

内蒙古中部植被覆盖时空变化及影响因素

吕泽民 武耀星 朱杰 孙帅 徐帅 张鸿翎

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010019)

摘要 研究内蒙古中部植被覆盖在2010—2019年变化过程以及空间分布。依据2010—2019年的MOD13Q1—MODIS NDVI数据,利用薄盘样条插值法、趋势分析、地理探测器、面积转移矩阵等方法,分析得出10 a间植被覆盖动态变化、空间分布特征以及气象类和非气象类因素对其分布的影响。结果表明:研究区内的植被覆盖在10 a间以0.014/10 a的速度增长,总体看来,有改善趋势。降水是影响该地区主要的气候类因素,尤其是6—8月、3—5月降水量影响最为明显。气压和风速对于植被的影响仅次于降水,而气温对于植被的作用只有在与降水交互作用下才会表现。土地利用类型、植被类型是解释植被覆盖的主导性非气候类因素。人口空间分布、GDP、坡度、坡向、地面粗糙度的影响有限,只有在与气候类因素交互作用下更好的解释植被覆盖的空间分布。

关键词 内蒙古; NDVI; 时空变化; 地理探测器; 线性趋势法

分类号 Q948, X87

Temporal and Spatial Changes of Vegetation Coverage and Its Influencing Factors in Central Inner Mongolia//Lü Zemin, Wu Yaoxing, Zhu Jie, Sun Shuai, Xu Shuai, Zhang Hongling(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, P. R. China) //Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(10) : 65-70, 116.

The experiment was conducted to study the change process and spatial distribution of vegetation cover in central Inner Mongolia from 2010 to 2019. With the MOD13Q1—MODIS NDVI data from 2010 to 2019, the dynamic change and spatial distribution characteristics of vegetation cover and the influence of meteorological and non-meteorological factors on its distribution were analyzed by using thin disc spline interpolation, trend analysis, geographic detector and area transfer matrix. The vegetation coverage in the study area was increased at a rate of 0.014 per 10 a. Generally speaking, there is an improvement trend. Precipitation is the main climatic factor that affects the region, especially in June—August and March—May. The influence of air pressure and wind speed on vegetation is second only to precipitation, and the effect of temperature on vegetation can only be manifested when interacting with precipitation. Land use types and vegetation types are the dominant non-climatic factors in explaining the vegetation coverage. The effects of population spatial distribution, GDP, slope, aspect, and ground roughness are limited, and the spatial distribution of vegetation coverage can only be better explained under the interaction of climate factors.

Keywords Inner Mongolia; NDVI; Temporal and spatial changes; Geographic detectors; Linear trend method

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2021.10.012

草地生态系统是我国最大的生态系统,也是世界陆地生态系统中重要的组成部分^[1]。我国北方地区,尤其是内蒙古自治区内草原面积辽阔。一方面,人类间接利用草地发展肉类、奶类等畜牧业产品^[2];另一方面,处于内蒙古的草原植被具有防风固沙、涵养水源、调节气候、保持水土、维持生态系统平衡等多方面作用^[3]。内蒙古中部处于西部荒漠与东北部大兴安岭森林过渡地带,而且农牧交错穿插,生态环境脆弱^[4],是全球变化最为敏感的区域之一^[5],也是中国北方温带草原的主体,对中国生态环境的保护和改善发挥着不可替代的作用^[6]。近年来,在气候和人类活动的双重作用下,内蒙古资源环境问题日益突出,引起许多学者的重视^[7-10]。

植被是陆地生态系统到中重要的组成部分,在

气候调节,维持生态系统稳定等方面发挥重要作用^[11-12]。当前对于植被时空变化特征的研究主要集中在于植被覆盖度。植被覆盖度是指某一区域植被(包括叶、茎等)投影面积与该地域面积之比^[13],是植物群落覆盖地表状况的综合量化指标,对生态、区域变化等都具有重要意义^[14]。本文利用MODIS数据产品估算植被覆盖度及对内蒙古中部植被覆盖度的分布和时空变化进行分析,来对此区域的植被变化提出说明,并且也为农业、畜牧业等发展决策等提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于我国北部边陲内蒙古中部,即锡林郭勒盟、兴安盟、通辽市、赤峰市4个行政区。研究区总面积占内蒙古总面积的34.58%。此区域位于400 mm降水量线附近,因此处于干旱、半干旱气候向湿润、半湿润季风气候的过渡带。研究区整体地形呈西高东低,受温度和降水的影响,该区域植被表现为经向的空间分布特征,大致由西到东表现为荒漠草原、典型草原、森林草原(图1)。

