DOI: 10.5846/stxb202004180928
陈宽,杨晨晨,白力嘎,陈瑜,刘锐,潮洛濛.基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响.生态学报,2021,41(12):4963-4975.
Chen K,Yang C C,Bai L G,Chen Y, Liu R, Chao L M.Effects of natural and human factors on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia.Acta Ecologica Sinica,2021,41(12):4963-4975.

基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响

陈 宽[1,2],杨晨晨[1,2],白力嘎[3],陈 瑜[1,2],刘 锐[1,2],潮洛濛[1,2,*]

1 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

2 内蒙古草地生态学重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 呼和浩特 010021

3 内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022

摘要:研究区域植被覆盖度变化趋势并探寻其驱动因素对于维护生态安全具有重要意义。将内蒙古旗县分为牧业旗县和非牧业旗县,应用线性趋势分析法和地理探测器模型探讨 2000—2015 年自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响。结果表明:(1)2000—2015 年内蒙古地区植被覆盖度总体上呈增加趋势,但空间上显现出西部减少,东部与南部增加的趋势;非牧业旗县植被 NDVI 改善面积大于牧业旗县。(2)在整个内蒙古地区中,年降水量和土壤类型是影响植被 NDVI 的主要驱动因素,解释率在 22%以上。在牧业旗县年降水量和土壤类型是主要驱动因素,而在非牧业旗县中粮食产量是最主要的驱动因素。(3)各因子之间的交互影响均高于单因子的影响。在牧业旗县,因子之间的交互作用呈现出非线性增强和双因子增强关系,植被 NDVI 变化受乡村户数和牲畜数量的交互影响最为突出。非牧业旗县因子之间呈现出非线性增强的交互作用关系,植被 NDVI 变化受土壤类型和粮食产量的交互影响最为明显。

关键词:地理探测器;植被 NDVI;内蒙古;人为因素;自然因素;牧业旗

Effects of natural and human factors on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia

CHEN Kuan[1,2],YANG Chenchen[1,2],BAI Liga[3],CHEN Yu[1,2], LIU Rui[1,2], CHAO Luomeng[1,2,*]

1 *College of Ecology and Environment,Inner Mongolia University,Hohhot* 010021,*China*

2 *Inner Mongolia Key Laboratory of Grassland Ecology,Hohhot* 010021,*China*

3 *Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Inner Mongolia Normal University, Hohhot* 010022, *China*

Abstract: Exploring the regional vegetation cover change and its driving factors are of great importance for sustaining ecological safety. In this study, we divided banners and counties of Inner Mongolia into pastoral counties and non-pastoral counties. The linear trend analysis method and geographic detector modeling were applied to examine the effects of natural and human factors on vegetation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) values from 2000 to 2015. The results showed that the spatial and temporal variation of vegetation coverage decreased in the western of Inner Mongolia, while increased in the eastern and southern of Inner Mongolia from 2000 to 2015, with no significant changes in the other regions. The vegetation NDVI value was improved more in the non-pastoral counties than that in the pastoral counties. In the whole Inner Mongolia, annual precipitation and soil types were the main factors driving the change of vegetation NDVI, explaining the variation of more than 22%. The interaction among all factors was higher than the individual effect of each factor. Furthermore, in pastoral counties, the interaction among all factors tended to a nonlinear enhancement and double factor

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC050604-4);国家自然科学基金项目(31060117)

收稿日期:2020-04-18; **网络出版日期**:2021-04-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: colmvn@aliyun.com

enhancement, with the strongest interaction between rural households and livestock numbers on the vegetation NDVI. The interaction among all factors showed a nonlinear enhancement in non-pastoral counties, with the strongest interaction between soil types and grain yield on the vegetation NDVI.

Key Words: geographic detector; vegetation NDVI; Inner Mongolia; human factors; natural factors; pastoral county

植被是陆地生态系统重要的组成部分[1],是陆地生态系统物质循环、能量流动、信息传递的重要枢纽[2]。植被覆盖度变化表示着整个陆地生态系统一定程度上的波动或变化[3]。特别是在干旱半干旱地区,植被覆盖度变化是监测和评价生态环境变化的一个重要指标[4],所以定量分析区域植被覆盖度变化并探寻其驱动因素对于生态环境建设具有重要的意义。利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)研究植被生长状况,已经被国内外学者广泛应用[5-9]。引起植被覆盖度变化的影响因素主要分自然和人为因素,特别是在我国社会经济快速发展下,人为因素更加不可忽视[10]。

内蒙古是典型的干旱、半干旱地区,生态环境具有脆弱性和不稳定性。该区是我国北部的重要生态屏障,也是我国重要的农牧业生产基地。目前较多学者在内蒙古从不同的尺度和方法探索了自然或人为因素对于植被变化的研究[11-14]。Zhou 等[15]用残差趋势分析法研究了蒙古高原植被变化驱动力;李仕冀等[16]在县级尺度上,利用多重线性回归模型分析了整个内蒙古地区乡村人口迁出对植被 NDVI 的影响;史娜娜等[11]利用趋势分析法研究了锡林郭勒植被 NDVI 时空变化;周锡饮等[17]基于 GIMMS NDVI 分析了 1981—2006 年蒙古高原植被覆盖度变化。上述研究是以整个内蒙古或者以部分盟市为研究区,分析植被变化特征及单因子对植被的影响。并在因素分析方面,自然因素中以气候因素为主,社会因素中以载畜量为主。而以盟市下一级行政单位旗县区为研究对象,以及因子之间的交互作用对植被覆盖度变化的影响研究较少。

内蒙古自治区旗县区按照产业特点主要分为牧区、半农半牧区、农区和城区等类型。牧区以放牧为主,天然草地为主要植被类型,其余旗县以非牧业为主[18]。不同的生活生产方式对生态系统的影响也有所不同。本文以旗县区为研究单位,分为牧业旗县区和非牧业旗县区,利用地理探测器方法[19]分析自然因子(气候、高程、土壤、植被类型、地貌类型)和人为因子(乡村人口、乡村劳动力、乡村户数、粮食产量、农牧民人均收入、牲畜数量)的单因子作用和双因子交互作用对植被覆盖度变化的影响。本研究进一步认清自然因子和人为因子对内蒙古植被变化中的作用,并且为实施地方经济“生态优先,绿色发展”提供重要的科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于中国北部边疆,界于 37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E 之间,土地总面积约为 118.3 万 km^2。内蒙古地域辽阔,地势较高,全区地貌以蒙古高原为主体,具有复杂多样的形态[20]。除东南部外,基本都是高原。内蒙古是我国北部的重要生态屏障,属于干旱、半干旱气候,是全球变化最为敏感的区域之一[21]。

