

DOI: 10.5846/stxb202003270710

李晶,刘乾龙,刘鹏宇.1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析.生态学报,2022,42(1):220-235.

Li J, Liu Q L, Liu P Y. Spatio-temporal changes and driving forces of fraction of vegetation coverage in Hulunbuir (1998—2018). Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 220-235.

# 1998—2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析

李 晶\*, 刘乾龙, 刘鹏宇

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要:**呼伦贝尔市作为中国北方的重要生态屏障,其生态状况的变化及影响因素一直备受关注。基于 1998—2018 年 SPOT/VEGETATION NDVI 数据,结合地形、气候和社会经济数据利用像元二分模型、趋势分析法,并根据数据特点,综合多种统计方法,对呼伦贝尔市植被覆盖度(FVC)时空变化及驱动力进行定性与定量分析。结果表明:(1)21 年间研究区 FVC 在低波动中缓慢增长,以 4—5 年为周期,周期内 FVC 先减少后增长,在空间上呈“西减东增”的变化格局;(2)FVC 类型以极高和高为主,中、低、极低面积依次递减且总和仅占 10%—15%,FVC 增加、变化不显著及减少区域面积分别为 135720.57 km<sup>2</sup>(53.56%)、107140.74 km<sup>2</sup>(42.28%)、10569.06 km<sup>2</sup>(4.17%);(3)地形因素奠定了 FVC“西低东高”的空间分布格局,气候和人类活动因素影响 FVC 的年际变化。位于研究区西南部的新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗、陈巴尔虎旗和东南部的阿荣旗以气候因素为主导,位于中部大兴安岭上的牙克石市、额尔古纳市、根河市和扎兰屯以人类活动因素为主导,满洲里、海拉尔和鄂伦春自治旗则受气候因素与人类活动因素的综合影响。驱动力因素对 FVC 变化的影响具有差异性和双向性,在合理的政策和规划下,可以实现社会经济发展与生态环境可持续发展的双赢。

**关键词:**植被覆盖度; 时空变化; 气候因素; 人类活动因素; 驱动力分析; 呼伦贝尔市

## Spatio-temporal changes and driving forces of fraction of vegetation coverage in Hulunbuir (1998—2018)

LI Jing\*, LIU Qianlong, LIU Pengyu

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract:** With the rapid development of the global economy, the ecological environment is deteriorating, and it is urgent to carry out environmental change monitoring. The rise of remote sensing technology has made it possible. As an important ecological barrier in northern China, Hulunbuir City has been receiving much attention. Currently, the ecological environment monitoring of Hulunbuir focuses on the use of multi-period remote sensing images, combining with climate data, and a single driving force analysis method to study the changes in local vegetation and to explore the response of vegetation changes to the natural climate. However, there are few studies on the impacts of human activities on vegetation changes. Most of them are based on qualitative analysis or human activities as a whole, which is difficult to determine the specific driving force components and the influence direction and the extent of each component factor. This paper is based on SPOT/VEGETATION NDVI data from 1998—2018, combined with the terrain, climate and Human activity data, and comprehensively applying the trend analysis, coefficient of variation method, pixel decomposition model, principal component analysis, multiple linear regression, ridge regression and so on to carry out the qualitative and quantitative

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0501101-4)

收稿日期:2020-03-27; 网络出版日期:2021-08-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Lijing@cumtb.edu.cn

analysis of the spatio-temporal changes and driving forces of Hulunbuir's fraction of vegetation cover (FVC). The results show: (1) during the 21 year, the FVC in the study area slowly increases in low fluctuations, with a period of 4—5 years, during which the FVC first decreases and then increases, and there is a change pattern of “decreasing in the west and increasing in the east” in space. The FVC types are mainly extremely high and high, and the areas of medium, low, and extremely low are decreasing, and the sum only accounts for 10%—15% of the study area. The increase of extremely low and low type area is relatively large, which are 36.80% and 98.46%, respectively. The main source is the degradation of medium and high type, and the increase of extremely high type area is relatively large, which is 33786.03 km<sup>2</sup>, and the main source is the further improvement of high type. (2) The areas with significant and extremely significant increases account for 53.56% (135720.57 km<sup>2</sup>), the areas with insignificant changes account for 42.28% (107140.74 km<sup>2</sup>), and the areas with significant and extremely significant decreases only account for 4.17% (10569.06 km<sup>2</sup>) of the research area. (3) There are obvious differences in the driving force of the FVC in different regions. Topographical factors lay the spatial distribution pattern of “low west and high east” and climatic factors affect the temporal distribution pattern of FVC. New Barag Right Banner, New Barag Left Banner, Ewenki Autonomous Banner, Arun Banner and Chen Barag Banner are dominated by climatic factors. Yakeshi, Erguna, Genhe City and Zhalantun is dominated by human activities factors, while Manzhouli, Hailar and Oroqen Autonomous Banner are affected by climatic factors and human activities factors. The influence of driving factors on Hulunbuir's FVC changes is bidirectional. With the correct policies and reasonable planning, it is possible to achieve a win-win situation for socio-economic development and sustainable development of the ecological environment. The research results provide the theory and data support for Hulunbuir's sustainable development of ecological environment and grassland protection policy.

**Key Words:** fraction of vegetation cover; spatio-temporal change; climatic factors; human activity factors; driving force analysis; Hulunbuir

自 20 世纪 70 年代以来,全球经济快速发展,生态环境日益恶化,生态问题已成为人类高度关注的一项重大战略问题<sup>[1]</sup>。植被作为陆地生态系统的主体,其生长状况和分布特征严格地受环境制约,能够敏锐反映出大气、水、土壤等成分的变化<sup>[2]</sup>。植被覆盖度(Fraction of Vegetation Coverage, FVC),通常定义为植被(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<sup>[3]</sup>,既是描述地表植被生长状况的重要指标,也是反映区域生态系统环境变化的重要参量<sup>[4]</sup>,被广泛应用在基于遥感的生态环境变化监测中。刘洋等<sup>[5]</sup>基于 GIMMS-NDVI 数据研究了 1982—2013 年新疆植被覆盖格局的时空变化及其可持续性特征。刘家琰等<sup>[6]</sup>基于 1998—2013 年 SPOT/VEGETATION-NDVI 数据,利用像元二分模型估算了神农架林区的植被覆盖度,并分析空间格局变化趋势。

地表植被变化的驱动力可大致分为气候因素、地形因素和人类活动因素<sup>[7]</sup>。何奕莹<sup>[8]</sup>、穆少杰等<sup>[9]</sup>分别采用灰色关联法和相关系数法探究了降水与温度对地表植被变化的影响,发现水热组合的共同作用大于单一气候因子影响,且影响程度存在显著的空间差异。谭学玲等<sup>[10]</sup>和 Jian Peng 等<sup>[11]</sup>引入海拔、坡度、地貌等因素定性分析了地形对植被变化的影响。随着研究的深入,越来越多的学者开始聚焦于人类活动因素对植被变化的影响。侯勇等<sup>[12]</sup>在研究内蒙古地区多年植被覆盖度时空变化中,发现近年来与人类活动的关系更密切。吴蔚<sup>[13]</sup>建立了十省煤炭开采和植被利用与保护的耦合模型,指出两者的耦合协调度与采后的土地复垦工作密切相关。张圣微<sup>[14]</sup>等将锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与气象、放牧数据结合分析,结果表明降水量和牲畜养殖数量对该地区植被覆盖度变化影响较大。

呼伦贝尔市属于中国北方典型的草地区域,植被类型复杂多样,是防风固沙的重要生态区。近年来,呼伦贝尔市经济在快速发展的同时也带了诸如植被退化、土地损毁、土地荒漠化、土壤盐渍化、生物多样性减少等生态问题<sup>[15—16]</sup>。已有研究认为气候暖干化的变化趋势,是促使呼伦贝尔草原区植被变化的主要原因<sup>[17—18]</sup>,

也有研究认为煤炭开采、经济发展、过度放牧等人类活动是导致植被退化的重要因素<sup>[19-21]</sup>。目前针对呼伦贝尔市植被变化驱动力的研究多聚焦于气候、地形等自然因素的影响,对于非气候因素的研究,常常局限于定性分析<sup>[22]</sup>或是将其视为一个整体通过预测值与真实值的差异来判断影响的大小<sup>[23]</sup>,虽然后者可以定量研究其对植被变化的影响,却无法进一步探究驱动力因素的组成及各成分的影响趋势和程度。在方法上,多种形式、各具优点的统计方法被广泛应用到植被变化驱动力分析中,例如:多元线性回归、主成分分析、残差分析法、偏最小二乘回归、地理探测器、混合线性模型等等<sup>[24-27]</sup>,现阶段研究多采用一种或两种统计方法,缺乏根据不同区域数据特点进行综合应用的案例。

综上所述,利用 1998—2018 年 SPOT/VEGETATION NDVI 长时序遥感数据开展呼伦贝尔市植被覆盖度的动态变化监测,并结合地形、气候和人类活动数据,在充分考虑数据特点的基础上,综合运用多种统计方法,建立流程化驱动力分析模型,实现定性与定量相结合地探究研究区植被覆盖度变化的驱动力因素组成、影响方式和影响程度,以期对呼伦贝尔市生态环境的可持续发展与植被保护政策制定提供科学的理论依据和数据支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