第一作者简介:吕泽民,男,1996年9月生,内蒙古农业大学林学院,硕士研究生。E-mail: 1598157069@qq.com。

通信作者:张鸿翎,内蒙古农业大学林学院,副教授。E-mail: hlzhang68@sina.com。

收稿日期:2020年9月24日。

责任编辑:潘华。

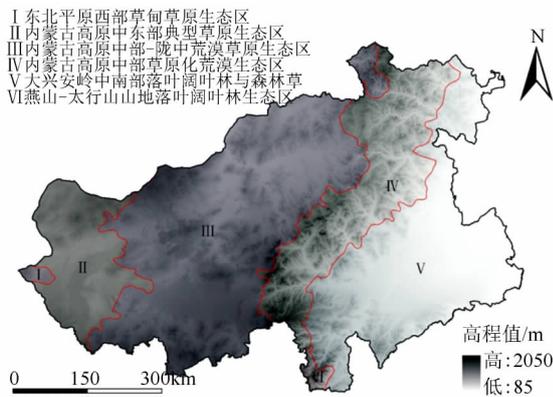


图1 研究区范围

2 数据与方法

2.1 数据来源

遥感数据来自美国 LAADS DAAC 数据中心的 MOD13Q1-MODIS 中的 16d250m 归一化植被指数 (NDVI), 时间为 2010—2019 年的生长季节 (4—10 月)。该产品是根据经过大气校正的双向表面反射率计算得出的, 该反射率已针对水、云、气溶胶和云影进行了屏蔽。锡林郭勒盟、兴安盟、通辽市、赤峰市 4 个行政边界的矢量数据以及湖泊矢量数据。

2.2 研究方法

归一化植被指数是近红外 NIR 和可见红外波段 RED 的差值除以它们的总和, 其中公式表示为:

$$I_{NDV} = \frac{B_{NIR} - B_{RBD}}{B_{NIR} + B_{RBD}} \quad (1)$$

NDVI 具有较强的植被适应性, 是当前植被动态变化研究领域应用最为广泛的植被指数。

本研究直接采用 MODIS 数据产品集成的 NDVI 数据, 获取 LAADS DAAC 数据中心的 2010—2019 年生长季共 360 景遥感影像文件。通过 MRT 工具进行投影坐标转换、影像拼接, 将其设置为 UTM, WGS84 50N 坐标。研究中, 由于气候原因导致每年最大植被覆盖度不在同一时间, 因此通过 Arc Map 合成年最大值以代表植被生长的最好情况。根据李苗苗等^[15]改进的估算植被覆盖度模型像元二分模型:

$$V_{FC} = \frac{N - N_{soil}}{N_{veg} - N_{soil}} \quad (2)$$

式中: N 为研究区内的 NDVI 值; N_{soil} 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, 本文选取 5% 置信下限为 N_{soil} ; N_{veg} 则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值, 选取 95% 置信上限代表 N_{veg} 。

将结果用 Arc GIS 进行重分类, 计算面积。根据水利部制定的《土壤侵蚀分类等级标准》以及结合内蒙古地区的实际情况, 将植被覆盖度划分为 1

级: 裸地 [0, 10%], 2 级: 低覆盖度 [10%, 30%], 3 级: 中低覆盖度 [30%, 45%], 4 级: 中覆盖度 [45%, 60%], 5 级: 高覆盖度 [60%, 100%]。

线性趋势法: 通过逐年逐像元计算线性趋势来研究内蒙古中部 NDVI 的变化趋势^[16], 计算公式如下。

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (3)$$

式中: i 为年, $n=10$, Y_i 表示每个像元第 i 年的 NDVI 值, S 是每个像元 NDVI 变化的斜率。当 $S>0$, 表示该像元 NDVI 值呈增长趋势, 当 $S<0$ 时, 表示该像元为减小趋势。

地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。地理探测器擅长分析类型量, 对于类似本文所涉及的降水、气温等顺序量或间隔量, 只要进行适当离散化, 也可以借助地理探测器进行分析。本文所用到的为地理探测器的因子探测器、生态探测器和交互探测器^[17]。

因子探测器探究因变量 Y 的空间分布异质性以及自变量 X 在多大程度上解释了这种空间分布异质性。本文中 Y 为内蒙古中部四区 2010—2019 年 10 a 平均 NDVI 值, 其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

$$W_s = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, T_s = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: h 为自变量的分区序号; L 为分区总数; N_h 和 N 分别为每个分区和区域内总的栅格数目; σ_h^2 和 σ^2 为每个分区方差和区域内 NDVI 的方差。 W_s 和 T_s 为分区方差之和和区域内总方差。 q 值表示各因子对 NDVI 空间分布的解释力, 取值范围为 0~1。 q 值越大, 表明该因子对 NDVI 空间分布的解释力越强, 反之, 则越弱。生态探测器用于检测各个因子对因变量 Y 值的影响是否显著。交互探测器用来平衡任意两个因子的交互作用对因变量 Y 的解释程度。由于地理探测器是对类型量进行分析, 所以将坡度、坡向、地面粗糙程度、风速、气压、降水、气温以及 GDP 和人口密度数据利用自然间断点分级法进行重分类, 重新赋值。利用 ArcGIS 软件将 2010—2019 年平均年最大 NDVI 值和降水、气温等数据按照 4 km×4 km 的采样点进行中心点提取, 去除异常值后得到 24 763 个数据参与分析。