内蒙古包括 11 个盟市,包括 52 个旗、17 个县、11 个盟(市)辖县级市、23 个市辖区。牧业旗县 33 个,这些牧业旗县生产方式主要以牧业为主[18]。非牧业旗县包括市辖区、农区或半农半牧地区,以非牧业产业为主(图 1)。牧业旗县占内蒙古自治区总面积的 67.75%,非牧业旗县占 32.25%。

1.2 数据来源

植被 NDVI、自然因素和行政矢量边界数据来自于中国科学院资源环境科学数据(http://www.resdc.cn)。NDVI 是年度植被指数,是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成。自然因素包括气候、高程、土壤、植被、地貌类型。其中气候数据是通过插值计算的分辨率为 1 km×1 km的年降水量和年平均气温栅格图。高程是基于最新的 SRTM V4.1 数据经重采样生成的 1 km 数据。土壤、地貌和植被类型分布数据分别来源于中国土壤普查办公室 1995 年编制《1:100 万中华人民共和国土壤

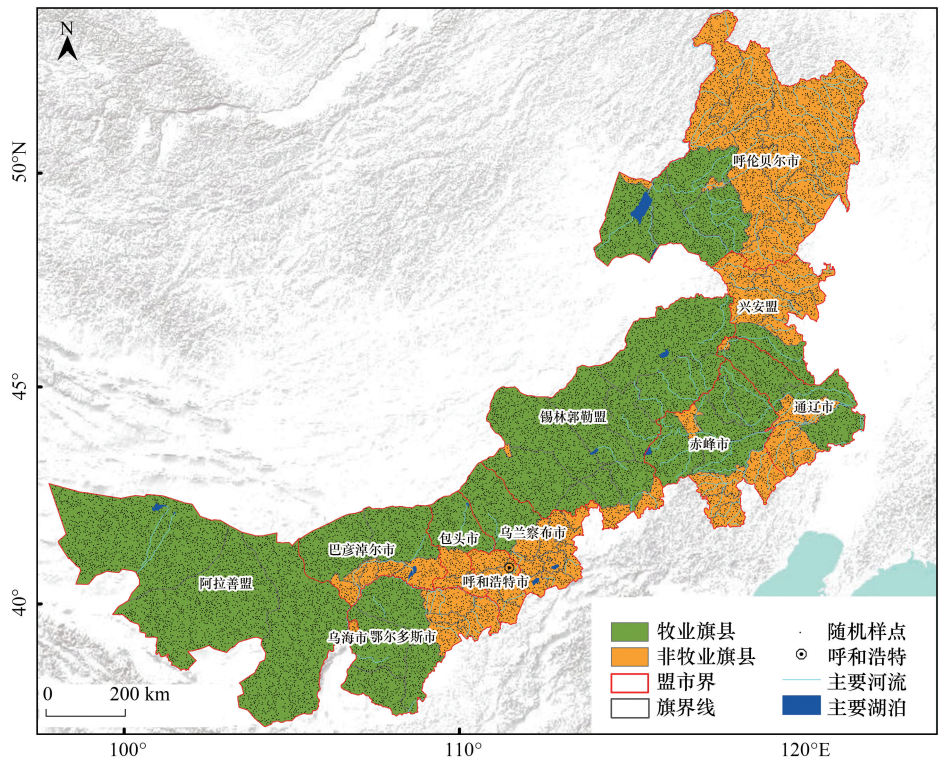

图 1　研究区位置

Fig.1　Location of the study area

图》、《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》和 1:100 万植被图数字化生成的图,分辨率为 1 km;坡度、坡向由分辨率为 1 km 的 DEM 数据计算获取。人为因素数据来源于内蒙古统计年鉴,包括乡村人口、乡村劳动力、乡村户数、粮食产量、农牧民人均收入、牲畜数量(统一换算成羊单位:骆驼、马、牛相当于 5 只绵羊,山羊则 1 只)。本研究根据内蒙古统计年鉴进行牧业旗县与非牧业旗县的划分。

1.3　研究方法

1.3.1　趋势线分析

本研究采用趋势线分析方法对研究时间段内 NDVI、气候和人为因素的变化趋势进行分析[22],即以时间 t 为自变量,分别对 NDVI、年均气温、年降水量以及 6 个人为因素进行一元线性回归分析。计算公式如下:

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\sum_{i=1}^{n} i\,x_i-\sum_{I=1}^{n} i\sum_{i=1}^{n} x_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2-\left[\sum_{i=1}^{n} i\right]^2} \tag{1}$$

式中,Slope 是 2000—2015 年 NDVI、气候或人为要素的线性回归系数,即斜率,如果回归系数为正,说明该变量在研究时段呈上升趋势,反之,该变量呈下降趋势;n 为研究时段年数,i 表示 1 到 n ,n = 16;x 为待分析变量(分别为生长季年均 NDVI、年均温、年降水量或人为因素)。

1.3.2　植被 NDVI 变化等级划分

为了更好地定量分析植被覆盖度在时间上的变化,利用 NDVI 序列与时间的相关系数 r 判断了植被覆被变化程度和性质,并且利用相关系数的大小进行显著性判断[23]。显著性临界值查相关系数检验临界值表获得(样本数为 16 时,显著性水平在 0.05 和 0.01 时临界值分别为 0.468,0.590)。根据 NDVI 变化趋势斜率及显著性临界值,将植被变化类型分为极显著退化(斜率<0,显著性临界值≥0.590)、显著退化(斜率<0,0.590>显著性临界值≥0.468)、无显著变化(斜率(−∞ ,+∞),0.468>显著性临界值)、显著改善(斜率>0,0.590>显著

性临界值≥0.468)、极显著改善(斜率>0,显著性临界值≥0.590)五类。

1.3.3 指标选取与信息提取

(1)指标选取。探究植被 NDVI 变化因素,应该从自然和人为两个方面综合分析[24]。大量研究表明,内蒙古植被的变化与气候因素高度相关,尤其是与降水量[25-26]。内蒙古地域辽阔,从东到西在土壤、植被、地质地貌上均有很大的差别,例如植被类型,从东部的针叶林到中部的草原,再到西部的荒漠[27]。所以本文选取了 7 类自然因素(年降水量、年平均气温、土壤类型、植被类型、地质地貌类型、坡度和坡面)。近年来人为因素对内蒙古植被 NDVI 的影响研究日趋见长。本文重点考虑乡村地区的因素对植被 NDVI 的影响,尽管内蒙古城镇人口不断地在增长,但内蒙古城镇面积占比很小,而且城镇人口对于植被的影响相比于乡村地区人口对植被的影响小很多。根据以往的研究,乡村地区的指标大多数会选择乡村总人口、乡村劳动力或牲畜数量。本文在以往研究的基础上再加上了乡村户数、农牧民人均纯收入和粮食产量。户是家庭单位,在乡村地区进行生产生活均是由户单位来进行的,虽然内蒙古乡村人口减少显著,但在县级尺度上,有些旗县呈现乡村人口减少,但户数不变或增加的现象。本文将用粮食产量的变化来代表农业水平的发展程度。由于耕地在牧业旗县里占比很少,所以本文踢出了在牧业旗县里的粮食产量变化,以提高结果的准确性。所以本文选取了 6 类人为因素(乡村总人口、乡村劳动力、乡村户数、农牧民人均纯收入、粮食产量和牲畜数量)。表 1 列出了全部因素及解释。

