.05）。80 个采样点的 FVC 实测值与模拟值比较接近，均值分别为 0.49、0.55，二者相差 0.06；最小值分别为 0.14、0.12，二者相差 0.02；最大值分别为 0.97、0.95，二者相差 0.02；均方根误差为 0.09。以上指标均证明利用 MODIS NDVI 数据估算京津风沙源区 FVC 具有一定的科学性和可行性。

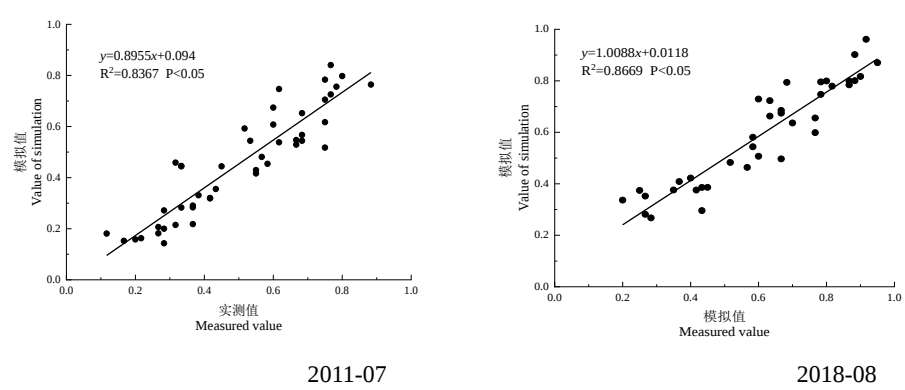


图3 FVC 实测值与模拟值的相关性
Fig.3 Correlation between observed data and simulated data.

2.2 植被覆盖度的时空分布特征

由图 4 可以看出，2000—2018 年，京津风沙源区 FVC 总体呈上升趋势，增长速率为 $0.013 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，植被增加率为 8.2%，表明生态治理工程正向作用显著。FVC 均值为 0.30，最小值出现在 2001 年（0.28），其次是 2009 年（0.28），可能是因为 2001 和 2009 年京津风沙源区发生了严重干旱事件。最大值出现在 2018 年（0.34），表明京津风沙源生态治理工程取得一定生态成效，植被生长状况得到改善。燕山丘陵山地水源保护区的 FVC 均值最高，达到 0.48，增长速率为 $0.03 (10 \text{ a})^{-1}$ ，植被增加率为 11.8%，其次是浑善达克沙地治理区和农牧交错带沙化土地治理区，FVC 均值分别为 0.33 和 0.31，增长速率分别为 0.01 和 0.02 $(10 \text{ a})^{-1}$ ，植被增加率分别为 6.4%和 13.6%，北部干旱草原治理区 FVC 均值最低，仅为 0.22，年增长速率为 $0.006 (10 \text{ a})^{-1}$ ，植被增加率为 5.3%。由平均值的年际变化趋势可以看出，京津风沙源区的 FVC 呈现波动上升趋势，FVC 基础情况逐渐向好。

由表 2 可以看出，京津风沙源 4 个分区中，无 FVC 的区域均低于所在分区面积的 1%，面积小于 1800 km^2 ，且无 FVC、低 FVC 覆盖面积均呈减少趋势；其中，北部干旱草原治理区低 FVC 覆盖区域减少最多，减少 23.0%，表明京津风沙源治理工程区植被生长状况好转，生态工程治理效益凸显，在促进植被恢复方面效果显著。中、高 FVC 覆盖面积整体呈增加趋势；但燕山丘陵山地水源保护区的中 FVC 覆盖区域减少 10.4%，北部干旱草原治理区的高 FVC 覆盖区域减少 0.1%，说明虽然一期治理工程已取得显著成效，但不同治理区的中、高植被覆盖区域仍然存在减少现象，因此有必要在二期工程实施中继续加强植被恢复工作，巩固和提升一期工程建设效果，进一步提高植被覆盖度，改善环境。