ArcGIS 软件可以实现多种方法的插值, 但其缺

陷是无法引入协变量来增加其插值精度。澳大利亚科学家 Hutchinson 基于薄盘样条理论编写了针对气候数据曲面拟合的专用软件 ANUSLIN^[18]。本研究中,对于研究要用到的气温、降水数据均利用 ANUSPLIN 软件引入高程协变量对研究区内 38 个气象站点的数据进行插值。

3 结果与分析

3.1 空间变化分析

在经过 ArcGIS 处理后,得到 2010—2019 年内蒙古中部年最大平均 NDVI 分布图。如图 2 所示,区域内 NDVI 平均值为 0.546 9。依据中国科学院资源科学数据中心划分的生态区,将研究区划分为 I 内蒙古高原中部草原化荒漠生态区、II 内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区、III 内蒙古高原中东部典型草原生态区、IV 大兴安岭中南部落叶阔叶林与

草原生态区、V 东北平原西部草甸生态区、VI 燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区。其中,以燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区和大兴安岭中南部落叶阔叶林与草原生态区为最高,分别为 0.817 6 和 0.725 6;其次,为东北平原西部草甸生态区和内蒙古高原中东部典型草原生态区;最低的是内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区和内蒙古高原中部草原化荒漠生态区,为 0.221 6 和 0.192 8。由此,可以看出内蒙古中部植被呈现经向地带性分布。2010—2019 年,内蒙古中部植被覆盖总体呈上升趋势,变化率每 10 a 为 0.014 3。其中,从生态区划上看,东北平原西部草甸生态区和大兴安岭中南部落叶阔叶林与草原生态区改善最为明显,分别每 10 a 为 0.015 8 和 0.014 4,其次是内蒙古高原东部典型草原生态区和内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区,每 10 a 为 0.010 4 和 0.00 9。

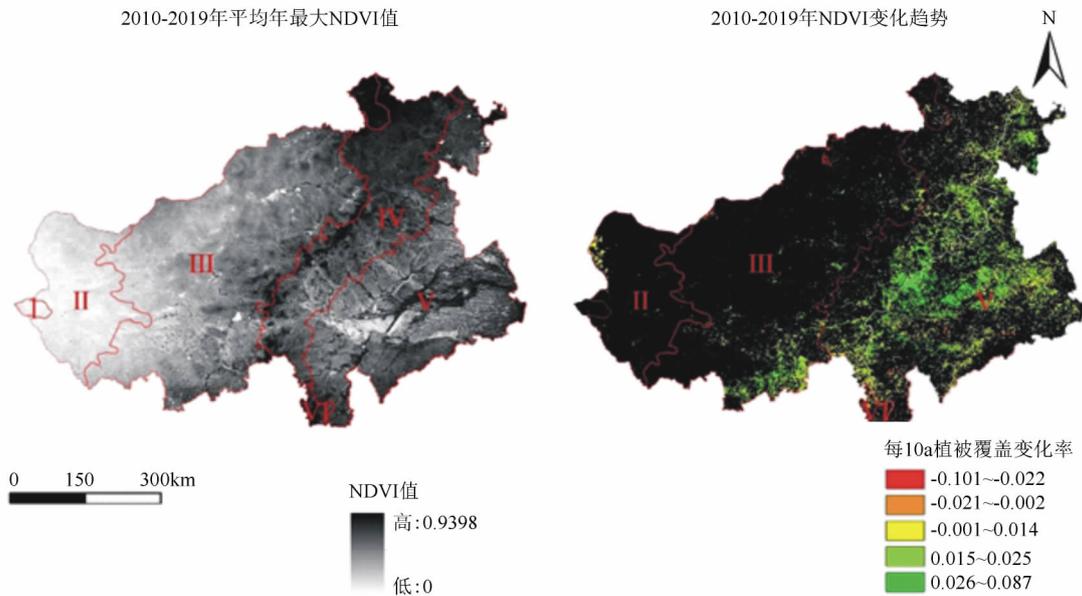


图 2 研究区内 NDVI 多年平均分布以及变化趋势

转移矩阵是同一研究区内,不同等级植被覆盖度之间在不同时间段内的相互转换关系,通常用二维表来反映不同植被覆盖度间相互转换情况。将 2010 和 2019 年的植被覆盖度在 ArcGIS 中进行叠加分析,再通过 Excel2019 数据透视表功能进行面积转移显示,得出同等级植被覆盖度之间的转换特征表。