呼伦贝尔市位于内蒙古自治区东北部,总面积 25.3 万 km<sup>2</sup>(图 1)。大兴安岭以东北—西南走向纵贯呼伦贝尔中部,构成呼伦贝尔林区,海拔 550—1000 m;大兴安岭以西是呼伦贝尔草原区,由东向西地跨森林草原、草甸草原和干旱草原 3 个地带,海拔 700—1700 m;大兴安岭以东是以种植业为主的农业经济区,海拔 200—500 m。总体地势呈现出西高东低,由西向东缓慢过渡的特征。该市气候为显著的大陆性气候,全年降水量变化率大,地域分布不均匀,降水期多集中于 7—8 月;全年气温冬冷夏暖,温差较大,最热月(7 月)平均气温在

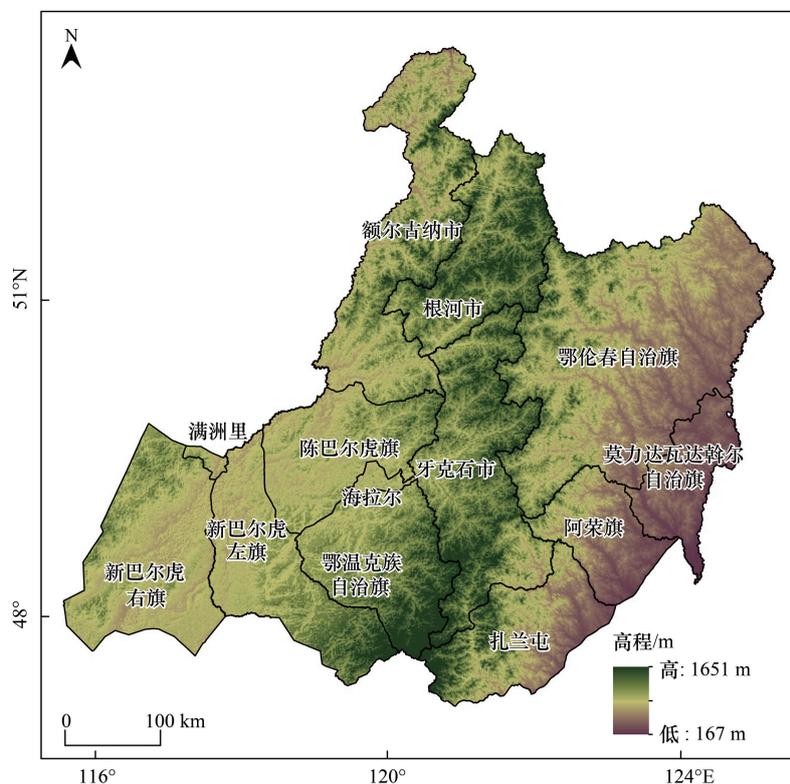


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

16—21℃之间。该市拥有丰富的草原、森林、矿产、水和生物资源,天然草场面积 8.4 万 km<sup>2</sup>,约占全市面积的 33%,牲畜饲养规模近 8 年来稳定在 800 万只以上;有林地面积 12.67 km<sup>2</sup>,占全市面积的 50%,属于我国天保工程重点实施区域;已探明煤炭储量 1963 亿 t,占蒙东煤炭基地探明储量的 40%,煤电联营和煤化工等相关产业发展迅速,2001—2012 年原煤产量呈指数增长,之后趋于稳定。

## 1.2 数据来源

### 1.2.1 遥感数据

遥感数据下载于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集,该数据集是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大合成法 (MVC) 生成的年度 NDVI 时序数据,空间分辨率为 1 km<sup>[28]</sup>。利用呼伦贝尔行政区矢量边界裁剪得到 1998—2018 年呼伦贝尔 NDVI 数据。

### 1.2.2 地形数据

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据下载于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的全国 DEM 1 km 数据。该数据集基于最新的 SRTM V4.1 数据经重采样生成的 1 km 全国一张图数据。利用 ArcGIS 对 DEM 数据进行裁剪和计算坡度,然后根据自然断点法将 DEM 和坡度数据分别按照 0—500、500—700、700—900、900—1700 m 和 0—2°、2°—6°、6°—15°进行重分类,如图 2、3 所示。

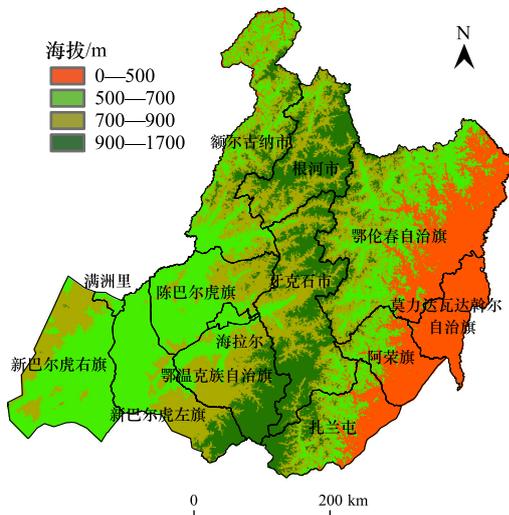


图 2 研究区海拔等级分布

Fig.2 Altitude grade distribution in the study area

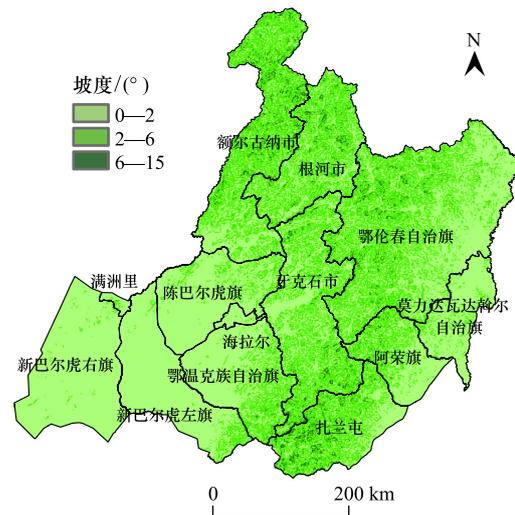


图 3 研究区坡度等级分布

Fig.3 Slope grade distribution in the study area

### 1.2.3 气候数据

气候数据下载自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 的 1998—2018 年中国地面气温月值和降水月值 0.5°×0.5°格点数据集 (V2.0)。上述数据集分别基于国家气象信息中心最新整编的中国地面高密度台站 (约 2400 个国家级气象观测站) 的气温资料和中国地面 2472 个台站降水资料,利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法 (TPS, Thin Plate Spline) 进行空间插值而成。在 ArcGIS 中利用三次卷积插值法,将空间分辨率为 0.5°×0.5°的月均温和月降水量格点数据重采样为空间分辨率为 1 km 的栅格数据。选取研究区植被最佳生长季 6、7、8 月的温度均值 (°C,  $x_1$ ) 和降水量均值 (mm,  $x_2$ ) 作为气候因素。

### 1.2.4 人类活动数据

人类活动数据来自于 1999—2018 年《内蒙古统计年鉴》和 1998—2017 年《呼伦贝尔统计年鉴》。实际获取的社会和经济数据时间范围为 1998—2017 年。按照综合性、代表性和可获取性的原则,选取研究区呼伦贝

尔市国内生产总值 GDP(万元,  $x_3$ )、年末第二产业产值(万元,  $x_4$ )、人均 GDP(元/人,  $x_5$ )、人口密度(万人/ $\text{km}^2$ ,  $x_6$ )、城镇化(% ,  $x_7$ )、牲畜数量(头/只,  $x_8$ )、原煤产量(万 t,  $x_9$ )、公路里程(km,  $x_{10}$ )等作为人类活动因素。考虑到经济数据的通货膨胀问题,结合历年研究区各旗县 GDP 指数,将以当年价格统计的经济数据转换为以 1998 年为基准的可比价格<sup>[29]</sup>。对量级较大、变化范围较广的数据取自然对数,从而在不改变数据性质和相关关系的同时,对数据进行压缩,使数据更加平稳,削弱数据间共线性和异方差性。同时在线性方程中,对自变量  $x$  取对数后其系数  $\beta$  表示因变量  $y$  对自变量  $x$  的弹性,即  $x$  变化 1% 时  $y$  变化  $\beta/100$  个单位<sup>[30]</sup>。因此,对  $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_8$ 、 $x_9$ 、 $x_{10}$  分别取对数后得到  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ , 最终将  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $x_6$ 、 $x_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$  作为人类活动因素。

## 2 研究方法

### 2.1 植被覆盖度估算

利用像元二分模型<sup>[31]</sup>通过归一化植被指数估算植被覆盖度,其公式如(1)所示:

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

式中, FVC 为像元植被覆盖度, NDVI 为像元归一化植被指数值,  $NDVI_{veg}$  为完全被植被覆盖的像元 NDVI 值,  $NDVI_{soil}$  为完全无植被覆盖的像元 NDVI 值。由式(1)可知  $NDVI_{veg}$  和  $NDVI_{soil}$  值的确定对 FVC 的计算至关重要,其中  $NDVI_{soil}$  理论值应该接近 0,但是由于大气影响及地表温度、湿度、粗糙度、土壤类型、土壤颜色等因素的不同,其值会随时间和空间的变化而变化,一般为  $-0.1 \sim -0.2$ <sup>[32]</sup>。基于呼伦贝尔的土地利用数据,利用 ENVI 计算像元 NDVI 的累计频率,经过反复实验对比,最终选取累计频率 1% 处的 NDVI 值作为  $NDVI_{soil}$ , 累计频率 99% 处的 NDVI 值作为  $NDVI_{veg}$ 。利用年度最大合成的 NDVI 数据,通过式(1)计算得到 1998—2018 年呼伦贝尔 FVC。参考陈效述<sup>[33]</sup>和李林叶<sup>[34]</sup>的 FVC 分类规则,如表 1 所示,对各年 FVC 进行分类。

表 1 FVC 类型分类  
Table 1 Classification of FVC type

FVC 等级 Classification of FVC	FVC 值 Value of FVC	FVC 等级 Classification of FVC	FVC 值 Value of FVC
极低 Very low	$0 \leq FVC < 0.2$	高 High	$0.6 \leq FVC < 0.8$
低 Low	$0.2 \leq FVC < 0.4$	极高 Very high	$0.8 \leq FVC \leq 1.0$
中 Medium	$0.4 \leq FVC < 0.6$		

FVC: 植被覆盖度 Fraction of vegetation coverage

### 2.2 植被覆盖度变化检测

#### 2.2.1 变异系数

变异系数(Coefficient of Variation, CV)常用来表示时序数据的波动程度,在一定程度上可以指示区域生态系统的脆弱程度<sup>[23]</sup>,其公式如(2)所示

$$CV = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, CV 为变异系数,  $i$  为时间序列,  $x_i$  为第  $i$  年的像元值,  $\bar{x}$  为研究时段内所有年份像元值的均值。以像元的年际 FVC 作为输入值,变异系数值较大说明植被覆盖度变化剧烈,生态环境较脆弱;变异系数较小说明植被覆盖度波动较小,生态环境抗干扰能力较强。参考黄悦悦等<sup>[23]</sup>相关研究对变异系数进行分类,如表 2 所示

#### 2.2.2 变化趋势及显著性分析

采用最小二乘法,以时间为自变量,年际 FVC 为因变量,逐像元进行线性回归拟合,获取 1998—2018 年像元植被覆盖度变化趋势,具体计算公式如(3)所示:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中,  $\theta_{\text{slope}}$  是单个像元线性回归方程的斜率, 即年际变化率;  $n$  是总年份数,  $y_i$  是第  $i$  年像元的 FVC。当  $\theta_{\text{slope}} > 0$  时, 表示该像元在研究时间段内 FVC 呈增长趋势, 当  $\theta_{\text{slope}} < 0$  时, 表示该像元在研究时间段内 FVC 呈减小趋势。

利用 F 检验对 FVC 变化趋势进行显著性检验, 具体公式如(4)、(5)所示:

$$F = (n - 2) \frac{U}{Q} \quad (4)$$

$$P\{F(1, N-2) \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)\} - \alpha \quad (5)$$

式中,  $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  称为误差平方和;  $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  称为回归平方和;  $n$  为总年数;  $y_i$  为第  $i$  年像元 FVC 值;  $\hat{y}_i$  为第  $i$  年像元 FVC 拟合值;  $\bar{y}$  为监测年内像元 FVC 平均值;  $\alpha$  为显著性水平。将结果按照表 3 规则进行分级。

表 2 变异系数程度分级

Table 2 Classification of CV

变异程度 Classification of CV	CV 值 Value of CV	变异程度 Classification of CV	CV 值 Value of CV
高波动变化 High fluctuation change	$CV > 0.3$	相对较低波动变化 Relatively low fluctuation change	$0.10 < CV \leq 0.15$
相对较高波动变化 Relatively high fluctuation change	$0.2 < CV \leq 0.3$	低波动变化 Low fluctuation change	$CV \leq 0.1$
中等波动变化 Moderate fluctuation change	$0.15 < CV \leq 0.2$		

CV: 变异系数 Coefficient of variation

表 3 显著性检验结果分级

Table 3 Classification of Significant test results

变化趋势 Trend	变化率( $\theta_{\text{slope}}$ ) Slope of $\theta$	显著性水平 $\alpha$ Significance level $\alpha$	变化趋势 Trend	变化率( $\theta_{\text{slope}}$ ) Slope of $\theta$	显著性水平 $\alpha$ Significance level $\alpha$
极显著减少 Extremely significant decreases		$\alpha < 0.01$	显著增加 Significant increase	$\theta_{\text{slope}} > 0$	$0.01 < \alpha < 0.05$
显著减少 Significant decreases	$\theta_{\text{slope}} < 0$	$0.01 < \alpha < 0.05$	极显著增加 Extremely significant increase		$\alpha < 0.01$
基本无变化 Insignificant		$\alpha > 0.05$			

$\theta_{\text{slope}}$ : 系数  $\theta$  的斜率 the slope of  $\theta$

### 2.3 驱动力分析

利用 1998—2017 年呼伦贝尔地形数据 (DEM、slope)、气候数据 ( $x_1$ 、 $X_2$ ) 和社会经济数据 ( $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $x_6$ 、 $x_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ ) 以及年份 ( $t$ ) 对研究区 FVC 均值 ( $y$ ) 的驱动力进行探究, 具体流程如图 4 所示:

对于常年基本无变化的地形因素进行等级划, 定性分析不同地形因素下 FVC 的变化情况。

对于气候和社会经济因素等时序数据, 利用 SPSS 软件对  $y$  和  $x_i$  ( $x_i$ ,  $i = 1-10$ ) 进行 pearson 相关性分析<sup>[30]</sup> 筛选出与因变量  $y$  相关性较大的自变量  $x_i$ , 然后根据筛选出自变量的特点, 选择不同的回归方法确定最优回归方程及驱动力因素, 同时在多元线性回归方程中增加时间变量  $t$  ( $t$  不参与驱动力因素分析), 以消除数据中的时间趋势, 避免造成谬误回归问题。具体过程如下所述:

(1) 若自变量数量  $\geq 2$  个, 则进行共线性诊断。

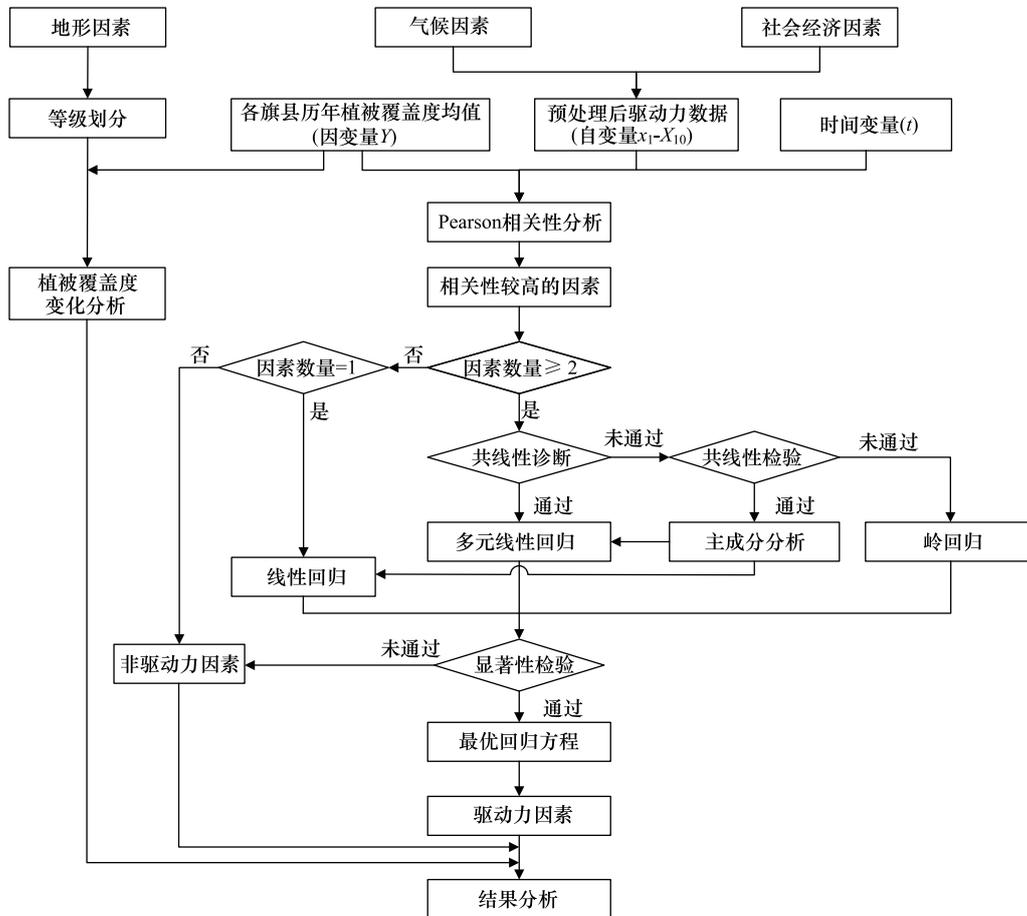


图4 驱动力分析流程

Fig.4 Driving force analysis process

①如果自变量间没有显著的共线性,则对因变量与自变量进行多元线性回归分析<sup>[30]</sup>,将回归方程和所选自变量系数分别通过显著水平  $\alpha=0.05$  的  $F$  检验和  $t$  检验,将具有最高  $R^2_{\text{调整}}$  的结果作为最优回归方程。其中  $R^2_{\text{调整}}$  通过回归方程中自变量的个数对决定系数  $R^2$  进行调整,以解决随自变量增加,即使增加的自变量与因变量不相关,  $R^2$  也会增大的问题<sup>[30]</sup>,其公式如(8)所示:

$$R^2_{\text{调整}} = 1 - \frac{n - 1}{n - p - 1} (1 - R^2) \tag{8}$$

式中,  $R^2_{\text{调整}}$  为调整  $R^2$ ,  $n$  为自变量个数,  $p$  为回归方程显著性值,  $R^2$  是决定系数。