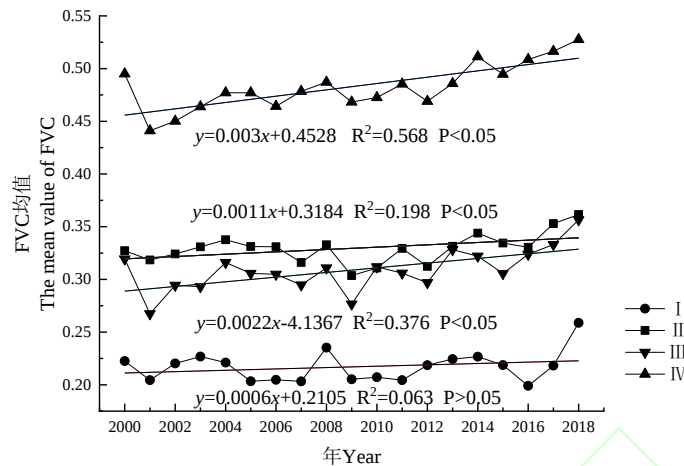


图 4 2000—2018 年不同分区 FVC 的变化特征
Fig.4 Variation characteristics of FVC in different zones from 2000 to 2018.

表2 不同分区不同类型FVC的占比
Table 2 Different FVC types for different partitions (%)

区域 Area	无 FVC No FVC		低 FVC Low FVC		中 FVC Medium FVC		高 FVC High FVC	
	2000	2018	2000	2018	2000	2018	2000	2018
I	0.3	0.1	71.3	48.4	28.1	51.4	0.3	0.2
II	0.3	0.2	19.6	9.6	74.2	82.3	5.9	7.9
III	0.3	0.1	11.0	5.4	85.0	89.8	3.8	4.8
IV	0.3	0.2	1.8	0.8	47.2	36.8	50.8	62.3

I：北部干旱草原治理区 Northern arid grassland Area; II：浑善达克沙地治理区 Otindag sandy land area; III：农牧交错带沙化土地治理区 Pastoral transitional zone desertified land control area; IV：燕山丘陵山地水源保护区 Yanshan mountain water source protection area. 下同 The same below.

2.3 基于 Geodetector 的不同分区 FVC 驱动因子

2.3.1 不同分区 FVC 驱动因子探测

基于地理探测器中的因子探测器模块，显示各驱动因子对京津风沙源不同分区 FVC 空间分异特征的影响力不同。由图 5 可以看出，北部干旱草原治理区的主要驱动因子是年降水量，解释力达到 61.2%；平均相对湿度的解释力仅次于年降水量，解释力为 52.3%，因此水分因素从空间上决定了该区域 FVC 空间分布特征，成为该区域影响植被生长状况的主要驱动因子；人类活动驱动因子中，年末大牲畜头数是影响 FVC 空间分布的主要驱动力。对浑善达克沙地治理区 FVC 空间分布影响力最大的驱动因子是年降水量，解释力为 28.2%；其次是坡度，解释力为 26.1%；在人类活动驱动因子中，人口密度的影响力最大，解释力为 18%。坡度是影响农牧交错带沙化土地治理区 FVC 空间分布的主要驱动因子，解释力为 28%，在人类活动驱动因子中，年末大牲畜头数对该区域 FVC 空间分布的影响力最大，解释力为 14.3%。影响燕山丘陵山地水源保护区 FVC 空间分布的主要自然驱动力和人类活动驱动力分别为年降水量和人口密度，解释力分别为 30.1%、8.9%，由于该区域覆盖蒙、京、津、冀等主要人口大县（区、旗），人口密度较高，人类活动频繁，因此对 FVC 空间分布状况干扰程度较大。温度虽然是影响植被生长的主要气候因素，但本研究结果表明，年均温在工程区的不同分区的解释力均低于 15%，对 FVC 空间分布的影响并不明显，与严恩萍等^[25]的研究结果一致。

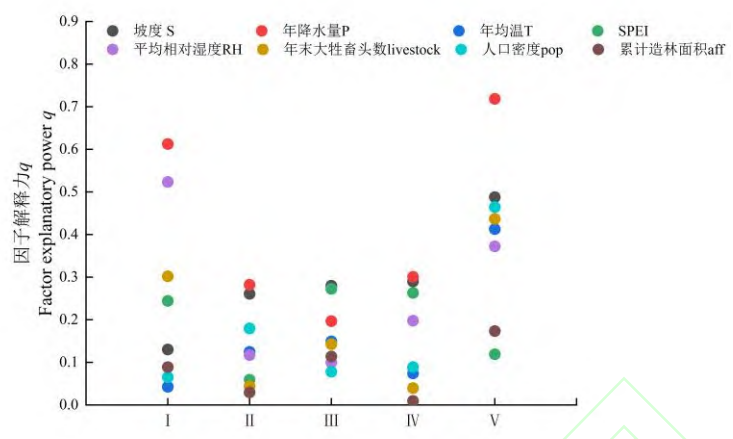


图 5 不同分区各驱动因子的决定值(q)
Fig.5 Decision value (q) of driving factors in different partitions.