如表 1 所示,转移矩阵详细的说明了研究区内不同覆盖度之间的转换过程。为直观反映 2010—2019 不同植被覆盖度面积转移状况,将 2019 年各个植被覆盖度分别看作 100%。由此有以下结果:退化方向,2019 年 9.9%的裸地由 2010 年低植被覆盖度转换而来(1.12×10⁶km²),7.98%中低植被覆盖度变为低植被覆盖度(7.97×10⁵km²),9.11%中覆盖度由中低植被覆盖度转变而来(5.08×10⁵km²),

9.64%高植被覆盖度转为中等植被覆盖度(5.80×10⁵km²);改善方向:2019 年 23.41%的低植被覆盖度由裸地发展而来(2.34×10⁶km²),5.71%的中低植被覆盖场地由裸地转换(3.18×10⁵km²),55.15%的中低植被覆盖度由低覆盖度转变(3.07×10⁶km²),22.04%中等植被覆盖度由低植被覆盖度转换而来(1.33×10⁶km²),32.57%中等植被覆盖度地由中低覆盖度转换而来(1.96×10⁶km²),11.18%高植被覆盖度由中等覆盖度发展而来(8.07×10⁵km²),27%高植被覆盖度由中等植被覆盖度发展而来(1.95×10⁶km²)。总体说来,有 3.21×10⁶km²的场地退化,但有 1.22×10⁷km²朝更高级别的植被覆盖转化。即 2010—2019 年研究区内植被覆盖总体来看有增加趋势。

表1 2010—2019年归一化植被指数NDVI转移矩阵面积

植被覆盖度	裸地		低覆盖度		中低覆盖度		中覆盖度		高覆盖度	
	面积/km ²	百分比/%								
裸地	1.01×10 ⁷	89.79	1.12×10 ⁶	9.90	2.73×10 ⁴	0.24	6.23×10 ³	0.06	1.04×10 ³	0.01
低覆盖度	2.34×10 ⁶	23.41	6.73×10 ⁶	67.40	7.96×10 ⁵	7.98	1.12×10 ⁵	1.13	8.75×10 ³	0.09
中低覆盖度	3.18×10 ⁵	5.71	3.07×10 ⁶	55.15	1.62×10 ⁶	29.13	5.08×10 ⁵	9.11	5.03×10 ⁴	0.90
中覆盖度	1.16×10 ⁵	1.93	1.33×10 ⁶	22.04	1.96×10 ⁶	32.57	2.03×10 ⁶	33.81	5.80×10 ⁵	9.64
高覆盖度	2.04×10 ⁴	0.28	3.28×10 ⁵	4.55	8.07×10 ⁵	11.18	1.95×10 ⁶	27.00	4.12×10 ⁶	57.00

3.2 气候类因素对植被覆盖空间分布的影响

3.2.1 气候类单因子对植被覆盖的影响

气候因子作为影响植物生长的主导因子,其对植被覆盖的分布有着极其重要的影响。为探究气候类因子对内蒙古中部植被覆盖的空间分布的影响,本文选取9类气候因子利用地理探测器分析,其中以6—8月降水量和3—5月降水量对植被覆盖的解释力最强,为0.71和0.62;年降水、气压、以及风速解释力中等为0.57、0.56、0.53;各个阶段的气温以及年平均气温和平均露点温度对植被覆盖的解释力最小(0.2~0.25)。

综合各个气候类因子,并结合植被覆盖的空间分布可以得知,3—5月降水量和6—8月降水量极大地影响植被覆盖,3—8月正值植物生长季,同时受限于温带大陆性气候干燥少雨的气候特点,因此可很好地解释植被覆盖。此外,研究区内气压与风

速空间分布较为显著,所以也可以较好的解释植被覆盖。

3.2.2 气候类因素的交互作用

为探究2个气候因子共同作用下对植被覆盖空间分布的解释程度,因此对各个因子进行交互作用检测。其解释力表2所示。各个阶段降水与气温交互作用都会对植被覆盖解释有增强作用,且都为非线性增强,气压与各个阶段气温和降水、风速与各个阶段气温和降水都呈非线性增强作用。

由表2可知,气温虽然在单独解释植被覆盖方面的程度较小,但是与其他气候要素降水量、气压、风速的交互作用会对植被覆盖有较好的解释力。降水量单因素对植被覆盖有主导作用,在与其他条件交互时,更能增强对植被覆盖的解释力。即在充足的水分条件下,同时满足一定的气温、气压、风速条件,才会对植被覆盖有显著影响。

表2 2010—2019年研究区气候类因子交互作用解释力(q值)

