

引用格式:阿荣, 毕其格, 董振华. 基于MODIS/NDVI的锡林郭勒草原植被变化及其归因[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1374-1386.
[A R, Bi Q G, Dong Z H. Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS/NDVI in Xilingol, China[J].
Resources Science, 2019, 41(7): 1374-1386.] DOI: 10.18402/resci.2019.07.17

基于MODIS/NDVI的锡林郭勒草原植被变化及其归因

阿 荣^{1,4}, 毕其格², 董振华^{1,3}

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 呼和浩特市民族学院
环境工程系, 呼和浩特 010051; 3. 东北师范大学环境学院, 长春 130117;
4. 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘 要:在国家“生态文明”战略背景下, 蒙古高原作为中国北方重要生态屏障的作用更加凸显。锡林郭勒作为蒙古高原南端的典型内流区与生态敏感区, 其草原植被覆盖变化规律在一定程度上能表征中国北方整体生态系统功能的变化态势。本文采用MODIS13Q1的产品NDVI数据集, 运用势分析法、偏相关性及残差分析法, 分析锡林郭勒草原2000—2015年生长期植被覆盖度时空演变特征, 探讨草原植被变化的归因。研究结果表明: 16年来锡林郭勒草原的生长期植被覆盖度每年以0.0021的速率缓慢增长, 但其变化趋势存在明显地域差异性; 比较发现, 降水因子是影响锡林郭勒地区植被覆盖变化的主要因素; 人类活动对该地区植被覆盖变化的改善促进和破坏抑制作用并存, 总体是正向干扰效应大于负向干扰效应, 人类活动对植被覆盖度改善作用的面积占34.91%, 京津风沙源地治理工程等草原生态环境改善中发挥重要作用; 而人类活动导致生态环境遭到破坏的面积占19.348%, 尤其是草原露天煤矿开采严重破坏草原植被系统。

关键词:草原植被变化; 残差分析; MODIS/NDVI数据集; 人类活动; 草原露天煤矿; 锡林郭勒草原

DOI: 10.18402/resci.2019.07.17

1 引言

草原生态系统是世界最广泛的陆地生态系统, 约占地球表面的13%, 并持有约20%的全球碳储量^[1], 在维护生态结构、生态功能及调节人类生存发展中扮演着重要角色。植被是反映草原生态系统变化最敏感、最直接的指标之一, 其时空格局变化改变区域景观的结构和功能, 影响着区域生物多样性和生态过程^[2], 在全球气候变化与人地关系研究中起着“指示器”的作用。因此, 对草原植被变化进行监测、探清其与气候变化和人类活动之间的内在联系可为草原生态系统功能区植被的保护与修复提供科学合理的数据支撑与理论依据。

植被覆盖度(FVC)指植被在地面的垂直投影面

积占统计区总面积的百分比^[3], 用于量化植被生长状态及生态趋势过程^[4], 在已有的研究中通常由归一化植被指数(NDVI)表征^[5-8]。Vahagn Muradyan等^[9]研究了亚美尼亚山地的NDVI与气候因子关系。Chu等^[10]利用1982—2015年NDVI数据, 分析了阿穆尔—黑龙江流域植被动态及其气候变化的响应。马守存等^[11]基于气温与降水观测资料, 对黄河源区植被覆盖的时空变化特征及其驱动因子进行分析。Kai等^[12]分析了黄土高原地区人类活动对植被变化的影响。周洪建等^[13]基于陕西省1998—2005年NDVI数据, 构建修正的归一化植被指数剔除降水量对NDVI的影响, 探讨了人类活动对植被影响。王建邦等^[14]利用MODIS/NDVI和气温、降水数据, 定量分析了2001—

收稿日期: 2018-11-05 修订日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41061011; 41261022); 内蒙古师范大学高层次人才科研项目(2018YJRC007)。

作者简介: 阿荣, 女, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 讲师, 主要研究领域为经济地理学与区域发展。E-mail: arong1224@163.com

通讯作者: 毕其格, 女, 内蒙古通辽人, 硕士, 副教授, 主要研究领域为经济地理学与区域发展。E-mail: biqige@163.com

2019年7月

2015年中国植被覆盖人为影响的空间格局。不难看出,植被覆盖变化不仅受气候变化影响,且受人类活动影响,特别是在人类活动影响日益强烈的今天,诸多学者将研究重心转移到了人类活动对植被覆盖变化影响的定量化研究。

锡林郭勒位于蒙古高原南缘,其生态环境极端脆弱,生态地位十分重要,属于国家“能源安全”战略和“生态安全”战略并存区。近年来资源的持续过载性开发导致北方牧区生态环境严重恶化,影响深远,特别是其煤炭资源大面积露天开采使原本脆弱的生态环境雪上加霜。尽管在该区已开展了多年植被覆盖变化研究^[15-18],目前针对植被覆盖人为影响的定量化研究较少,尤其是结合矿产资源开发等人类活动空间分布与植被覆盖变化进行空间耦合的研究寥寥无几。因此,本文选用MODIS/NDVI数据、气象数据及露天煤矿开采点空间分布等数据,运用势分析法、偏相关分析和残差分析法,对锡林郭勒草原2000—2015年生长期植被覆盖度时空演变特征进行分析,揭示其植被变化的气候和人类活动影响机制,以期为该区域草原植被修复与资源合理开发与布局提供科学