(2)信息提取。利用 ArcGIS 10.3 的 Create Random Points 功能生成间隔为 2 km 的随机点,共 19897 随机点。然后以随机点来提取 NDVI 与各因素值(图 1)。

表 1 影响内蒙古植被 NDVI 变化的自然因素和人为因素

Table 1 Natural and human factors affecting NDVI variation of vegetation in Inner Mongolia

类别 Category	因素 Factors	解释 Explanation
自然因素	年降水量	2000—2015 年降水量变化趋势,公式(1)计算
Natural factors	年平均气温	2000—2015 年平均气温变化趋势,公式(1)计算
	坡度	由分辨率为 1 km 的 DEM 数据计算
	坡向	由分辨率为 1 km 的 DEM 数据计算
	土壤类型	1995 年编制《1:100 万中华人民共和国土壤图》数字化生成的图,分辨率为 1 km
	植被类型	1995 年编制《1:100 万中华人民共和国植被图》数字化生成的图,分辨率为 1 km
	地貌类型	1995 年编制《1:100 中华人民共和国地貌图集》数字化生成的图,分辨率为 1 km
人为因素	乡村人口变化	2000—2015 年乡村人口变化趋势,公式(1)计算
Human factors	乡村户数变化	2000—2015 年乡村户数变化趋势,公式(1)计算
	乡村劳动力变化	2000—2015 年乡村劳动力变化趋势,公式(1)计算
	粮食产量变化	2000—2015 年粮食产量变化趋势(代表农业发展水平),公式(1)计算
	农牧民人均纯收入变化	2000—2015 年农牧民人均纯收入变化趋势,公式(1)计算
	牲畜数量变化	2000—2015 年牲畜数量变化趋势,公式(1)计算

1.3.4 地理探测器

地理探测器是王劲峰等人首次提出的一种探测空间分异性、揭示驱动因子的一种新的空间统计方法。地理探测器由 4 部分组成,分别是因子探测、交互作用探测、风险探测与生态探测,本文应用了前三个。

(1)空间分异及因子探测。探测 y(NDVI)的空间分异性,以及探测各因子多大程度上解释了属性 y(NDVI)的空间分异。用 q 值度量,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{2}$$

$$\mathrm{SSW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \text{ , } \mathrm{SST} = N \sigma^2$$

式中,$h = 1,\cdots, L$ 为变量 y(NDVI)或因子 X(某个自然或人为因子)的分层(Strata),即分类或分区;N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数;σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和(Within Sum of Squares)和全区总方差(Total Sum of Squares)。q 的值域为[0,1],值越大说明 y(NDVI)的空间分异性越明显;如果分层是由自变量 x 生成的,则 q 值越大表示自变量 x 对属性 y 的解释力越强,反之则越弱。

(2)交互作用探测。识别不同自变量因子之间的交互作用,即评估因子 x_1 和 x_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 y 的解释力。评估的方法是首先分别计算两种因子 x_1 和 x_2 对 y 的 q 值:$q(x_1)$ 和 $q(x_2)$,并且计算它们交互时的 q 值:$q(x_1 \cap x_2)$,并对 $q(x_1)$、$q(x_2)$ 与 $q(x_1 \cap x_2)$ 进行比较。表 2 展现出了两个因子之间的关系。

表 2　两个自变量交互作用的类型

Table 2　Types of interaction between two covariates

交互作用类型 Interaction	判断准则 Judgment Criteria
双因子增强 Enhance, bivariate	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1)$ and $q(x_2)$
非线性增强 Enhance, nonlinear	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$
单因子非线性减弱 Weaken, univariate	$q(x_1 \cap x_2) < q(x_1)$ or $q(x_2)$
非线性减弱 Weaken, nonlinear	$q(x_1 \cap x_2) < q(x_1)$ and $q(x_2)$
独立 Independent	$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$

x_1 和 x_2 代表植被退化的影响因子。符号"∩"表示 x_1 和 x_2 之间的交互作用

(3)风险区探测。风险探测用于判断两个影响因子(包括自然和人为因子)子区域间的属性均值是否有显著的差别,用于寻找植被覆盖度退化或改善区域。风险探测用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\mathrm{Var}\,(Y_{h=1})}{n_h = 1} + \frac{\mathrm{Var}\,(Y_{h=2})}{n_h = 2}\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{3}$$

式中,$\bar{Y}$ 为子区域 h 内植被 NDVI 线性回归系数的均值;n_h 为子区域 h 内样本数量;Var 表示方差。

1.3.5　数据的离散化

为了定量评价并且揭示自然和人为因子对植被覆盖度的影响本文应用了地理探测器,地理探测器是针对离散数据的算法,所以对连续变量(本文 13 个自变量中,除了植被类型、土壤类型、地貌类型、坡向,其它均是连续变量)进行了离散化处理。本文采取自然断点法[28],将坡度分为 9 类,其余因素分为 10 类(图 2,图 3)。

2　结果分析

2.1　植被 NDVI 时空变化

2000—2015 年,16 年间整个研究区 NDVI 在空间上增加和减少共存,总体上呈增加趋势。空间上显现出西部减少,东部与南部增加的趋势,其余地区变化较小。研究时段内植被改善面积大于植被退化面积,其中极显著改善面积达到了 249842.65 km^2,占整个内蒙古总面积的 21.88%,显著改善面积占 10.88%,无变化 64.38%,显著退化 1.88%,极显著退化 1.00%(表 3)。在空间上植被退化与植被改善区域分布不均匀,退化区域主要分布在阿拉善盟的西北部和个别城镇周围(图 4)。牧业旗县植被极显著改善面积占比达到了 9.65%,显著改善 7.24%,无变化 79.34%,显著退化 2.56%,极显著退化 1.20%(表 3)。牧业旗县植被退化面积占比超过了整个研究区植被退化面积占比,表明牧业旗县植被退化相对于整个研究区较严重;植被改善面积占比低于整个研究区改善面积占比,表明相对于整个研究区改善水平低于全局改善水平。非牧业旗县植被极显著改善面积占比达到了 47.54%,显著改善 18.52%,无变化 33.00%,显著退化 0.35%,极显著退化 0.57%(表 3),可以看出植被改善区域主要分布在非牧业旗县。