V: 全区 Whole region; S: 坡度 Slope; P: 年降水量 Annual precipitation; T: 年均温 Annual mean temperature; SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; RH: 平均相对湿度 Mean relative humidity; livestock: 年末大牲畜头数 Number of large livestock at the year-end; pop: 人口密度 Population density; aff: 累积造林面积 Accumulated afforestation area.

2.3.2 植被覆盖度驱动因子交互作用

对影响研究区 FVC 的自然因子和人类活动进行交互作用探测，有利于揭示 FVC 空间分布变化的驱动机制。自然因子与人类活动因子对 FVC 变化的交互作用呈现双协同作用、非线性协同作用并存，不同分区内主导交互作用类型有差异。

将自然因子与人类活动交互作用解释力位于前 10 的进行统计。由表 3 可以看出，北部干旱草原治理区以年降水量、平均相对湿度与人类活动为主要交互作用类型，解释力均在 35%以上，意味着在不同水分条件下，人类活动对 FVC 空间分布作用的强度不同。浑善达克沙地治理区呈现各自然因素分别与人类活动交互的结果，作用类型以双协同作用和非线性协同作用为主，解释力在 30%以上。农牧交错带沙化土地治理区影响程度较大的是坡度、SPEI 与人类活动的交互，且均呈现双协同作用类型，解释力在 29%以上，说明坡度、SPEI 增强了人口密度、年末大牲畜头数、累计造林面积对 FVC 空间分布的影响。燕山丘陵山地水源保护区以年降水量、SPEI、坡度与人类活动为主要交互作用类型，以双协同作用和非线性协同作用为主，解释力在 30%以上。自然因素与人类活动的交互作用解释力均大于单因子的影响程度，说明各驱动因子对 FVC 空间分布的影响不是独立的，而是相互增强或者非线性增强。双因子交互作用对 FVC 空间分布的影响不是简单的叠加过程，而是呈现双协同作用和非线性协同作用，即相互增强和非线性增强效应。

表3 自然因素与人类活动之间的交互作用

Table 3 Interaction between natural factors and human activities

区域 Area	两因子交互 $X_1 \cap X_2$ Two-factor interaction $X_1 \cap X_2$	$q(X_1)$	$q(X_2)$	$q(X_1) \cap q(X_2)$	交互作用类型 Type of interaction
I	年降水量 $\cap$ 人口密度	0.61	0.07	0.71	非线性协同作用
	年降水量 $\cap$ 累计造林面积	0.61	0.09	0.70	双协同作用
	年降水量 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.61	0.30	0.67	双协同作用
	SPEI $\cap$ 年末大牲畜头数	0.24	0.30	0.63	非线性协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.52	0.30	0.57	双协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 人口密度	0.52	0.07	0.56	双协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 累计造林面积	0.52	0.09	0.53	双协同作用
	年均温 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.04	0.30	0.53	非线性协同作用
	坡度 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.13	0.30	0.38	双协同作用
II	SPEI $\cap$ 人口密度	0.24	0.07	0.36	非线性协同作用
	坡度 $\cap$ 人口密度	0.26	0.18	0.38	双协同作用
	年均温 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.13	0.04	0.37	非线性协同作用
	年降水量 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.28	0.04	0.37	非线性协同作用
	年降水量 $\cap$ 累计造林面积	0.28	0.03	0.34	非线性协同作用
	年均温 $\cap$ 累计造林面积	0.13	0.03	0.33	非线性协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 人口密度	0.12	0.18	0.33	非线性协同作用
	坡度 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.26	0.04	0.33	非线性协同作用
	年降水量 $\cap$ 人口密度	0.28	0.18	0.32	双协同作用
III	SPEI $\cap$ 人口密度	0.06	0.18	0.31	非线性协同作用
	年均温 $\cap$ 人口密度	0.13	0.18	0.30	双协同作用
	坡度 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.28	0.14	0.37	双协同作用
	坡度 $\cap$ 累计造林面积	0.28	0.11	0.32	双协同作用
	SPEI $\cap$ 年末大牲畜头数	0.27	0.14	0.31	双协同作用
	坡度 $\cap$ 人口密度	0.28	0.08	0.30	双协同作用
	SPEI $\cap$ 人口密度	0.27	0.08	0.30	双协同作用
	SPEI $\cap$ 累计造林面积	0.27	0.11	0.29	双协同作用
	年降水量 $\cap$ 人口密度	0.20	0.08	0.26	双协同作用
IV	年降水量 $\cap$ 累计造林面积	0.20	0.11	0.26	双协同作用
	年降水量 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.20	0.14	0.22	双协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 累计造林面积	0.10	0.11	0.22	非线性协同作用
	年降水量 $\cap$ 人口密度	0.30	0.09	0.39	双协同作用
	年降水量 $\cap$ 累计造林面积	0.30	0.01	0.38	非线性协同作用
	SPEI $\cap$ 累计造林面积	0.26	0.01	0.37	非线性协同作用
	坡度 $\cap$ 人口密度	0.29	0.09	0.35	双协同作用
	年降水量 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.30	0.04	0.35	非线性协同作用
	SPEI $\cap$ 年末大牲畜头数	0.26	0.04	0.34	非线性协同作用
V	SPEI $\cap$ 人口密度	0.26	0.09	0.34	双协同作用
	平均相对湿度 $\cap$ 累计造林面积	0.20	0.01	0.32	非线性协同作用
	坡度 $\cap$ 年末大牲畜头数	0.29	0.04	0.32	双协同作用
	坡度 $\cap$ 累计造林面积	0.29	0.01	0.31	非线性协同作用