②如果自变量间具有显著的共线性,则采用主成分分析<sup>[30]</sup>消除各指标间的信息冗余,达到数据降维和变量筛选的目的。首先对自变量进行 Bartlett 球形检验和 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 统计量检验,如果 Bartlett 球形检验显著性值小于 0.05 且 KMO 统计量大于 0.5,则自变量适合进行主成分分析;然后通过主成分分析,得到若干分主成分  $F_1, F_2 \dots F_n$ ,选取特征值大于 1 的主成分作为最终主成分;最后以最终主成分为作为自变量, FVC 均值为因变量,进行线性回归或者多元线性回归,得到最优回归方程。

③如果自变量间有显著的共线性且不适合做主成分分析,则采用岭回归,它是一种有偏估计,以放弃部分精度为代价寻求拟合效果稍差但更符合实际回归结果的方法<sup>[35]</sup>。设多元线性回归模型  $y = X\beta + \varepsilon$ , 参数  $\beta$  的最小二乘估计如公式(9)所示:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \tag{9}$$

自变量出现多重共线时,普通最小二乘估计明显变差,当  $|X'X| \approx 0$  时,  $\hat{\beta}$  尽管是  $\beta$  的无偏估计,但是  $\hat{\beta}$  很

不稳定,会与真值有较大偏差,甚至会出现与实际意义不符的正负号。如果给  $X'X$  加上一个正常数矩阵  $kI$  ( $k>0$ ),那么  $X'X+kI$  接近奇异的程度就会变小,此时  $\hat{\beta}(k)$  作为  $\beta$  的估计值会比直接由最小二乘法估计的  $\hat{\beta}$  更稳定。经过反复实验,当引入的  $k$  值恰好使所有回归系数通过显著水平  $\alpha=0.05$  的  $t$  检验,且有较大的  $R^2_{调整}$  时,选取引入该  $k$  值的回归方程作为最优回归方程。

(2)若自变量数量为 1 个,则直接进行线性回归分析。

(3)若没有自变量与因变量有显著相关性或自变量在回归方程中对应的系数未通过显著性检验,则认为所选因素不是该区域 FVC 均值变化的主要驱动力。

最后,根据最优回归方程并结合地形因素分析各县级行政区 FVC 变化的主要驱动力及其影响方向、程度和空间分布特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被覆盖度时空变化特征

##### 3.1.1 植被覆盖度时序变化特征

1998—2018 年呼伦贝尔市 FVC 均值在低波动中缓慢增长,以 4—5 年为周期,周期内先减少后增长,如图 5 所示。结合最小二乘回归得到的趋势线可知,1998—2004 年研究区 FVC 均值有降低趋势,在 2001 年达到最低值 0.78;2004—2018 年表现为增长趋势,在 2014 年和 2018 年突破 0.85,分别达到 0.87 和 0.86。位于草原区西部和中部的呼伦贝尔右旗、满洲里和新巴尔虎左旗的 FVC 均值较低,常年低于 0.60,其中满洲里和新巴尔虎右旗变异系数较大,分别为 0.277 和 0.266,属于相对较高波动变化,生态环境较脆弱,容易受到外界因素的影响;新巴尔虎左旗变异系数为 0.112,属于相对较低波动变化,生态环境受到外界因素影响后具有较强的自我修复能力;其它区域变异系数均低于 0.100,属于低波动变化,受外界因素影响较小,其中位于草原区东部的海拉尔和陈巴尔虎旗的 FVC 变化轨迹十分相似,始终保持在 0.55—0.8,鄂温克族自治县则维持在 0.80 附近上下波动。以森林和农业种植为主要植被类型的区域的 FVC 均值常年保持在 0.80 以上,明显大于草原区。

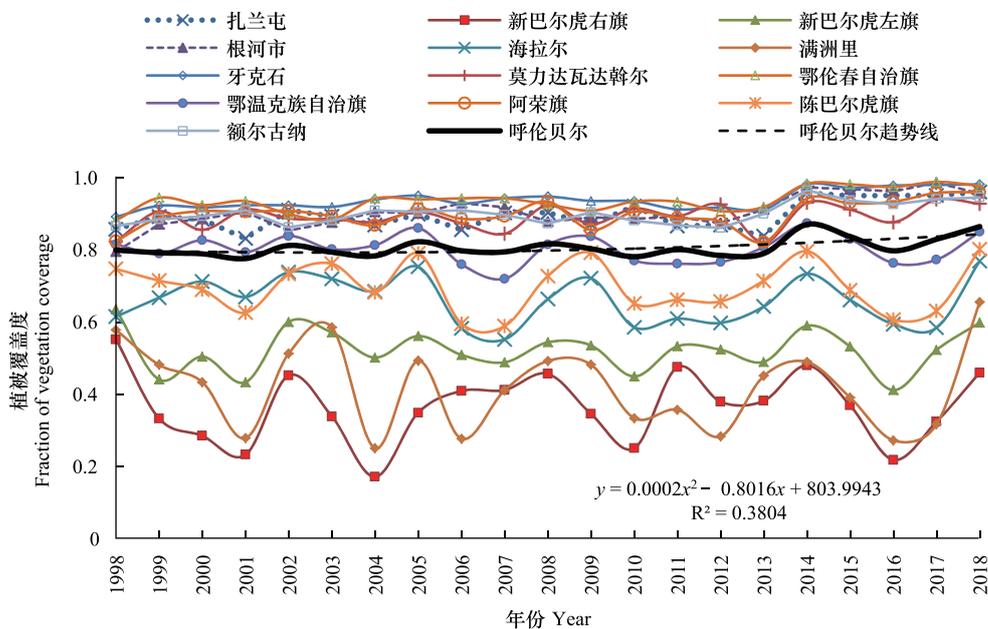


图 5 1998—2018 年呼伦贝尔及其县级行政区 FVC 均值

Fig.5 Average FVC of Hulunbuir and its county-level administrative districts from 1998 to 2018