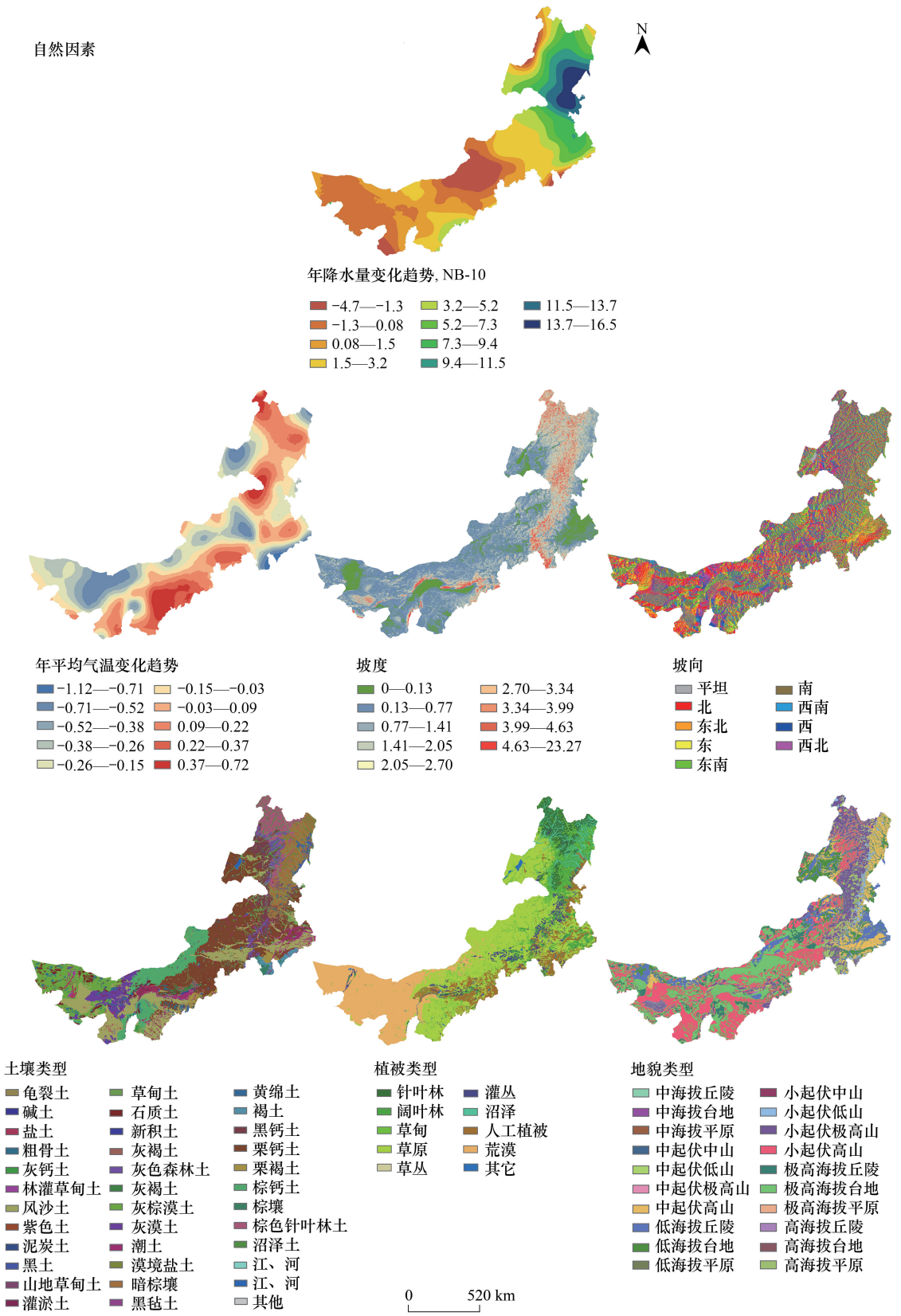

图 2 2000—2015 年自然因子空间分布

Fig.2 The spatial distribution of natural factors in 2000—2015

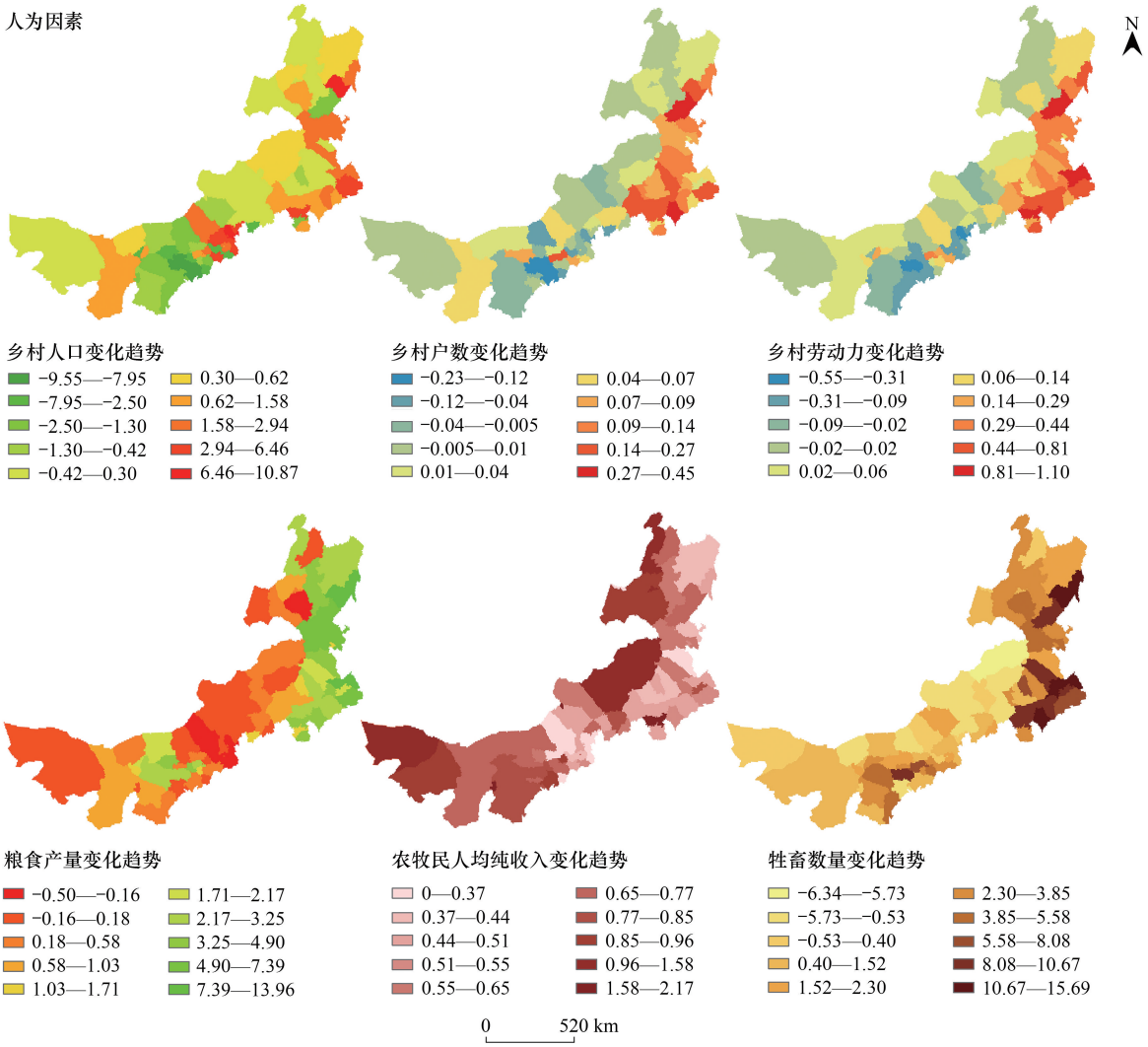

图 3　2000—2015 年人为因子空间分布

Fig.3　The spatial distribution of anthropogenic factor in 2000—2015

表 3　NDVI 不同变化等级面积及占比

Table 3　Area and proportion of different NDVI varying grades

分区 Partition	分级 classification	极显著退化 Very significant degradation	显著退化 Significant degradation	无显著变化 No change	显著改善 Significant improvement	极显著改善 Very significant improvement
全部区域	面积/km^2	11458.14	21105.13	734992.38	124233.05	249842.65
All counties	百分比/%	1.00	1.84	64.38	10.88	21.88
牧业旗县	面积/km^2	9335.95	19785.55	613648.39	56000.29	74631.31
Pastoral counties	百分比/%	1.20	2.56	79.34	7.24	9.65
非牧业旗县	面积/km^2	2118.41	1312.53	121529.47	68199.76	175069.49
Non-pastoral counties	百分比/%	0.57	0.35	33.00	18.52	47.54

2.2　探测因子单因素分析

从整个研究区尺度来看,自然因素对植被 NDVI 变化的影响高于人为因素,各因子对植被 NDVI 变化影响程度排序为:年降水量>土壤类型>植被类型>粮食产量>牲畜数量>农牧民人均纯收入>乡村户数>乡村人口>地貌类型>乡村劳动力>年平均气温>坡度>坡向。自然因素中年降水量、土壤类型及植被类型的影响最为显著,年降水量与土壤类型的 q 值分别是 0.2244 和0.2232,解释率在 22%以上,植被类型 q 值为 0.1720,解释率

在 17%以上。人为因素中粮食产量和牲畜数量对植被 NDVI 变化的影响较大,其 q 值分别是 0.1186 和0.1182,解释力在 11%以上(表 4)。