2.3.3 植被覆盖度驱动因子的风险探测

基于地理探测器的风险探测器模块可探测各区域 FVC 的空间分布特征，能识别出 FVC 分布情况最好的区域（置信水平 95%）。FVC 均值越大，各驱动因子的特征更适合植被生长。

随着年降水量的增加，北部干旱草原治理区 FVC 均值呈先下降后上升的变化趋势，浑善达克沙地治理区和农牧交错带呈逐渐增高趋势，燕山丘陵山地水源保护区呈先上升后下降的变化趋势；随着平均相对湿度的增加，北部干旱草原治理区、浑善达克沙地治理区、农牧交错带沙化土地治理区以及燕山丘陵山地水源保护区的 FVC 均值呈现不同的波动状态；但总体而言，随着年降水量、平均相对湿度的增加，FVC 均值表现为上升趋势，分别在 316.4~486.0 mm、48.4%~57.6%时，FVC 均值达到最大，表明水分因素在上述范围内促进了植被生长，也证实了水分因素对于干旱、半干旱地区植被生长的限制作用。随着年均温的增加，京津风沙源 4 个工程区中 FVC 均值均呈先升高后降低的变化趋势，集中在 2.5~7.9 °C，FVC 均值达到最大，主要原因是气温的升高导致蒸散量增加，而蒸腾作用的加大，造成植物水分损失，植被生长受到抑制，对于受水分限制地区的植被而言产生不利影响。随着坡度的升高，北部干旱草原治理区、浑善达克沙地治理区 FVC 均值呈逐渐增加趋势，在 5.08~54.23 °时，FVC 均值达到最大；农牧交错带 FVC 均值表现为先下降后上升的变化趋势，燕山丘陵山地水源

保护区 FVC 均值表现为先上升后下降的变化趋势, 在坡度>20 °时, FVC 均值达到最大, 可能的解释是坡度影响地表径流和排水状况, 直接改变土壤的厚度和含水量。随着 SPEI 的增大, 京津风沙源工程区 4 个分区的 FVC 均值总体呈下降趋势, 在-0.6~-0.2 时, FVC 均值达到最大, 此范围属于轻微干旱, 而干旱程度的加深会对植被生长带来更大程度的限制。随着造林面积、年末大牲畜头数以及人口密度的增加, 京津风沙源 4 个工程区的 FVC 均值呈波动变化状态, 由于生态建设工程的实施, 使得人类活动与 FVC 空间分布的关系更具复杂性, 因此, 造成人类活动和 FVC 空间分布特征不一致。

表4 不同分区各驱动因子的适宜限制 (置信水平95%)
Table 4 Suitable limits of the driving factors in different partitions (95% confidence level)