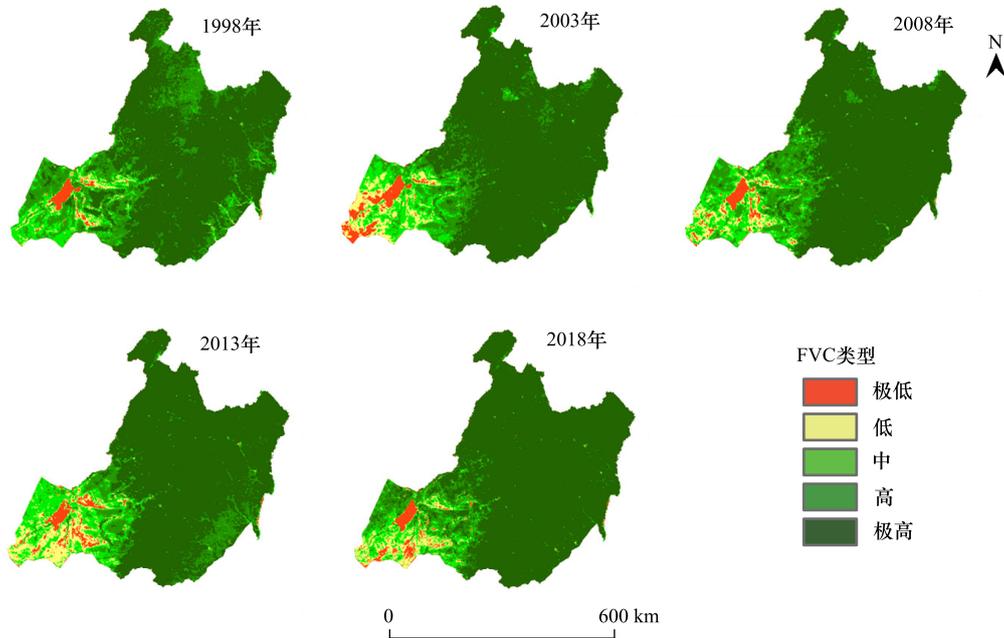


图 6 1998—2018 年研究区 FVC 类型分布

Fig.6 Distribution of FVC grade in study area from 1998 to 2018

FVC: 植被覆盖度 Fraction of vegetation coverage

通过 1998—2018 年呼伦贝尔 FVC 类型分布图(图 6, 因篇幅所限仅展示部分年份), 并结合表 4 可知, 呼伦贝尔 FVC 整体上呈现“西低东高”的格局, 类型以极高和高为主, 主要分布在中部林区、东部林草交错带以及东南部的农业种植区; 中、低和极低三类面积依次递减, 面积和占研究区的 10%—15%, 主要分布在西部的草原区。与 1998 年相比, 2018 年呼伦贝尔的极低和低类型面积增幅分别为 36.80% 和 98.46%, 主要原因是西部草原区内中等 FVC 植被的退化; 高类型面积大量减少, 除了 10.83% 和 3.98% 分别退化成中和低类型, 主要分布于西部草原区的南部, 大部分(61.18%) 区域转为极高类型, 主要分布在中北部的林区、东南部的农业区以及西部草原区的东部与中部林区相交的林草交错带; 极高类型面积大幅增长, 有大量高与部分中类型植被状况进一步改善的同时, 仅有 3.98% 和 0.53% 区域的植被分别发生了轻微、严重退化。

### 3.1.2 植被覆盖度空间变化特征

1998—2018 年呼伦贝尔 FVC 变化(图 7)呈减少趋势的区域主要分布于陈巴尔虎旗南部、新巴尔虎左旗中部和南部、新巴尔虎右旗西部和鄂温克族自治区东部等西部的草原区。而位于中部林区的 FVC 呈现出不变或增长的趋势, 特别是根河市中西部, 额尔古纳市、阿荣旗和扎兰屯市东部, 鄂伦春自治旗、牙克石市和莫力达瓦达斡尔自治旗北部, 这些区域 FVC 具有较大的增长趋势。

将 FVC 变化趋势进行显著性检验并对结果进行分类, 结果如图 8、表 5 所示。整体上, 1998—2018 年呼伦贝尔 53.56% 区域的 FVC 具有显著或极显著增长的趋势, 42.28% 区域无显著性变化, 仅有 4.17% 区域表现为极显著或显著减少。极显著减少和显著减少区域主要分布于新巴尔虎右旗东部、新巴尔虎左旗中部、陈巴尔虎旗南部、海拉尔西部、鄂温克族自治旗西北部和满洲里北部与东部。其中鄂温克族自治旗、新巴尔虎左旗、陈巴尔虎减少区域面积分别为 2555.90、2448.44、2132.09 km<sup>2</sup>, 数量远超其他地区, 占各自区域的 13.69%、12.15% 和 12.17%; 海拉尔和满洲里减少区域为 309.32 km<sup>2</sup> 和 160.68 km<sup>2</sup>, 占各自区域的 23.71% 和 20.99%, 植被退化区域比例较大。显著增加和极显著增加区域主要分布在呼伦贝尔中部和东北部地区。其中牙克石、根河市、扎兰屯和额尔古纳市增加区域面积分别为 21342.98、18843.33、16791.59、11868.59 km<sup>2</sup>, 占各自区域的 76.55%、93.8%、70.27%、58.02%, 高于呼伦贝尔总体增加区域的面积百分比(53.56%), 而鄂伦春自治旗增加

区域面积高达 42149.68 km<sup>2</sup>, 远高于其他区域, 但是仅占其区域面积的 9.15%。

表 4 1998—2018 年研究区 FVC 类型转换矩阵  
Table 4 1998—2018 FVC type conversion matrix in the study area

FVC 类型 Classification of FVC type	2018s					总计 Total	转出 Transfer out	
	极低 Very low	低 Low	中等 Medium	高 High	极高 Very high			
1998s 极低 Very low	面积/km <sup>2</sup>	3052.01	713.04	303.29	119.51	43.18	4231.04	1179.03
	百分比/%	1.20	0.28	0.12	0.05	0.02	1.67	0.47
低 Low	面积/km <sup>2</sup>	863.68	2095.93	1474.28	535.28	259.10	5228.29	3132.35
	百分比/%	0.34	0.83	0.58	0.21	0.10	2.06	1.24
中等 Medium	面积/km <sup>2</sup>	1374.86	5046.51	6036.73	3700.78	2406.26	18565.14	12528.41
	百分比/%	0.54	1.99	2.38	1.46	0.95	7.33	4.94
高 High	面积/km <sup>2</sup>	601.56	2480.57	6752.79	14371.26	38141.60	62347.79	47976.52
	百分比/%	0.24	0.98	2.66	5.67	15.05	24.60	18.93
极高 Very high	面积/km <sup>2</sup>	19.08	40.17	805.43	6199.43	155994.00	163058.11	7064.11
	百分比/%	0.01	0.02	0.32	2.45	61.55	64.34	2.79
总计 Total	面积/km <sup>2</sup>	5911.20	10376.23	15372.53	24926.26	196844.14	253430.37	
	百分比/%	2.33	4.09	6.07	9.84	77.67	100.00	
转入 Transfer In	面积/km <sup>2</sup>	2859.19	8280.30	9335.80	10555.00	40850.14		
	百分比/%	1.13	3.27	3.68	4.16	16.12		
净增值 Net value added	面积/km <sup>2</sup>	1680.16	5147.95	-3192.61	-37421.53	33786.03		
	百分比/%	0.66	2.03	-1.26	-14.77	13.33		

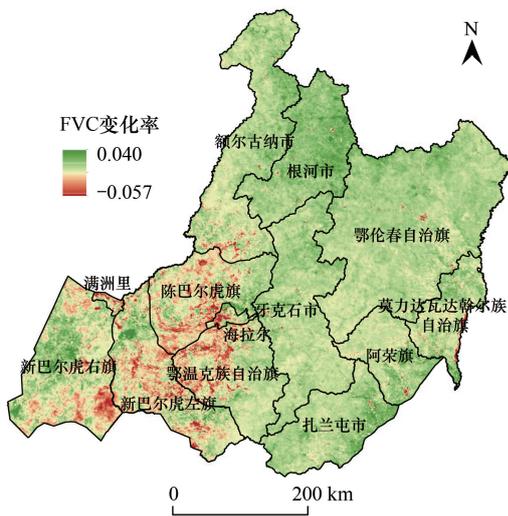


图 7 1998—2018 研究区 FVC 变化趋势  
Fig.7 FVC change trend of study area from 1998 to 2018

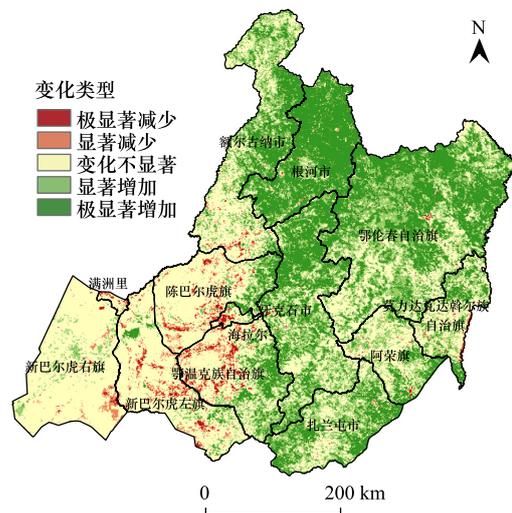


图 8 1998—2018 研究区 FVC 变化显著性检验  
Fig.8 Significance test of FVC change trend of study area

### 3.2 植被覆盖度变化驱动力分析

#### 3.2.1 地形因素

呼伦贝尔 FVC 随海拔的不同具有明显的差异性。FVC 均值 900—1700 m>0—500 m>700—900 m>500—700 m, 随着海拔的升高先减少后增加, 呈凹型变化。500—700 m 区域的 FVC 均值相对较低, 始终低于 0.75 且波动相对较高。0—500、700—900、900—1700 m 区域的 FVC 始终高于 0.80, 具有相似的低波动变化, 呈现出在 1998—2012 年平稳波动而 2013 年后快速增长, 如图 9 所示。

坡度对呼伦贝尔 FVC 变化的影响, 以 2°为界, 0°—2°区域的 FVC 均值相对较低, 处于 0.65—0.80 之间, 呈现出在相对较高波动中缓慢增长的趋势; 2°—6°和 6°—15°区域的 FVC 均值较高且波动低、变化情况十分

相似,历年均值全部高于 0.85,并在 1998—2012 年平稳波动而 2013 年后快速增长,如图 10 所示。

表 5 呼伦贝尔各区域 FVC 变化类型  
Table 5 Types of FVC changes in various regions of Hulunbuir