在牧业旗县,自然因素对植被 NDVI 变化的影响高于人为因素。各因子 q 值从大到小排序依次为:年降水量>土壤类型>植被类型>农牧民人均纯收入>牲畜数量>乡村户数>地貌类型>乡村人口>乡村劳动力>年平均气温>坡面>坡度。自然因素中年降水量、土壤类型 q 值较大,分别达到了 0.2638 和 0.2346,解释率均在 23%以上,其次为植被类型,q 值为 0.1800,解释率在 18%以上。人为因素而言,农牧民人均纯收入和牲畜数量影响较大,q 值分别为 0.1435 和 0.1167,解释率在 11%以上(表 4)。

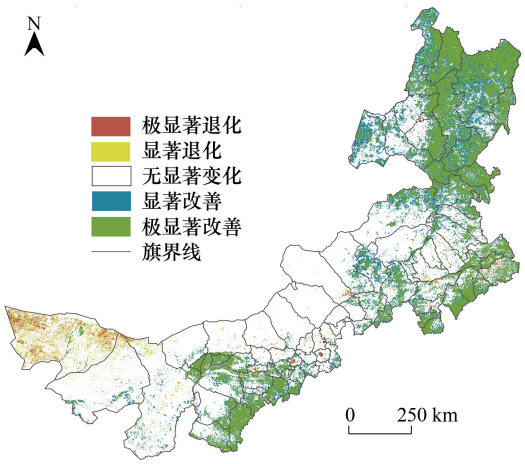

图 4 2000—2015 年内蒙古基于 NDVI 年际变化趋势及其显著性的植被变化状况空间分布

Fig.4 Spatial distribution of vegetation change in Inner Mongolia from 2000 to 2015 based on the interannual variation trend of NDVI and its significance

在非牧业旗县,人为因素对植被 NDVI 变化的影响高于自然因素。各因素 q 值从大到小排列依次为:粮食产量>乡村劳动力>年平均气温>土壤类型>年降水量>乡村户数>农牧民人均纯收入>牲畜数量>乡村总人口>地貌类型>坡度>植被类型>坡向。人为因素中粮食产量的影响最大,q 值为 0.1131,解释率在 11%以上;其次为乡村劳动力,q 值为 0.0896,解释率为 7%以上。自然因素中年平均气温、土壤类型和年降水量的影响较大,q 值依次为 0.0875、0.0871 和 0.0781,解释率均在 7%以上(表 4)。

表 4 导致内蒙古牧业旗县和非牧业旗县植被 NDVI 变化的主要影响因素及 q 值

Table 4 Main influencing factors and q values of NDVI changes in pastoral counties and non- pastoral counties in Inner Mongolia

因素分类 Factors classification	因素 Factors	全区 All counties	牧业旗县 Pastoral counties	非牧业旗县 Non-pastoral counties
自然因素	降水	0.2244	0.2638	0.0781
Natural factors	气温	0.0341	0.0291	0.0876
	土壤	0.2233	0.2346	0.0872
	植被类型	0.1720	0.1800	0.0098
	坡度	0.0134	0.0040	0.0111
	坡面	0.0124	0.0181	0.0041
	地貌类型	0.0649	0.0661	0.0220
人为因素	乡村人口	0.0670	0.0639	0.0346
Human factors	乡村户数	0.0695	0.0691	0.0747
	乡村劳动力	0.0532	0.0535	0.0896
	农牧民人均纯收入	0.0856	0.1435	0.0652
	粮食产量	0.1186	0.0000	0.1132
	牲畜数量	0.1182	0.1167	0.0482