驱动因子 Driving factor	I	II	III	IV
年降水量 Annual precipitation (mm)	316.4~335.3 (0.33)	405.9~442.7 (0.55)	398.0~404.9 (0.45)	460.0~486.0 (0.56)
平均相对湿度 Average relative humidity (%)	49.5~57.6 (0.27)	48.4~51.5 (0.35)	56.3~57.1 (0.32)	54.1~56.0 (0.52)
年均温 Annual average temperature (°C)	2.5~3.5 (0.23)	5.2~6.3 (0.35)	6.5~7.5 (0.34)	6.8~7.9 (0.51)
SPEI	-0.6~-0.3 (0.25)	-0.4~-0.2 (0.35)	<-0.4 (0.40)	<-0.4 (0.53)
坡度 Slope (°)	5.1~42.0 (0.29)	18.5~54.3 (0.47)	20.6~62.7 (0.44)	24.5~32.9 (0.57)
造林面积 Afforestation area (hm ²)	94231.8~165435.1 (0.23)	268946.6~357826.7 (0.34)	86352.5~159385.1 (0.37)	163176.7~240245.6 (0.49)
年末大牲畜头数 Number of large livestock at the year-end (×10 ⁴)	167.1~207.9 (0.27)	48.2~87.3 (0.36)	0~6.8 (0.33)	0~5.6 (0.51)
人口密度 Population density (person · km ⁻²)	9.6~11.3 (0.25)	109.6~139.8 (0.46)	145.3~192.7 (0.34)	561.5~922.8 (0.54)

括号中数值为各驱动因子在适宜限制范围内对应的 FVC 均值 The value in parentheses was the mean value of FVC corresponding to each driving factor within the appropriate limit range.

3 讨 论

本研究利用 FVC 数据探讨了京津风沙源不同分区 FVC 的分布状况, 使用地理探测器模型定量分析了 FVC 空间分布的主要驱动因子和不同驱动因子之间的交互作用。总体来看, 2000—2018 年, 京津风沙源区植被覆盖度趋于增加, 但空间异质性较大。其中, 北部干旱草原治理区处于干旱、半干旱气候区, 年降水量小于 200 mm, 水分缺乏且蒸发量大, 水热组合不均^[33], 再加上人类的过度放牧和工矿建设, 导致 FVC 最低。其次, 农牧交错带沙化土地治理区 FVC 较低, 该分区是京津风沙源工程的重点治理区域, 土壤疏松, 扬沙起尘情况严重, 加上不合理的放牧和毁林毁草开垦, 致使 FVC 较低, 因此, 该区域变放牧为圈养、退耕还林等工程治理措施仍需要继续推动^[38]。浑善达克沙地治理区 FVC 均值略高于农牧交错带沙化土地治理区, 根据地理探测器模型的结果可知, 坡度对该分区 FVC 的影响仅此于年降水量, 而坡度作为地形因子, 虽然对 FVC 的影响是间接的, 但坡度的平峭会影响水土的保留, 水土的多寡会直接影响地表植物的种类与多少^[39], 从而影响 FVC 的空间分布, 因此 FVC 较高。燕山丘陵山地水源保护区 FVC 最高, 可能是因为该区域的植被类型以落叶、阔叶乔木为主, 属于半湿润区, 为植被生长提供了有利的水热条件, 很大程度上提高了 FVC。

京津风沙源区应在进行科学论证的基础上, 因地制宜地进行分区治理。各分区采取不同的治理对策和措施, 如采用草畜平衡、退耕还林等植被修复技术来恢复生态, 通过移民搬迁来控制人口对资源环境的过度利用, 通过产业结构调整来推动社会经济的发展^[40]。本研究采用人口密度代表生态移民政策, 累计造林面积代表退耕还林、封山育林、飞播造林等措施, 对于小流域治理、草地治理等措施仍缺乏有效的数据来分析这些措施对京津风沙源区植被变化的影响机制^[41]; 随着财政资金对京津工程的投入力度不断加大, 研究过程中仍然缺乏有效的经济数据支撑。因此, 后续研究可以针对不同治理区采取的不同措施和对策, 选取更加具有科学性、代表性的各项宏观政策数据进行更深入的研究,