交互性因子	3—5月平均气温	6—8月平均气温	9—11月平均气温	年平均气温	露点温度	3—5月降水	6—8月降水	9—11月降水	年降水	气压	风速
3—5月平均气温	0.246										
6—8月平均气温	0.355	0.219									
9—11月平均气温	0.316	0.390	0.227								
年平均气温	0.311	0.369	0.242	0.232							
露点温度	0.614	0.644	0.579	0.574	0.223						
3—5月降水	0.711	0.702	0.710	0.711	0.692	0.617					
6—8月降水	0.768	0.764	0.768	0.768	0.761	0.740	0.71				
9—11月降水	0.666	0.685	0.633	0.666	0.72	0.727	0.74	0.482			
年降水	0.700	0.692	0.699	0.693	0.667	0.655	0.732	0.682	0.573		
气压	0.709	0.704	0.695	0.703	0.622	0.694	0.757	0.764	0.692	0.563	
风速	0.743	0.700	0.714	0.745	0.656	0.671	0.741	0.736	0.618	0.652	0.525

3.3 非气候类因素对植被覆盖空间的影响

3.3.1 单因素对植被覆盖的影响

运用地理探测器对非气候类因素土地利用类型、植被类型、坡度、坡向、地面粗糙度、GDP、人口空间分布对内蒙古中部植被覆盖的影响程度。各因子的解释力大小依次为土地利用类型(0.559)、植被类型(0.524)、坡度(0.168)、地面粗糙度(0.162)、人口空间分布(0.121)、GDP(0.089)、坡向(0.003)。其中植被类型对植被覆盖的解释程度最高,坡度、地面粗糙度、人口密、GDP解释能力一般,坡向解释能力最弱(表3)。

结合NDVI空间分布图可知,土地利用类型、植被类型是解释力较高的非气候类因素。由于地形的南北与东西差异,气候也有明显的分异,位于内蒙古东部的大兴安岭中南部落叶阔叶林与森林草原生态区是大兴安岭兴安落叶松向阔叶林过度的类型区域,区域内分布有山地针叶林、落叶阔叶林、落叶小叶疏林、灌丛草甸,植被组合复杂,类型多样,所以植被覆盖程度较高。位于大兴安岭南段山地以东的东北平原西部草甸草原生态区,该区域地带性植被为温性典型草原、草甸草原;而位于大兴安岭南段山地以西是内蒙古高原中东部典型草原生态区,该区自

然植被由东向西逐渐从大兴安岭落叶阔叶林过渡为草甸草原、典型草原。因此这两个区域植被覆盖要略低。依次向西的内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区为典型的中温带大陆性气候,气候干旱,风大沙多。所以为适应该区域的气候,植被类型多为植被旱生化、灌丛化,主要分布有耐盐碱、耐干旱的半灌木、矮半灌木。因此其植被覆盖为研究区内最低。除此之外,其他非气候类因素都对内蒙古中部植被覆盖的解释力较弱。

3.3.2 非气候类因素的交互作用

对非气候类因素作交互探测和生态型探测,如表 3,其结果表明,坡向和地面粗糙度、GDP、人口空间分布,坡度和植被类型、土地利用类型,植被类型和土地利用类型,GDP 和人口空间分布有显著差异

表 3 2010—2019 年研究区非气候类因子交互作用解释力(q 值)

交互性因子	植被类型	土地利用类型	坡度	坡向	地面粗糙度	GDP	人口空间分布
植被类型	0.524						
土地利用类型	0.719	0.559					
坡度	0.578	0.611	0.168				
坡向	0.527	0.562	0.173	0.003			
地面粗糙度	0.568	0.606	0.169	0.166	0.162		
GDP	0.571	0.597	0.311	0.093	0.296	0.089	
人口空间分布	0.569	0.605	0.335	0.124	0.321	0.136	0.121

3.4 18 种因子的交互作用

通过对 18 种气候类和非气候类因子的因子探测分析,结果如表 4 所示,对植被覆盖解释力由大到小依次为 6—8 月降水量、3—5 月降水量、年降水量、气压、植被类型、风速、9—11 月降水量、3—5 月

(Y),其余因素之间均无显著差异,说明其余因素组合之间对植被覆盖的解释机理相似。在交互探测中,土地利用类型与植被类型、坡度、坡向、地面粗糙度、GDP、人口空间分布的 q 值分别为 0.719、0.61、0.56、0.61、0.60、0.61,植被类型与坡度、坡向、地面粗糙度、GDP、人口空间分布的交互作用 q 值为 0.578、0.527、0.568、0.571、0.569。土地利用类型、植被类型作为主导植被覆盖的因子,在与其他因素的共同作用下,对植被覆盖会作出更好的解释。GDP、人口密度与坡度、地面粗糙度的交互作用 q 值分别为 0.31、0.30、0.34、0.32,解释能力比其各自单因子要强,其余单因素解释能力非常小,即使与其他因素共同作用,也不会有太大变化。