行政区 District	统计参数 Statistical parameters	FVC 变化类型 Types of FVC changes					总计 Total
		极显著减少 Extremely significant decreases	显著减少 Significant decreases	变化不显著 Insignificant	显著增加 Significant increase	极显著增加 Extremely significant increase	
扎兰屯市	面积/km <sup>2</sup>	29.12	83.36	4908.93	6383.21	5485.38	16890
	比例/%	0.17	0.49	29.06	37.79	32.48	100.00
新巴尔虎右旗	面积/km <sup>2</sup>	184.79	954.07	21822.03	1611.87	122.52	24695.28
	比例/%	0.75	3.86	88.37	6.53	0.50	100.00
新巴尔虎左旗	面积/km <sup>2</sup>	789.37	1659.07	15451.87	1488.34	762.25	20150.9
	比例/%	3.92	8.23	76.68	7.39	3.78	100.00
根河市	面积/km <sup>2</sup>	24.1	41.18	1179.03	3610.39	15232.94	20087.63
	比例/%	0.12	0.21	5.87	17.97	75.83	100.00
海拉尔	面积/km <sup>2</sup>	177.76	131.56	732.12	161.69	101.43	1304.56
	比例/%	13.63	10.08	56.12	12.39	7.78	100.00
满洲里	面积/km <sup>2</sup>	68.29	92.39	583.49	15.06	6.03	765.26
	比例/%	8.92	12.07	76.25	1.97	0.79	100.00
牙克石	面积/km <sup>2</sup>	44.19	65.28	6430.41	9920.29	11422.69	27882.86
	比例/%	0.16	0.23	23.06	35.58	40.97	100.00
莫力达瓦达斡尔 族自治旗	面积/km <sup>2</sup>	187.8	237.01	4998.31	2980.71	2045.72	10449.55
	比例/%	1.80	2.27	47.83	28.52	19.58	100.00
鄂伦春自治旗	面积/km <sup>2</sup>	75.32	136.58	12576.61	19453.93	22695.75	54938.2
	比例/%	0.14	0.25	22.89	35.41	41.31	100.00
鄂温克族自治旗	面积/km <sup>2</sup>	918.92	1636.98	9477.4	3665.63	2973.68	18672.6
	比例/%	4.92	8.77	50.76	19.63	15.93	100.00
阿荣旗	面积/km <sup>2</sup>	79.34	154.66	5209.21	3669.64	2017.6	11130.45
	比例/%	0.71	1.39	46.80	32.97	18.13	100.00
陈巴尔虎旗	面积/km <sup>2</sup>	553.36	1578.73	12287.38	1549.61	1552.62	17521.69
	比例/%	3.16	9.01	70.13	8.84	8.86	100.00
额尔古纳	面积/km <sup>2</sup>	209.89	455.94	11483.96	9142.98	7648.61	28941.38
	比例/%	0.73	1.58	39.68	31.59	26.43	100.00
总计 Total	面积/km <sup>2</sup>	3342.25	7226.81	107140.74	63653.35	72067.22	253430.37
	比例/%	1.32	2.85	42.28	25.12	28.44	100.00

海拔和坡度等地形因素在时间上变化不明显,但在空间上变化显著,通过影响能量和水分的空间分布,来影响植被的种类及生长状况<sup>[36]</sup>,奠定了呼伦贝尔 FVC“西低东高”的空间分布格局。呼伦贝尔地势平缓,海拔 500—700 m 和坡度 0°—2° 区域重叠度高,处于受气候和人类活动影响较大,相对较高波动变化的西部草原区,因此 FVC 值相对较低。

### 3.2.2 气候因素与人类活动因素

根据各区域 FVC 变化的主驱动力因素及回归方程(见表 6),1998—2017 年呼伦贝尔市 FVC 均值与所选的驱动力因素均无显著的相关性,表明所选因素都不是研究区 FVC 均值变化的主要影响因素。由于呼伦贝尔市各县级行政区的气候条件、人类活动、经济结构存在较大的差异,以全市 FVC 均值为因变量会弱化这些驱动因素对主要作用区域的影响程度,致使得到它们对整个区域无显著影响的结果。因此以县级行政区为单位开展 FVC 变化的驱动力分析。

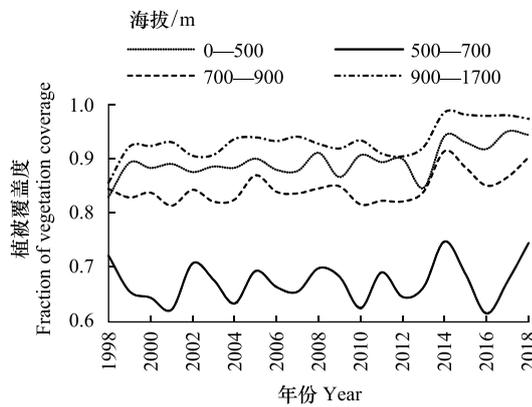


图 9 不同海拔的 FVC 均值

Fig.9 Mean value of FVC at different altitudes

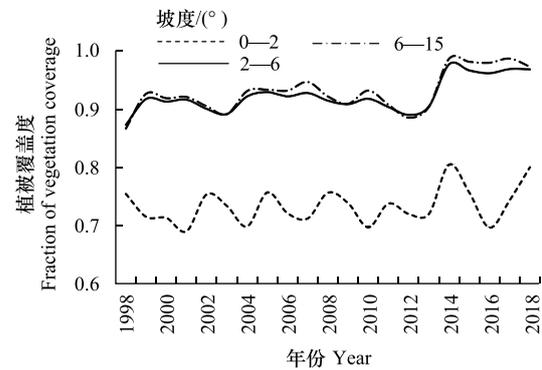


图 10 不同坡度的 FVC 均值变化

Fig.10 Mean value of FVC at different slope

表 6 各区域 FVC 变化驱动力因素

Table 6 Driving factors of FVC change in each region

区域 Region	驱动力因素 Driving factors	因变量 Dependent variable	回归方法 Regression method	回归方程 Regression equation	$R^2$	$R^2_{调整}$
满洲里	$X_2 X_9$	$Y$	多元线性回归	$Y=0.347+0.138X_2-0.073X_9$	0.759	0.526
陈巴尔虎旗	$x_1 X_2$	$Y$	多元线性回归	$Y=3.115-0.028x_1+0.119X_2$	0.656	0.613
鄂伦春自治旗	$x_1 X_2$ $X_3 X_4 X_5$	$Y$	主成分分析、 多元线性回归	$Y=0.934+0.2F_1-0.11F_2$ ( $F_1=0.582X_3+0.568X_4+0.580X_5$ $F_2=-0.700x_1+0.701X_2$ )	0.548	0.495
牙克石	$X_3$	$Y$	多元线性回归	$Y=-22.420+0.066X_3+0.012t$	0.623	0.579
新巴尔虎左旗	$X_2 X_8$	$Y$	多元线性回归	$Y=0.106+0.101X_2$	0.469	0.440
额尔古纳	$X_8 X_{10}$	$Y$	多元线性回归	$Y=0.583+0.055X_8-0.047X_{10}$	0.457	0.393
海拉尔	$X_2 X_4 x_6$	$Y$	多元线性回归	$Y=-108.284+0.167X_2-0.005x_6-0.237X_4+0.056t$	0.682	0.597
根河市	$x_5 x_6$	$Y$	岭回归 ( $k=0.376$ )	$Y=1.011+0.016X_5-0.031X_6$	0.586	0.537
新巴尔虎右旗	$X_2$	$Y$	线性回归	$Y=-0.200+0.149X_2$	0.728	0.713
鄂温克族自治旗	$x_1$	$Y$	线性回归	$Y=1.165-0.021x_1$	0.226	0.183
阿荣旗	$x_1$	$Y$	线性回归	$Y=0.470+0.022x_1$	0.207	0.163
扎兰屯	$X_4$	$Y$	线性回归	$Y=-35.99-0.065X_4+0.019t$	0.483	0.422
莫力达瓦达斡尔	—	—	—	—	—	—
呼伦贝尔市	—	—	—	—	—	—

$x_1$ :6、7、8月均温(°C), $x_2$ :6、7、8月均降水(mm), $x_3$ :GDP(万元), $x_4$ :第二产业GDP(万元), $x_5$ :人均GDP(万元/人), $x_6$ :人口密度(人/km<sup>2</sup>), $x_7$ :城镇化(%), $x_8$ :牲畜数量(头/只), $x_9$ :原煤产量(万吨), $x_{10}$ :公路里程(km); $t$ 为年份; $F_1$ :人类活动因素主成分, $F_2$ :气候因素主成分; $Y$ 为区域FVC均值。 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 分别为 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_8$ 、 $x_9$ 、 $x_{10}$ 取自然对数后的值