京津风沙源治理工程通过改善和优化京津及其周边地区生态环境状况, 减轻了风沙灾害, 带动了区域经济社会可持续发展。但是对京津风沙源区的生态治理仍处于起步阶段, 工程治理区尚有大量未治理的沙化土地需要治理, 沙尘天气对京津地区的危害仍没有得到根本遏制^[41]。因此, 为了巩固一

期工程建设成果,从根本上遏制京津地区沙尘危害,为经济社会可持续发展提供保障,继续推进京津风沙源工程二期具有十分重要的战略意义。

4 结 论

2000—2018 年,京津风沙源区 FVC 呈上升趋势,FVC 均值为 0.30,增长速率为 $0.013 \cdot 10 a)^{-1}$,植被增加率为 8.2%。空间上,总体呈现“东高西低”的分布特征,FVC 较高的区域集中在燕山丘陵山地水源保护区,其次是农牧交错带沙化土地治理区和浑善达克沙地治理区,FVC 较差的区域集中在北部干旱草原沙地治理区。

京津风沙源区各驱动因子对 FVC 的空间分布具有较大差异,年降水量是控制北部干旱草原沙地治理区、浑善达克沙地治理区、燕山丘陵山地水源保护区 FVC 空间分布的主要影响因素,解释力分别为 61.2%、28.2%、30.1%。坡度是控制农牧交错带沙化土地治理区 FVC 空间分布的主要影响因素,解释力为 28%。其他因子对 FVC 空间分布的影响存在区域差异。

京津风沙源不同分区自然因素与人类活动之间的交互作用均是以双协同作用和非线性协同作用为主;同时,本研究揭示了各驱动因子最适宜植被生长范围,更好地了解了各驱动因子对 FVC 的影响,为认识 FVC 空间分布的变化提供了必要参考。

风险探测器识别的适宜植被生长范围为年降水量 316.4~486.0 mm、平均相对湿度 48.4%~57.6%、年均温 2.5~7.9 °C 区域,而其他驱动因子则在不同分区之间存在差异。因此,在判断京津风沙源不同分区适宜植被生长的范围时,应充分考虑不同分区的具体情况。

责任编委 曹成有

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] 陈效述, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. 地理学报, 2009, 64 (1): 84-94 [Chen X-Q, Wang H. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64 (1): 84-94]
- [2] Wang, Q, Zhang QP, Zhou W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu County. *Physics Procedia*, 2012, 33: 1292-1297
- [3] 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. 地理科学, 2011, 31 (8): 1019-1024 [Gan C-Y, Wang X-Z, Li B-S, et al. Changes of vegetation coverage during recent 18 Years in Lianjiang River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31 (8): 1019-1024]
- [4] 游珍, 李占斌, 袁琼, 等. 干旱区植被覆盖度的建设阈值分析. 水土保持研究, 2005, 12 (3): 88-90 [You Z, Li Z-B, Yuan Q, et al. Study on the threshold of vegetation coverage in arid area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (3): 88-90]
- [5] 郭瑞霞, 尚夏明, 李煜. 基于 MODIS_NDVI 的甘肃省会宁县植被覆盖度变化监测. 甘肃科技, 2019, 35 (1): 42-45 [Guo R-X, Shang X-M, Li Y. Vegetation coverage change monitoring based on MODIS_NDVI in Huining County, Gansu. *Gansu Science and Technology*, 2019, 35 (1): 42-45]
- [6] 王金强, 李俊峰, 王昭阳, 等. 基于像元二分模型的典型绿洲区近 20 年植被覆盖变化及分析. 节水灌溉, 2019 (1): 96-101 [Wang J-Q, Li J-F, Wang Z-Y, et al. Analysis of vegetation coverage change in typical oasis area in recent 20 years based on dimidiate pixel model. *Water Saving Irrigation*, 2019 (1): 96-101]
- [7] 韩富圆, 王天明, 孙阳. 基于 Landsat 遥感数据武汉地区植被覆盖度动态变化监测分析. 测绘与空间地理信息, 2019, 42 (4): 90-92 [Han F-Y, Wang T-M, Sun Y. Monitoring and analyzing dynamic change of vegetation coverage in Wuhan Area based on Landsat remote sensing data. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2019, 42 (4): 90-92]
- [8] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素. 干旱区研究, 2019, 36 (3): 546-555 [Pei Z-L, Yang Q-K, Wang C-M, et al. Spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the Upper Reaches of the Yellow River. *Arid Zone Research*, 2019, 36 (3): 546-555]
- [9] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 等. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41 (3): 1138-1147 [Li M-L, Yin L-C, Zhang Y, et al. Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in Southwest China. *Acta Ecological Sinica*, 2021, 41 (3): 1138-1147]
- [10] 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. 地理学报, 2020, 75 (5): 961-974 [Jin K, Wang F, Han J-Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (5): 961-974]
- [11] 王正雄, 蒋勇军, 张远喆, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布与驱动因素分析. 地理学报, 2019, 74 (5): 1025-1039 [Wang Z-X, Jiang Y-J, Zhang Y-Z, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74 (5): 1025-1039]
- [12] 顾松圃. 京津风沙源区生态环境治理存在的问题与对策. 山西水土保持科技, 2008 (1): 36-38 [Gu S-P. Problems and