平均气温、年平均气温、9—11 月平均气温、露点温度、6—8 月平均气温、坡度、地面粗糙度,人口空间分布、GDP、坡向。总体说来,气候类因素对植被覆盖的解释力要强于非气候类,而人类活动因素的解释力较低。

表 4 2010—2019 年研究区气候类和非气候类因子交互作用解释力

交互性因子	3—5 月平均气温	6—8 月平均气温	9—11 月平均气温	年平均气温	露点温度	3—5 月降水	6—8 月降水	9—11 月降水	年降水	气压	风速	植被类型	土地利用类型	坡度	坡向	地面粗糙度	GDP	人口空间分布
3—5 月平均气温	0.246																	
6—8 月平均气温	0.355	0.219																
9—11 月平均气温	0.316	0.390	0.227															
年平均气温	0.311	0.369	0.242	0.232														
露点温度	0.614	0.644	0.579	0.574	0.223													
3—5 月降水	0.711	0.702	0.710	0.711	0.692	0.617												
6—8 月降水	0.768	0.764	0.768	0.768	0.761	0.740	0.710											
9—11 月降水	0.666	0.685	0.633	0.666	0.720	0.727	0.740	0.482										
年降水	0.700	0.692	0.699	0.693	0.667	0.655	0.732	0.682	0.573									
气压	0.709	0.704	0.695	0.703	0.622	0.694	0.757	0.764	0.692	0.563								
风速	0.743	0.700	0.714	0.745	0.656	0.671	0.741	0.736	0.618	0.652	0.525							
植被类型	0.621	0.634	0.619	0.617	0.614	0.714	0.753	0.653	0.676	0.701	0.681	0.524						
土地利用类型	0.648	0.634	0.643	0.647	0.647	0.751	0.809	0.726	0.733	0.741	0.722	0.719	0.559					
坡度	0.385	0.319	0.375	0.385	0.400	0.648	0.720	0.514	0.603	0.601	0.571	0.578	0.611	0.168				
坡向	0.253	0.226	0.234	0.239	0.227	0.620	0.712	0.486	0.576	0.566	0.528	0.527	0.562	0.173	0.003			
地面粗糙度	0.372	0.304	0.362	0.371	0.385	0.645	0.717	0.499	0.600	0.596	0.566	0.568	0.606	0.169	0.166	0.162		
GDP	0.413	0.409	0.385	0.391	0.282	0.658	0.732	0.645	0.610	0.603	0.554	0.571	0.597	0.311	0.093	0.296	0.089	
人口空间分布	0.469	0.476	0.438	0.446	0.264	0.652	0.722	0.652	0.591	0.577	0.533	0.569	0.605	0.335	0.124	0.321	0.136	0.121

对所有气候和非其气候类因素作交互分析,结果如表 4,气候类和非气候类要素交互作用均会增

强解释力,且大部分为双因子增强,小部分属于非线性增强。其中以 6—8 月降水量和植被类型交互作

用(0.81)的解释力为最大,因此,降水和植被类型作为主导植被覆盖的气候类和非气候类因素,它们之间的相互作用会对植被覆盖有更好的解释力。对于解释力较弱的气温和非气候因素,在与其他因素的交互作用下,解释力均会有不同程度的增强。

4 结论

根据 MODIS 单位 MOD13Q1 数据产品,监测 2010—2019 年时间段内锡林郭勒盟、兴安盟、通辽市、赤峰市 4 个区域内植被覆盖度的变化情况。结果显示:NDVI 空间分布整体呈改善趋势,平均变化率每 10 a 为 0.014。其中,从生态区上看,以东北平原西部草原生态区、大兴安岭中南部落叶阔叶林与森林草原生态区改善最为明显,分别为 0.016、0.014;内蒙古高原中东部典型草原生态区、内蒙古中部—陇中荒漠化草原生态区改善较差,分别为 0.010、0.009。总体看来,虽然研究区内有部分区域有 $3.21 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的场地发生退化,但有 $1.22 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的场地朝着植被覆盖更高的方向变化。

对于研究区内的植被覆盖空间分布异质性,选取 18 个气候类和非气候类的因素进行分析。其结果表明,降水是影响植被覆盖的主导性因素,这一结果与前人的研究结果吻合^[19],尤其是以 6—8 月降水量、3—5 月降水量对于植被覆盖的解释力尤为明显。气压、风速影响植被覆盖的能力一般,而气温对于解释植被覆盖的能力最弱。非气候类因素中,土地利用类型、植被类型是解释植被覆盖的主导因素。坡度对植被覆盖的影响明显要高于坡向。其他非气候类因素如坡度、坡向、地面粗糙度、GDP、人口空间分布解释力较弱,只有在与气候类以及植被类型交互作用下其解释力才会显现。由于内蒙古地广人稀,人口空间分布相对较低,所以 GDP 和人口空间分布在区域中的解释力要较弱^[20]。