如图 11 所示,气候因素作为 FVC 变化主要驱动力的区域有新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗、阿荣旗和陈巴尔虎旗。在新巴尔虎右旗和新巴尔虎左旗,降水是驱动 FVC 变化的重要因素,分别可以解释 72.8% ( $R^2=0.728$ ) 和 46.9% ( $R^2=0.469$ ) 的 FVC 变化,降水增加 10%,FVC 均值约提高 0.015 和 0.010;阿荣旗和鄂温克族自治旗 FVC 变化仅与月均温具有显著地相关性,分别可以解释 20.7% 和 22.6% 的 FVC 变化。温度升高有利于阿荣旗地区 FVC 的增长却遏制鄂温克族自治旗 FVC 的增长,温度升高 1°,FVC 均值约增加 0.022 和减少 0.021。陈巴尔虎旗 FVC 的变化受温度和降水的综合影响,可以解释 65.6% 的 FVC 变化,月均温增长 1°,FVC 均值约减少 0.028,降水量增长 10%,FVC 均值约增长 0.012。温度对 FVC 影响方向的不同是因为各地区的植被类型差异造成,鄂温克族自治旗和陈巴尔虎旗以草地为主,高温会抑制这些区域生长季中后期(7、8月)草原植被的生长<sup>[37-38]</sup>,阿荣旗以林地和耕地为主,5月正值森林开始恢复生长期,农作物开始进

入播种期,温度的升高促进此阶段植被的生长。

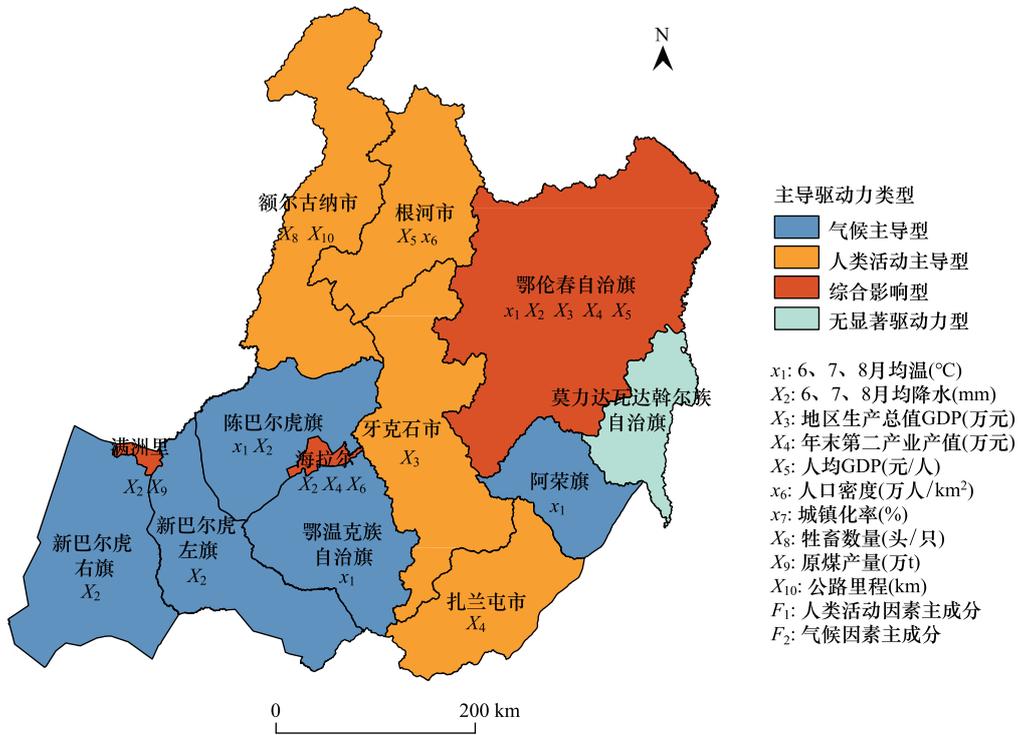


图 11 呼伦贝尔市主导驱动力类型分布图

Fig.11 Distribution map of dominant driving forces in Hulunbuir

人类活动因素作为 FVC 变化主要驱动力的区域有牙克石市、额尔古纳市、根河市和扎兰屯。在牙克石市,GDP 是驱动 FVC 变化的主要因素,可以解释 62.3%的 FVC 变化, GDP 增长 10%,FVC 均值约增长 0.007;根河市的主要驱动力为人均 GDP 和人口密度,两者可以解释 58.6%的 FVC 变化,人均 GDP 促进而人口密度抑制 FVC 的增长,人均 GDP 提高 10%,FVC 均值约增长 0.002,而人口密度增加 1 人/km<sup>2</sup>, FVC 均值约降低 0.031;可见该区域人口的增长对生态环境产生了较大的压力;额尔古纳市的主要驱动力为牲畜数量和公路里程,两者可解释 45.7%的 FVC 变化,牲畜数量和公路里程的增长对 FVC 的增长分别起到促进和抑制的作用,影响大小大致相同,每增长 10%,FVC 均值大约变化 0.005。扎兰屯的主要驱动力为第二产业 GDP,可以解释 48.3%的 FVC 变化,其增加 10%,FVC 均值约减少 0.007。

满洲里、海拉尔和鄂伦春自治旗区域的 FVC 受气候因素和人类活动因素的综合影响。满洲里主要驱动力为降水和煤炭开采,两者解释了 75.9%的 FVC 变化,降水增加 10%,FVC 均值约增加 0.014;原煤产量增加 10%,FVC 均值约减少 0.007。满洲里近年来对煤炭需求的激增,在增加煤炭进口的同时,也加大的了对煤炭的开采,从而对生态环境产生了一定的压力。海拉尔主要驱动力为降水、第二产业 GDP 和人口密度,解释了 68.2%的 FVC 变化,在去除时间趋势后,降水增加 10%,FVC 约增加 0.017;第二产业 GDP 增加 10%,FVC 约减少 0.024;人口密度增加 1/km<sup>2</sup>,FVC 减少 0.005。工业的发展与人口密度的增加对该区域生态环境产生了压力。鄂伦春自治旗以社会经济因素为主导,由 GDP、第二产业 GDP 和人均 GDP 构成的人类活动因素主成分促进 FVC 的增长,由温度和降水组成的气候因素主成分却抑制 FVC 的增长,两个主成分共解释了 54.8%的 FVC 变化。鄂伦春自治旗地理位置偏远,交通不便,尽管经济持续高速增长,总量仍偏低,第二产业发展缓慢,2017 年 GDP 70 亿元,在呼伦贝尔市 13 个县级行政区中排名第 9,但是其经济的发展促进了产业结构的改革,推动了生态农牧业、绿色食品业和生态旅游业等生态绿色产业的发展,使得生态环境具有较强的抗干扰能力(CV=0.033)并向着更好发展的趋势。

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

呼伦贝尔市作为中国北部的生态屏障,是一个典型的集地形、气候和人类活动综合影响的生态区域,其 FVC 变化具有明显的复杂性和差异性。小周期的快速波动与大周期的缓慢变化相叠加,共同构成了 1998—2018 年呼伦贝尔市 FVC 先减少后增加的整体趋势。地形因素决定了研究区土壤的质地和理化特征,影响了气流流动,形成地表植被类型自西向东由草原—森林—农田的变化,奠定了 FVC 东西低东高”的空间分布格局。降水量和气温是导致植被年际变化的重要因素之一。由于不同植被类型对水热组合胁迫响应机制的差异,适宜的水热组合加速植被生长,否则会抑制植被生长。呼伦贝尔草原大部分时间受强大陆性气团的控制,暖湿气流因大兴安岭的阻隔难以到达草原腹地,降水量由东向西递减,而温度的升高加速了土壤水分的蒸发。因此在西部草原区,降水促进 FVC 增长,温度升高抑制 FVC 增长;在降水充足的东南林、耕地混合区,适当的升温促进 FVC 增长;而在植被类型相对多样的东部地区,不适宜的水热组合(降水多、温度低)则会抑制 FVC 增长。以上与李林业<sup>[34]</sup>、何思源<sup>[39]</sup>、牛钰杰<sup>[40]</sup>、阿多<sup>[41]</sup>等学者在呼伦贝尔市或相似地区的相关研究中得到的结果基本一致。

人类活动因素是导致植被年际变化的另一重要因素。由研究结果可以发现人类活动因素主导区分布在呼伦贝尔中部地区,经济的发展促进这些区域 FVC 均值的生长,仅在扎兰屯表现为抑制,而扎兰屯正处理于工业发展初级阶段,第二产业发展迅猛,但是快速发展带来的产业结构不合理问题,对当地的生态环境产生了一定压力;放牧活动仅在额尔古纳市有显著影响且表现为促进,经查阅相关文献,2011 年之前额尔古纳市实际载畜量并未达到理论载畜量,畜牧业仍有发展潜力<sup>[42]</sup>,2012 年之后虽然出现过超载的情况<sup>[43]</sup>,但是随着“十二五”以来政府对生态的逐渐重视并积极推动畜牧业结构转型升级,畜牧业的合理发展反而促进着 FVC 的增长;煤炭开采仅对区域面积较小的满洲里有显著影响,而对矿点数量、原煤产量更多,但是区域面积较大的陈巴尔虎旗无显著影响,这一方面因为开采活动对环境产生的破坏仅局限于矿区周边一定的区域范围内,另一方面矿区对受损土地的土地复垦工作成效显著,所以对于大区域 FVC 均值的变化影响不显著。文进磊<sup>[44]</sup>、凤一鸣<sup>[45]</sup>、郭文彬<sup>[18]</sup>等学者在关于呼伦贝尔市相关研究中亦有类似发现。