2.3 探测因子交互作用分析

在研究区植被 NDVI 变化中,双因子之间的交互作用呈现出两种关系,即非线性增强和双因子增强,不存在独立起作用的因子。

在牧业旗,双因子之间的交互作用对植被NDVI变化的解释率高的6组为(图5):乡村户数∩牲畜数量

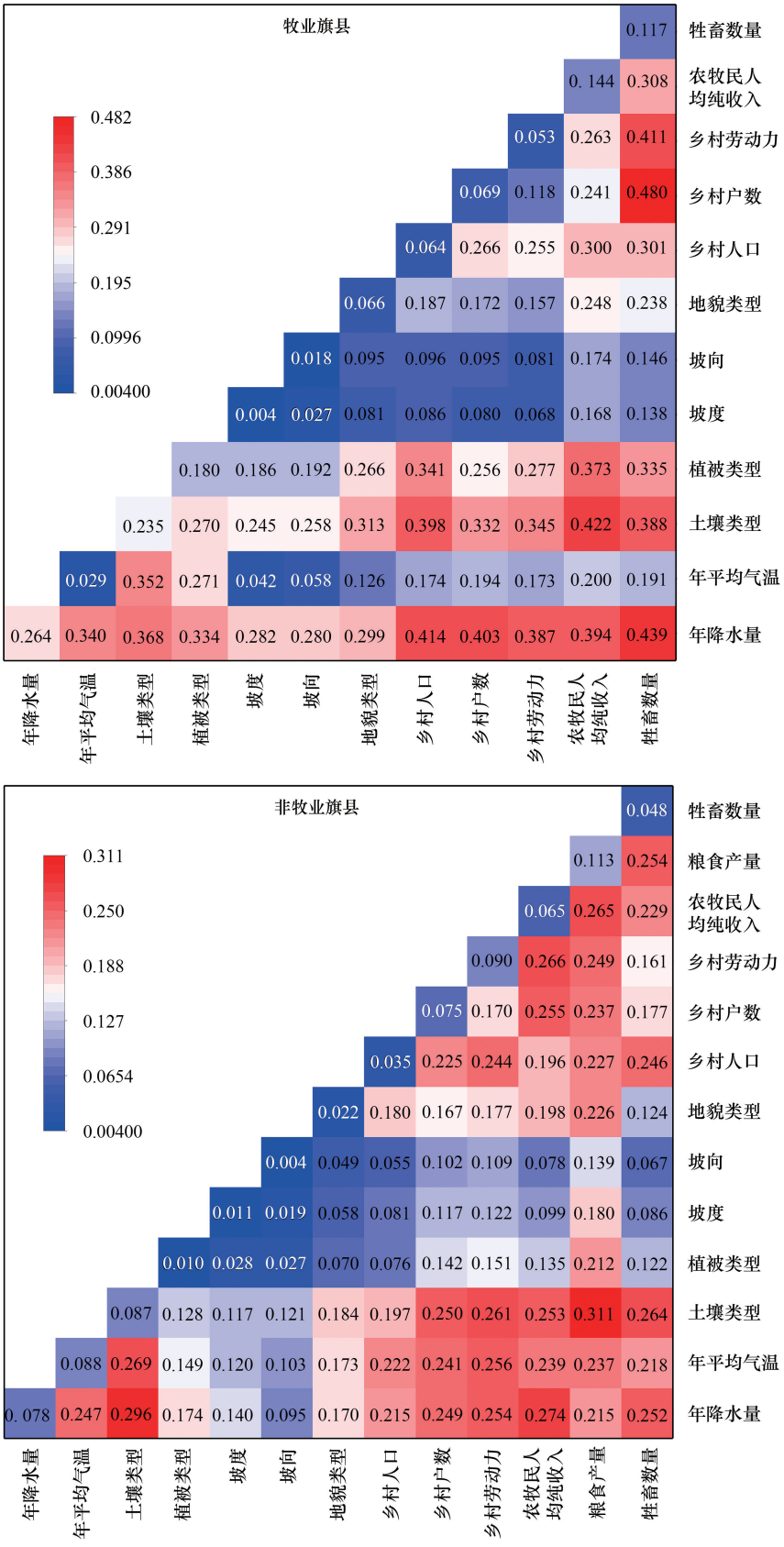

图 5　2000—2015 年导致植被 NDVI 变化的因子之间交互作用探测

Fig.5　Interaction detection between the factors leading to NDVI changes in vegetation from 2000 to 2015

(0.480)>年降水量∩牲畜数量(0.439)>土壤类型∩农牧民人均纯收入(0.422)>年降水量∩乡村户数(0.414)>乡村劳动力∩牲畜数量(0.411)>年降水量∩乡村户数(0.403)。表明双因子之间的交互作用中,乡村户数和牲畜数量因子之间交互作用的影响为最大,其次为年降水量和牲畜数量的自然因素和人为因素的交互作用。这与单因子分析的自然因子作用大人为因子作用的结果有所不同。

在非牧业旗县,因子之间的交互作用均呈现出非线性增强关系。双因子之间的交互作用对植被 NDVI 变化的解释率高的 6 组为(图 5):土壤类型∩粮食产量(0.311)>年降水量∩土壤类型(0.296)>年降水量∩农牧民人均纯收入(0.274)>年平均气温∩土壤类型(0.269)>乡村劳动力∩农牧民人均纯收入(0.266)>农牧民人均纯收入∩粮食产量(0.265)。可以发现,因子之间的交互影响中,植被 NDVI 变化受粮食产量和土壤类型的双因子交互作用最大,其次为年降水量和土壤类型的双因子交互作用。

2.4 风险区探测

由于本文选取的影响植被 NDVI 变化的因素较多,所以风险区探测只列出了前 6 个主要因素(图 6)。将 2000—2015 年的年降水量变化趋势、年平均气温变化趋势、粮食产量趋势和乡村劳动力变化趋势分 10 个分区,用数字 1—10 来表示。

从图 6 可以看出随着年降水量的增加趋势 NDVI 呈增加趋势,在牧业旗和非牧业旗县 NDVI 变化趋势达到 5 类型时达到最高值。还可以看出,植被 NDVI 变化趋势随着年降水量的增加趋势也呈增加,这进一步证明了在内蒙古干旱半干旱地区降水是植被变化的主要驱动因素。

在牧业旗和非牧业旗县,年平均气温对植被 NDVI 的影响截然不同。在牧业旗县,植被 NDVI 变化趋势在 1 类型时年均温变化趋势达到最高值,而且随着年均温的增加趋势植被 NDVI 变化趋势呈减少。在非牧业旗县,植被 NDVI 变化趋势在 10 类型时年均温变化趋势达到最高值,而且随着年均温的增加趋势植被 NDVI 变化趋势呈增加(图 6)。

在非牧业旗县,9 类型粮食产量变化趋势时植被 NDVI 变化趋势最高,而且随着粮食产量的增加趋势植被 NDVI 也呈增加趋势(图 6)。已有研究表明,内蒙古农区植被的改善与农业种植水平的提高有很大的关系[29]。

在非牧业旗县,随着乡村劳动力的增加植被 NDVI 变化趋势也呈增加。研究表明,乡村劳动力迁出对植被 NDVI 具有正影响[16]。但本文认为在内蒙古牧业旗以外的非牧业旗县,随着乡村劳动力的增加趋势植被 NDVI 变化趋势也随之增加。

在内蒙古全区包括有 34 种土类类型,另外还有江河、湖泊以及城区。在牧业旗县大多数土壤类型的植被 NDVI 变化呈增加趋势,其中湖泊 NDVI 增加趋势最明显,达到了 0.0083。这可能是内蒙古湖泊退化导致的结果。已有研究表明农业开垦是内蒙古湖泊面积缩小的重要原因[30],耕地侵占湖泊水域,NDVI 必然会增加,因为水体的 NDVI 值在 0 以下。灰棕漠土、漠境盐土、龟裂土和荒漠风沙土的植被 NDVI 呈下降趋势,这几种土壤类型都属于干旱区土壤,植被生境恶劣,易受各种因素的影响。