总体说来,对内蒙古中部植被覆盖的影响,气候类因素大于非气候类因素。当两个因素交互作用时,其解释能力会更强。在未来面对农牧业经济大力发展的同时,人类社会因素会对植被覆盖产生更明显的影响^[21]。因此,需要针对不同区域自然与社会经济条件,因地制宜加大生态保护力度,支撑自然资源的科学利用,实现农牧业可持续发展。

5 讨论

本研究基于 2010—2019 年内蒙古中部植被覆盖变化以及空间分布进行分析。对于植被覆盖的空间分布异质性,选取气候类和非气候类因素利用地理探测器进行驱动力分析。在研究气候因素对植被

覆盖的影响时,将降水和气温分为 3—5 月、6—8 月、9—11 月 3 个阶段,可以具体知道在那个阶段的影响最大,其中 6—8 月、3—5 月降水量比年降水量对植被覆盖有更强的解释力。因此,在今后的研究中可以选取各个阶段的气候数据,解释力会更强。此外,由于考虑到地形因素对降水、气温的影响,本研究对研究区内的 38 个气象站点采用薄盘样条法,引入高程协变量对气温、降水进行插值,大大提高插值数据的准确程度。同时,在今后的研究中可以加入更多的协变量来提高插值精度。

同时,在对植被覆盖进行分析时,只分析了多年平均 NDVI 值和气象数据以及非气象数据,这在一定程度上只解释了植被覆盖在空间上的分布,只是一个静态的分析,应该更多利用地理探测器分析动态过程,而不是仅仅停留于静态过程。在地理探测器分析过程中,由于其支持的栅格采样数据仅为 32 767 个,导致在采样过程必须设置较大的分辨率,本研究用 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,这样就导致采样精度降低,在后期进行解释力分析时会产生较大的误差。在今后的研究中,可以采用分块进行分析。

参 考 文 献

- [1] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [2] 安卯柱.阿拉善盟草地资源遥感调查方法[J].内蒙古草原,2002,25(3):17-18.
- [3] 李波.吉林省西部湿地草原生态环境现状研究[D].长春:吉林大学,2009.
- [4] 孙根年,王美红.内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):140-144.
- [5] 姚雪茹.鄂尔多斯高原植被变化及其与气候、人类活动的关系[D].呼和浩特:内蒙古大学,2012.
- [6] 杨强,王婷婷,陈昊,等.基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J].农业工程学报,2015,31(22):191-198.
- [7] 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[J].地理学报,2009,64(1):84-94.
- [8] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [9] 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,等.内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J].自然资源学报,2010,25(3):407-414.
- [10] 元志辉,包刚,银山,等.2000—2014 年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J].草业学报,2016,25(1):33-46.
- [11] 张珍珍,熊康宁,黄登红.近 30 年来梵净山植被覆盖时空变化及影响因素分析[J].水土保持研究,2018,25(2):183-189.
- [12] 刘洋,李诚志,刘志辉,等.1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J].生态学报,2016,36(19):6198-6208.
- [13] 顾祝军,曾志远,史学正,等.基于遥感图像不同辐射校正水平的植被覆盖度估算模型[J].应用生态学报,2008,19(6):1296-1302.
- [14] YIN J F, ZHAN X W, ZHENG Y F, et al. Improving Noah land surface model performance using near real time surface albedo and green vegetation fraction[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218: 171-183.
- [15] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [16] 翟雅倩,张翀,周旗,等.秦巴山区植被覆盖与土壤湿度时空变化特征及其相互关系[J].地球信息科学,2018,20(7):967-977.(下转 116 页)

这与吕俊^[23]等人在植物根际促生菌对大蒜的促生、抗病作用的研究中发现,8 g 处理组的发芽率、株高、叶绿素质量分数以及铵态氮、有效钾和速效磷等土壤养分含量的测量都出现了降低的情况相同,可能是在较高浓度功能菌的情况下会出现促进作用下降的情况,也可能与植物根际促生菌本身或者其代谢产物过多有关。李静^[24]等的研究通过对各处理土壤的分析,得出固氮菌+解磷菌+解钾菌组合的综合应用有利于多功能菌增加土壤养分含量。

本实验证明土壤中的全氮质量分数、速效氮质量分数、速效钾质量分数、有机质质量分数、磷酸酶活性、过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性与幼苗生物量显著相关。土壤全磷质量分数、速效磷质量分数和脲酶活性与幼苗生物量相关性不太。这与陈有军等人^[25]在研究植物养分含量和根际土壤微生物量的动态变化一致,植物氮的单位含量和根际土壤的微生物量氮有相关性,但是只是植物地下部分单位氮含量和根际土壤微生物量碳、氮、磷呈正相关,且极显著。