- countermeasures of ecological environment control in Beijing-Tianjin Sand Source Region. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2008 (1): 36-38]
- [13] 武志涛. 京津风沙源区植被变化及固碳效益研究. 博士论文. 北京: 北京师范大学, 2013 [Wu Z-T. Vegetation Dynamics and Benefits of Carbon Sequestration in the Beijing-Tianjin Sand Source Region. PhD Thesis. Beijing: Beijing Normal University, 2013]
- [14] 单楠. 京津风沙源区植被指数 (NDVI) 对气候变化响应研究. 硕士论文. 北京: 中国林业科学研究院, 2013 [Shan N. The Research on Normalized Different Vegetation Index (NDVI) Response to the Climate Changes in Beijing-Tianjin Sand Source Region. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013]
- [15] 马志婷. 1860—2014 年中国干旱时空变化及其对植被的影响. 硕士论文. 太原: 山西大学, 2018 [Ma Z-T. Spatial and Temporal Variation of Drought and Its Impact on Vegetation in China during 1960-2014. Master Thesis. Taiyuan: Shanxi University, 2018]
- [16] 吴思佳, 吴伟, 陈文惠, 等. 基于地理探测器的闽三角城市群植被覆盖时空变化及影响因素研究. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2019, 35 (5): 81-88 [Wu S-J, Wu W, Chen W-H, et al. Study on temporal and spatial changes of vegetation coverage and its influencing factors in the Urban Agglomeration of Min Delta based on the Geographical Detector Method. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science*, 2019, 35 (5): 81-88]
- [17] 张彪, 李庆旭, 王爽, 等. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. 自然资源学报, 2019, 34 (5): 1041-1053 [Zhang B, Li Q-X, Wang S, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sandfixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 (5): 1041-1053]
- [18] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙河流域景观破碎化与驱动因子分析. 地理科学, 2018, 38 (8): 1370-1378 [Zhang J-X, Gong J, Liu D-Q. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on GeoDetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38 (8): 1370-1378]
- [19] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因. 地理学报, 2018, 73 (9): 1674-1686 [Wang H, Gao J-B, Hou W-J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: based on the geographical detector method. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73 (9): 1674-1686]
- [20] 南精转, 任学军. 京津风沙源治理区造林工程存在问题与建议. 山西水土保持科技, 2014 (2): 30-31 [Nan J-Z, Ren X-J. Problems and suggestions of afforestation project in Beijing-Tianjin Sand Source region. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2014 (2): 30-31]
- [21] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Inner Mongolia Autonomous Region Statistics Bureau. Inner Mongolia Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2000]
- [22] 山西省统计局. 山西省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Shanxi Statistics Bureau. Shanxi Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2000]
- [23] 河北省统计局. 河北省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Hebei Statistics Bureau. Hebei Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2000]
- [24] 北京统计年鉴. 北京市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Beijing Statistics Bureau. Beijing Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2000]
- [25] 天津统计年鉴. 天津市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Tianjin Statistics Bureau. Tianjin Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2000]
- [26] 国家林业局. 中国林业统计年鉴. 北京: 中国林业出版社, 2002 [National Forestry Administration. China Forestry Statistical Yearbook China. Beijing: China Forestry Press, 2002]
- [27] 王伟, 阿里木·赛买提, 吉力力·阿不都外力. 基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析. 国土资源遥感, 2019, 31 (4): 32-40 [Wang W, Samat A, Abuduwaili J. Geo-detector based spatio-temporal variation characteristics and driving factors analysis of NDVI in Central Asia. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31 (4): 32-40]
- [28] 刘大元, 张雪梅, 岳跃民, 等. 基于 Geodetector 的广西喀斯特植被覆盖变化及其影响因素分析. 农业现代化研究, 2019, 40 (6): 1038-1047 [Liu D-Y, Zhang X-M, Yue Y-M, et al. Vegetation cover change and its influencing factors in karst regions of Guangxi based on Geodetector. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40 (6): 1038-1047]
- [29] 张勇. 近 20 年科尔沁沙地植被覆盖变化研究——以科尔沁左翼后旗为例. 硕士论文. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008 [Zhang Y. Study on the Vegetation Cover Change in Horqin Sandy Land during the Recent 20 Years. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008]
- [30] 王劲峰, 徐成东. 2017 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 71 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector of spatial stratified heterogeneity: Principle and applications in environmental and social sciences. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 71 (1): 116-134]
- [31] 李涛, 廖和平, 褚远恒, 等. 重庆市农地非农化空间非均衡及形成机理. 自然资源学报, 2016, 31 (11): 1844-1857 [Li T, Liao H-P, Chu Y-H, et al. Spatial disequilibrium and its formation mechanism of farmland conversion in Chongqing. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31 (11): 1844-1857]
- [32] Zhu LJ, Meng JJ, Zhu LK. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106545
- [33] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别——以环渤海地区为例. 地理研究, 2015, 34 (6): 1077-1087 [Yang R, Liu Y-S, Long H-L, et al. Spatial-temporal characteristic of rural residential land use change and spatial directivity identification based on grid in the Bohai Rim in China. *Geographical Research*, 2015, 34 (6): 1077-1087]
- [34] 裴亮, 黄森旺, 陈丽萍. 京津风沙源区植被的时空变化及其对气候因子的响应. 中国沙漠, 2013, 33 (5): 1593-1597 [Pei L, Huang S-W, Chen L-P. Vegetation spatio-temporal changes and the relationship with climate factors in Beijing-Tianjin Sand