按植被大类把内蒙古植被分成针叶林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草丛和草甸等。大部分植被类型的 NDVI 呈增加趋势。在牧业旗县和非牧业旗县荒漠的植被 NDVI 变化趋势始终最低。在牧业旗县更是低于 0,这表示荒漠植被退化显著。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)自然因素对研究区植被变化的影响。在本项研究中牧业旗县植被覆盖变化的主要影响因素为降水量。牧业旗县面积是研究区总面积的 67.75%,主要以放牧为主,草地为主要土地覆被/覆盖类型。内蒙古自治区位于中国干旱半干旱区,主要植被为草原[31],草原区热量条件相对充足,能够满足植被生长需要,降水量是植被生长状况的主要气候因素,温度的作用不如降水量那样明显[32-33]。土壤对植被的影响在降水为主要

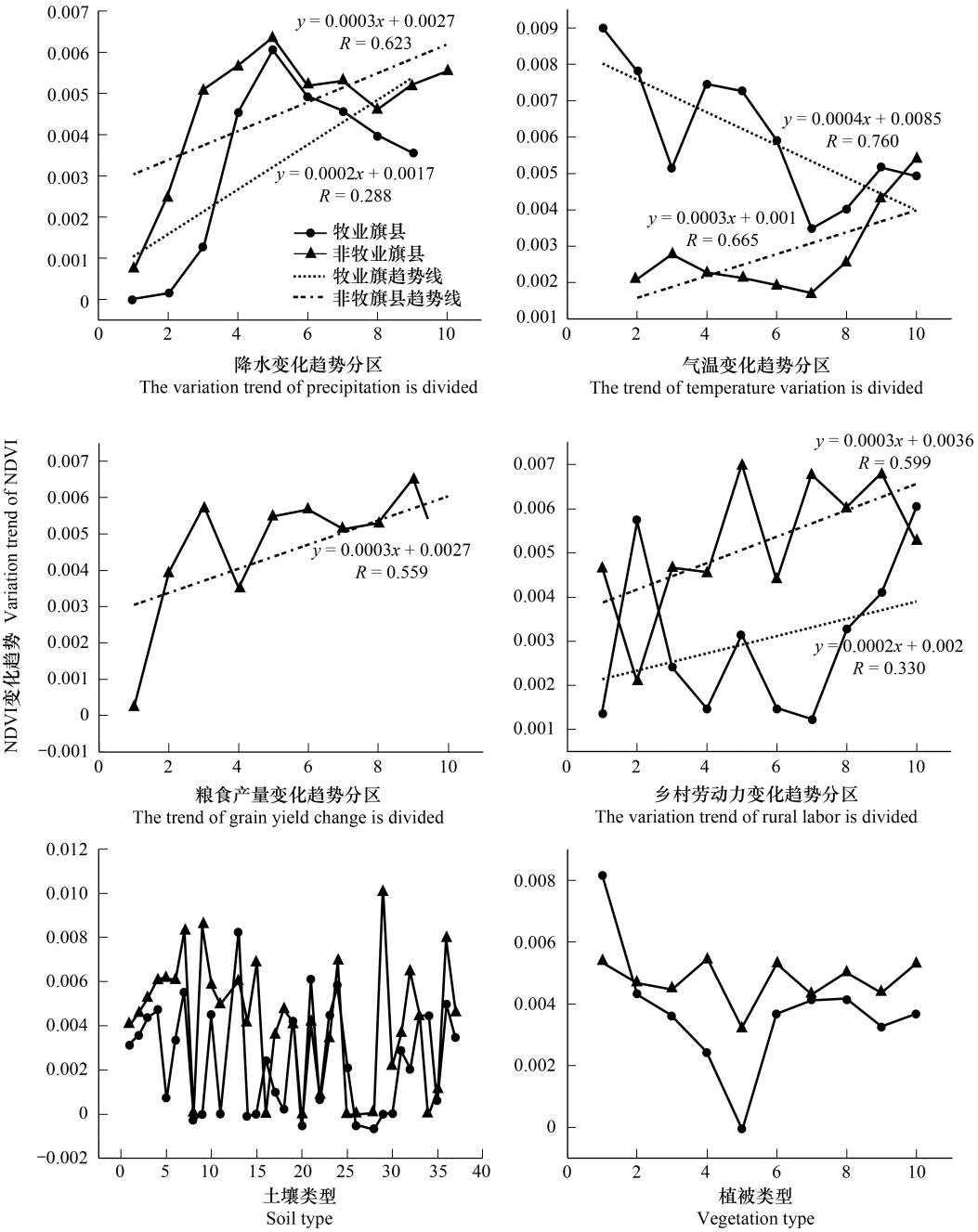

图 6　不同分区植被 NDVI 变化趋势

Fig.6　NDVI variation trend of vegetation in different zones

限制因素的地区显著[34-36],这与本文研究结果一致。土壤类型对生态系统的生产力产生起到决定作用,并且直接影响植被覆盖度。非牧业旗县植被覆盖度变化主体为耕地。耕地地力与植被指数之间存在着较高的相关性[37]。土壤类型影响耕地生产潜力,而植物的光合效率和水分状况决定了耕地产量,因此年降水量、土壤类型和年均温为主要影响自然因子。

(2)人为因子对研究区植被覆盖度的影响。内蒙古地区植被覆盖度变化是由气候变化和人类活动引起[38]。在内蒙古地区牧业旗县植被覆盖度的主要人为影响因素为户数和牲畜数量。内蒙古地区“家庭联产承包责任制”以后,草场以家庭户(牧户)为单元进行承包。儿女成家以后,从父母处获取(分割)草场(通常是用网围栏),满足需求。相关的政府扶持政策都是按牧户为单位进行分配,从而增加了牧户数量,产生很多

中小牧户,而草场超载过牧的主体是中小牧户[39]。此外草场承包和围栏建设可能会产生“狭地制约”的问题,使得牧户的草场经营规模变得狭小,带来草场的破碎化经营[40],草场经营面积越小,载畜量的草地面积单位越低[41]。在内蒙古地区牲畜密度的增加造成草地地上生物量减少引起植被覆盖度变化[15]。在内蒙古地区农业的发展在一定程度上增加了该区域植被的恢复[33],因此在非牧业旗县中,粮食产量是植被覆盖度变化主要影响因素。

(3)研究区植被 NDVI 变化影响因素而言,政府实施的政策因子也起到了重要作用。自 2000 年以来我国在内蒙古地区实施了一系列生态恢复政策项目,包括退耕还林还草、天然草地保护、京津风沙源治理等生态保护工程,人工种草、生态补偿、轮牧、鼠害防治等。这些生态项目的实施也很大程度上加速了植被 NDVI 的恢复和改善,其效果不可忽视[13]。在未来研究中,应该在人为因素中增加政策因子,更深入研究植被 NDVI 变化的驱动因素。