可见气候因素和人类活动因素对呼伦贝尔市 FVC 变化的影响具有双向性,以气候因素主导的西部地区,气温相对较高,充足的水分供应,将有效促进这些区域植被的生长;以人类活动因素主导的中部地区,合理的产业结构在保证经济增长的同时也可以推动当地生态发展;而满洲里、海拉尔与扎兰屯市,其工业发展在一定程度上对当地生态环境产生了负面影响,需引起有关部门的重视。相信在正确的政策与合理的规划下,可以达到社会经济发展的同时促进生态环境可持续发展,实现人与自然的和谐统一。

本研究有许多不足仍要改进:1.遥感数据的空间分辨率为 1 km,虽完全胜任研究区的 FVC 变化监测,但是利用更高空间分辨率的数据可获取更精确的变化信息;2.由表 6 可知,所选驱动力因素对研究区 FVC 变化的解释能力十分有限。这是因为呼伦贝尔的气候、地形地貌、经济结构和植被类型等空间差异较大,研究单元的大小会直接影响驱动力因素对 FVC 的作用效果。以市或县级行政区为单元,驱动力研究结果迥乎不同,因此进一步缩小研究尺度以乡镇甚至以像元为研究单元,将会更有利于开展 FVC 变化的驱动力研究。3.本研究仅分析了各区域 FVC 的驱动力因素以及其影响方向和影响程度,未能进一步确定植被生长与驱动力因素间耦合的最佳范围。

### 4.2 结论

本文基于 1998—2018 年 SPOT/VEGETATION NDVI 数据集,分析了呼伦贝尔市 FVC 时空变化特征,并结合地形、气候和人类活动数据研究了 FVC 变化的驱动力因素组成及其影响方式,主要结论如下:

1)1998—2018 年呼伦贝尔市 FVC 均值在低波动中缓慢增长,以 4—5 年为周期,周期内 FVC 先减少后增长。1998—2004 年研究区 FVC 均值有降低趋势,在 2001 年达到最低值 0.78;2004—2018 年为增长趋势,在

2014 达到最高值 0.87。

2) FVC 类型以极高和高为主,中、低和极低面积依次递减且总和仅占 10%—15%。FVC 极显著增加和显著增加区域、变化不显著区域、显著减少和极显著减少区域面积分别为 135720.57 km<sup>2</sup>(53.56%)、107140.74 km<sup>2</sup>(42.28%)、10569.06 km<sup>2</sup>(4.17%)。

3) 1998—2018 年呼伦贝尔市 FVC 在空间上呈现“西减东增”的变化格局。位于西部的新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、陈巴尔虎旗、海拉尔、满洲里、鄂温克族自治旗的植被呈退化趋势的比例较高;位于中部的扎兰屯、根河市、牙克石、额尔古纳和东部的鄂伦春自治旗的植被状况明显好转。

4) 地形因素奠定了呼伦贝尔市 FVC“西低东高”的空间分布格局,气候和人类活动因素影响 FVC 的年内变化且不同区域的驱动力具有差异性与双向性。西部地区(新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗、鄂温克族自治旗、陈巴尔虎旗)和阿荣旗以气候因素为主导,降水量的增长对 FVC 的增长普遍具有促进作用;中部地区(牙克石市、额尔古纳市、根河市和扎兰屯)以人类活动因素为主导,合理的产业结构在保证经济增长的同时也可以推动当地生态发展;而满洲里、海拉尔和鄂伦春自治旗则受气候因素与社会经济因素的综合影响,其中满洲里和海拉尔的工业发展在一定程度上对当地生态环境产生了负面影响。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展. 地理学报, 2016, 71(12): 2067-2088.
- [ 2 ] Hoffmann W A, Jackson R B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1593-1602.
- [ 3 ] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [ 4 ] 彭飞, 范闻捷, 徐希孺, 刘星. 2000—2014 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 563-572.
- [ 5 ] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [ 6 ] 刘家琰, 谢宗强, 申国珍, 樊大勇, 熊高明, 赵常明, 周友兵, 徐文婷. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的神农架林区 1998—2013 年植被覆盖度格局变化. 生态学报, 2018, 38(11): 3961-3969.
- [ 7 ] 王泽辉. 九江市植被覆盖时空动态变化及驱动力因子分析[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- [ 8 ] 何奕萱. 2001—2015 年西南纵向岭谷区植被 EVI 变化趋势与驱动力分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [ 9 ] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [ 10 ] 谭学玲. 榆神府煤矿区土地退化动态演变及驱动力分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [ 11 ] Peng J, Liu Y H, Shen H, Han Y N, Pan Y J. Vegetation coverage change and associated driving forces in mountain areas of Northwestern Yunnan, China using RS and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(8): 4787-4798.
- [ 12 ] 侯勇, 陈文龙, 钟成. 内蒙古地区植被覆盖度时空变化遥感监测. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 35-40.
- [ 13 ] 吴蔚. 煤炭开采与生态保护耦合关系研究[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [ 14 ] 张圣微, 张睿, 刘廷玺, 徐冉, 张鹏. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析. 农业机械学报, 2017, 48(3): 253-260.
- [ 15 ] 万华伟, 高帅, 刘玉平, 臧春鑫, 许时光. 呼伦贝尔生态功能区草地退化的时空特征. 资源科学, 2016, 38(8): 1443-1451.
- [ 16 ] 胡志超, 李政海, 周延林, 鲍雅静, 张靖, 黄朔, 元征征, 洪光宇, 张文海. 呼伦贝尔草原退化分级评价及时空格局分析. 中国草地学报, 2014, 36(5): 12-18.
- [ 17 ] 郭文彬, 刘志斌, 马传斌, 张建华. 呼伦贝尔草原已闭坑露天矿生态恢复研究. 煤炭工程, 2016, 48(2): 131-133.
- [ 18 ] 汪洪旭. 农业旅游开发对内蒙呼伦贝尔草原生态环境的影响. 水土保持研究, 2015, 22(2): 290-294.
- [ 19 ] 芳芳. 内蒙古牧草地面积变化及退化加剧的驱动力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [ 20 ] 郭连发, 来全, 伊博力, 银山. 2000—2014 年呼伦贝尔沙地河流湿地植被 NPP 时空变化及驱动力分析. 水土保持研究, 2017, 24(6): 267-272.
- [ 21 ] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in inner Mongolia. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982.
- [ 22 ] Fu X, Ma M F, Jiang P, Quan Y. Spatiotemporal vegetation dynamics and their influence factors at a large coal-fired power plant in Xilinhot, Inner Mongolia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24(5): 433-438.

- [23] 黄悦悦, 杨东, 冯磊. 2000—2016 年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2515-2523.
- [24] 李冰洋. 南阳市区城市建设用地扩张及驱动力分析[D]. 开封: 河南大学, 2015.
- [25] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [26] Ohana-Levi N, Paz-Kagan T, Panov N, Peeters A, Tsoar A, Karnieli A. Time series analysis of vegetation-cover response to environmental factors and residential development in a dryland region. *Giscience & Remote Sensing*, 2019, 56(3): 362-387.
- [27] Middleton N. Rangeland management and climate hazards in drylands: dust storms, desertification and the overgrazing debate. *Natural Hazards*, 2018, 92(S1): 57-70.
- [28] 徐新良. 中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/> DOI), 2018. DOI: 10.12078/2018060603.
- [29] 贺菊煌. 我国资产的估算. 数量经济技术经济研究, 1992, 9(8): 24-27.
- [30] 杰弗里·M. 伍德里奇. 计量经济学导论(第四版). 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [31] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [32] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [33] 陈效速, 王恒. 198—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.
- [34] 李林叶, 田美荣, 梁会, 陈艳梅, 冯朝阳, 渠开跃, 钱金平. 2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 584-591.
- [35] Park M, Yang M. Ridge regression estimation for survey samples. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 2008, 37(4): 532-543.
- [36] 李京京. 黄土高原地区土地利用/覆被变化及其驱动力分析研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [37] 李霞, 李晓兵, 陈云浩, 莺歌. 中国北方草原植被对气象因子的时滞响应. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1054-1062.
- [38] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30.
- [39] 何思源, 刘鸿雁, 任佶, 印轶. 内蒙古高原东南部森林-草原交错带的地形-气候-植被格局和植被恢复对策. 地理科学, 2008, 28(2): 253-258.
- [40] 牛钰杰, 周建伟, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 花立民. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1489-1497.
- [41] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [42] 王瑞杰, 覃志豪, 王桂英. 呼伦贝尔草原产草量及载畜平衡研究. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(12): 1782-1785.
- [43] 李梦娇, 李政海, 鲍雅静, 张靖, 刘丽, 李卓玲. 呼伦贝尔草原载畜量及草畜平衡调控研究. 中国草地学报, 2016, 38(2): 72-78.
- [44] 文进磊. 中国民族地区县域经济发展实证研究——以扎兰屯为例. 中央民族大学学报: 哲学社会科学版, 2015, 42(5): 30-36.
- [45] 凤一鸣. 宝日希勒露天煤矿对植被恢复及天然草地的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.