参 考 文 献

- [1] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [2] LAURENT P, JOS M R, PHILIPPE L, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11(11): 789-799.
- [3] MÜLLER D B, VOGEL C, BAI Y, et al. The plant microbiota: systems-level insights and perspectives[J]. Annual Review of Genetics, 2016, 50: 211-234.
- [4] BERENDSEN R L, PIETERSE C M J, BAKKER P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478-486.
- [5] MENDES R, KRUIJT M, BRUIJN I D, et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria[J]. Science, 2011, 332: 1097-1100.
- [6] 贺纪正,陆雅海,傅伯杰.土壤生物学前沿[M].北京:科学出版社,2015.
- [7] KLAUS S, DAVIDE B. The plant microbiome atwork[J]. Molecular Plant Microbe Interactions, 2015, 28(3): 212-217.
- [8] ADESEMOYE A O, TORBERTH A, KLOEPPER J W. Increased plant uptake of nitrogen from 15N-depleted fertilizer using plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(1): 54-58.
- [9] 韦建玉,王政,黄崇峻,等.增施微生物菌肥对植烟土壤理化性质及微生物量的影响[J].贵州农业科学,2018,46(11):57-61.
- [10] 王小蒙,邵海峰,田龙军,等.微生物菌肥用量对油菜种子发芽及幼苗生长的影响[J].磷肥与复肥,2019,34(1):36-38.
- [11] 周贝贝.植物根际促生菌的筛选及其在草莓上的应用研究[D].泰安:山东农业大学,2018.
- [12] 尹大川,祁金玉,宋瑞清.复合接种褐环乳牛肝菌与绿木霉对樟子松根际土壤生物活性年际变化的影响[J].生态学杂志,2018,37(9):2637-2641.
- [13] 尹大川,杨立宾,邓勋,等.绿木霉对樟子松苗木生长指标及生理生化指标的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(1):78-83.
- [14] 徐秀倩,吴小芹,吴天宇,等.林木根际细菌 JYZ-SD5 的促生抗逆性能及种类鉴定[J].生物技术通报,2019,35(3):31-38.
- [15] YASMIA R O, HAWA Z E, AHMAD Z A, et al. Characterisation of plant growth-promoting bacteria from Kaci Fatimah (Labisia pumila) under natural tropical forest[J]. Universiti Putra Malaysia Press, 2016, 39(4): 557-575.
- [16] SHAHID M, AKRAM M S, KHAN M A, et al. A phyto-beneficial strain *Planomicrobium* sp. MSSA-10 triggered oxidative stress responsive mechanisms and regulated the growth of pea plants under induced saline environment[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 124(6): 1566-1579.
- [17] NIU X G, SONG L C, XIAO Y N, et al. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 8(1): 1-11. doi: 10.3389/FMICB.2017.02580.
- [18] 耿士均,刘刊,商海燕,等.专用微生物肥对连作辣椒和番茄生长的影响[J].浙江农业科学,2012(5):651-656.
- [19] 童辉,袁祖华,黄建.生物菌肥对辣椒幼苗质量的影响[J].湖南农业科学,2013(15):70-72.
- [20] 姚登国.解读土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].农业开发与装备,2020(8):125-126.
- [21] 王茜.探究土壤微生物对植物生长的影响[J].种子科技,2019,37(11):101-102.
- [22] 柴苗苗.土壤微生物在促进植物生长方面的作用[J].乡村科技,2019(21):86-87.
- [23] 吕俊,付春,肖析蒙,等.植物根际促生菌对大蒜的促生、抗病作用研究[J].中国农学通报,2020,36(24):146-153.
- [24] 李静,李建贵,杨越,等.复合微生物菌剂对灰枣根际土壤养分及枣果品质的影响[J].新疆农业大学学报,2016,39(3):227-232.
- [25] 陈有军,杜忠,田莉华,等.青藏高原半湿润沙地不同恢复阶段植物养分含量和根际土壤微生物量的动态变化研究[C].北京:中国草学会,2017.

(上接70页)

- [17] 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.
- [18] 刘志红,LI L T, MCVICAR T R,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.
- [19] 李舒婷,周艺,王世新,等.2001—2015 年内蒙古 NDVI 时空变化及其对降水和气温的响应[J].中国科学院大学学报,2019,36(1):48-55.
- [20] 张思源,聂莹,张海燕,等.基于地理探测器的内蒙古植被 NDVI 时空变化与驱动力分析[J].草地学报,2020,28(5):1460-1472.
- [21] 刘鹏举,袁卓慧,胡业翠.山水林田湖草生态保护修复工程第一批试点区 NDVI 时空分布与影响因素分析[J].生态经济,2019,35(7):196-202.