3.2 结论

(1)2000—2015 年内蒙古植被覆盖度时空变化明显,总体上呈增加趋势。在空间上呈现出西部减少,东部与南部增加趋势,其余地区变化不明显。不管在牧业旗县还是非牧业旗县植被 NDVI 都呈增加趋势,但非牧业旗县的植被 NDVI 改善区面积大于牧业旗县的改善面积。

(2)整个研究区,年降水量和土壤类型是影响植被 NDVI 的主要驱动因素,解释率在 22%以上。在牧业旗县和非牧业旗县,前者也是年降水量和土壤类型是主要驱动因素,但在后者粮食产量是最主要的驱动因素。

(3)因子之间的交互影响均高于单因子的影响。在牧业旗,因子之间的交互作用呈现出非线性增强和双因子增强关系,植被 NDVI 变化受乡村户数∩牲畜数量的交互影响最为突出。非牧业旗县因子之间呈现出非线性增强的交互作用关系,植被 NDVI 变化受土壤类型∩粮食产量的交互影响最为明显。

参考文献(References):

[1] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001—2013. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 143-160.

[2] 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.

[3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.

[4] 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.

[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] Ran Q W, Hao Y B, Xia A Q, Liu W J, Hu R H, Cui X Y, Xue K, Song X N, Xu C, Ding B Y, Wang Y F. Quantitative assessment of the impact of physical and anthropogenic factors on vegetation spatial-temporal variation in northern Tibet. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1183.

[7] Yang Y J, Wang S J, Bai X Y, Tan Q, Li Q, Wu L H, Tian S Q, Hu Z Y, Li C J, Deng Y H. Factors affecting long-term trends in global NDVI. Forests, 2019, 10(5): 372.

[8] Li W, Li X B, Tan M H, Wang Y H. Influences of population pressure change on vegetation greenness in China′s mountainous areas. Ecology and Evolution, 2017, 7(21): 9041-9053.

[9] 李薇, 谈明洪. 西南山区人口空间重组及其对植被的影响——以河流沿线为例. 生态学报, 2018, 38(24): 8879-8887.

[10] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414.

[11] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 韩煜, 高晓奇, 冯瑾, 全占军. 锡林郭勒植被 NDVI 时空变化及其驱动力定量分析. 植物生态学报, 2019, 43(4): 331-341.

[12] Lu Q, Zhao D S, Wu S H, Dai E F, Gao J B. Using the NDVI to analyze trends and stability of grassland vegetation cover in Inner Mongolia. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(3/4): 1629-1640.

[13] Liu M, Dries L, Heijman W, Huang J K, Zhu X Q, Hu Y N, Chen H B. The impact of ecological construction programs on grassland conservation in Inner Mongolia, China. Land Degradation & Development, 2018, 29(2): 326-336.

[14] Shao L Q, Chen H B, Zhang C, Huo X X. Effects of major grassland conservation programs implemented in Inner Mongolia since 2000 on vegetation restoration and natural and anthropogenic disturbances to their success. Sustainability, 2017, 9(3): 466.

[15] Zhou X, Yamaguchi Y, Arjasakusuma S. Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and

AVHRR NDVI: A cross-border study on the Mongolian Plateau. Science of the Total Environment, 2018, 616-617: 730-743.

[16] 李仕冀, 李秀彬, 谈明洪. 乡村人口迁出对生态脆弱地区植被覆被的影响——以内蒙古自治区为例. 地理学报, 2015, 70(10): 1622-1631.

[17] 周锡饮, 师华定, 王秀茹. 气候变化和人类活动对蒙古高原植被覆盖变化的影响. 干旱区研究, 2014, 31(4): 604-610.

[18] 苏日嘎其其格. 基于人地关系优化的内蒙古牧区贫困化问题研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018.

[19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[20] 包刚, 包玉海, 覃志豪, 周义, Shiirev-Adiya. 近 10 年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应. 地理科学, 2013, 33(5): 613-621.

[21] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.

[22] 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.

[23] 王军邦, 陶健, 李贵才, 庄大方. 内蒙古中部 MODIS 植被动态监测分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 835-842.

[24] Chen J Q, John R, Sun G, Fan P L, Henebry G M, Fernández-Giménez M E, Zhang Y Q, Park H, Tian L, Groisman P, Ouyang Z T, Allington G, Wu J G, Shao C L, Amarjargal A, Dong G, Gutman G, Huettmann F, Lafortezza R, Crank C, Qi J G. Prospects for the sustainability of social-ecological systems (SES) on the Mongolian plateau: five critical issues. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 123004.

[25] 张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 戴尔阜. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. 地理科学, 2013, 33(5): 594-601.

[26] 秦福莹. 蒙古高原植被时空格局对气候变化的响应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.

[27] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 132-138.

[28] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. 地理学报, 2017, 72(1): 161-173.

[29] Wang J, Brown D G, Chen J Q. Drivers of the dynamics in net primary productivity across ecological zones on the Mongolian Plateau. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 725-739.

[30] Tao S L, Fang J Y, Zhao X, Zhao S Q, Shen H H, Hu H F, Tang Z Y, Wang Z H, Guo Q H. Rapid loss of lakes on the Mongolian plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(7): 2281-2286.

[31] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 顾西辉, 孙鹏, 胡畔. 1982—2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应. 生态学报, 2019, 39(13): 4953-4965.

[32] 李庆, 高素改, 张春来, 王仁德, 周娜, 李继锋, 郭中领, 常春平. 内蒙古草地变化过程中气候变化和人类活动的相对作用评估. 地理与地理信息科学, 2019, 35(3): 99-104.

[33] 肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路. 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. 生态学报, 2016, 36(19): 6019-6030.

[34] Wang J Y, Liu Y J, Li Y R. Ecological restoration under rural restructuring: a case study of Yan′an in China′s loess plateau. Land Use Policy, 2019, 87: 104087.

[35] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.

[36] 陈欢, 任志远. 中国大陆植被覆盖对降水与温度变化的响应. 水土保持通报, 2013, 33(2): 78-82.

[37] 武婕, 李增兵, 李玉环, 赵庚星, 李春光. 基于 TM 影像植被指数的耕地地力状况反演研究. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1035-1046.

[38] 候勇, 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, 48(11): 35-40.

[39] 娜日嘎拉. 草场不同利用方式下牧区人口迁移原因比较研究——以正镶白旗 Z 嘎查与太仆寺旗 G 嘎查为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.

[40] 王关区. 草原退化的主要原因分析. 经济研究参考, 2007, (44): 40-48.

[41] 胡振通, 柳荻, 靳乐山. 草原超载过牧的牧户异质性研究. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 158-167.