- Source Region. *Journal of Desert Research*, 2013, 33 (5): 1593-1597]
- [35] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. *生态学报*, 2014, 34 (17): 5007-5020 [Yan E-P, Lin H, Dang Y-F, et al. The spatiotemporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000-2012. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (17): 5007-5020]
- [36] 马俊明. 基于 GIS 的京津风沙源林业工程监测与评价系统. 硕士论文. 北京: 北京林业大学, 2019 [Ma J-M. The Monitoring and Evaluation System of Beijing-Tianjin Sand Forestry Engineering based on GIS. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2019]
- [37] 马天啸, 宋现锋, 赵昕, 等. 2000—2010 年黄河源区植被覆盖率时空变化及影响因素. *干旱区研究*, 2016, 33 (6): 1217-1225 [Ma T-X, Song X-F, Zhao X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its affecting factors in the Headwaters of the Yellow River during the period of 2000-2010. *Arid Zone Research*, 2016, 33 (6): 1217-1225]
- [38] 刘巧霞. 京津风沙源治理工程的管理机制对当地生态效益的推动. *现代园艺*, 2020, 43 (20): 151-152 [Liu Q-X. The promotion of local ecological benefits by the management mechanism of Beijing-Tianjin sand source control project. *Modern Horticulture*, 2020, 43 (20): 151-151]
- [39] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. *草业学报*, 2018, 27 (5): 1-14 [Li Y-Z, Fan J-W, Yu H-L. The effects of different restoration practices on temperate grassland ecosystems in the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27 (5): 1-14]
- [40] 王俊秀. 京津风沙源治理工程经济效益分析. *内蒙古水利*, 2017 (1): 34 [Wang J-X. Economic benefit analysis of Beijing-Tianjin Sand Source Control Project. *Inner Mongolia Water Resources*, 2017 (1): 34]
- [41] 刘笑冰, 李宇佳, 刘芳. 基于生态文明视角的造林工程成本核算研究——以北京市京津风沙源治理二期工程为例. *林业经济*, 2019, 41 (3): 119-124 [Liu X-B, Li Y-J, Liu F. Study on cost accounting of afforestation project from the ecological civilization: Taking Beijing-Tianjin Sandstorm Source Treatment Phase II Project as an example. *Forestry Economics*, 2019, 41 (3): 119-124]