的理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

锡林郭勒盟(115°13'E—117°06'E, 43°02'N—44°52'N)处于内蒙古自治区的中部偏东,地处蒙古高原南端,拥有天然草场19.24万km²,占全盟土地总面积的95%,占内蒙古自治区草原面积的1/4,是中国重要的畜产品基地和生态保护屏障。属温带半干旱大陆性气候,其主要特点是风大、干旱、寒冷。年平均气温为0~3℃,降水不均,由东向西递减,年内降水集中在7、8、9月。受温度和降水条件的综合影响,植被带呈现出以经向的空间分异特征,从东到西依次为草甸草原、典型草原和荒漠草原。

为了更直观体现研究区植被的地域差异性特征,在ArcGIS软件支持下,绘制纵横两条贯穿研究区全境的剖面。剖面线的设置尽量与研究区的主轴平行或重合,并且考虑研究区的空间形态,保证剖面线尽可能多地穿越各个景观单元。根据以上原则,构建了两个样线,分别为西南—东北方向的a样线、南—北方向的b样线(图1)。

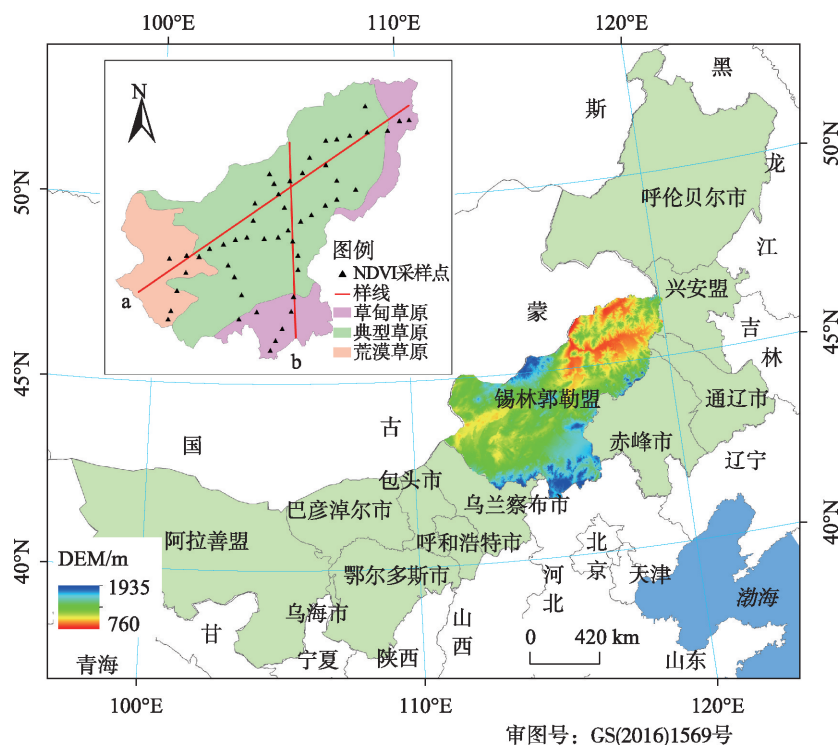


图1 研究区位置及采样点分布图

Figure 1 Location of the study area and distribution of field survey sites

2.2 数据来源与处理

2.2.1 NDVI 数据

NDVI数据来源于MODIS13Q1的产品,选择的时间序列为2000—2015年,其空间分辨率是 250×250 m,时间分辨率是16 d。覆盖锡林郭勒地区的MODIS图像在正弦曲线地图投影坐标系统中,涉及的图像有2幅,编码分别为h25v04和h26v04。由于内蒙古包括锡林郭勒草原在内的大部分地区冬季植被停止生长或被积雪覆盖,因此本文只选植被生长期,即4—10月作为每年的研究时间段^[19]。基于最大合成法(MVC)获得每月的NDVI值,相关研究证明MVC方法可以有效降低云层、大气及太阳高度等方面噪声^[20,21]。其计算公式为:

$$NDVI_i = \max(NDVI_{ij}) \quad (1)$$

式中: $NDVI_i$ 为第*i*年的NDVI值($i=2000, 2001, \dots, 2015$), $NDVI_{ij}$ 为第*j*月的NDVI值($j=4, 5, \dots, 10$)。

2.2.2 气候数据

本文所用的气象数据主要为逐月平均降水和气温数据,源于中国气象科学数据共享服务网站和锡林郭勒盟气象局。将2000—2015年的锡林郭勒盟境内的15个气象站点的数据进行整理,并采用反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW),对气象数据进行空间插值,从而获取与NDVI数据统一投影和像元大小的降水和气温栅格数据。

2.2.3 露天煤矿开采点

草原植被退化与区域干旱气候条件是分不开的,但人类活动对区域自然生态环境的掠夺式开发与利用对草原景观破坏和退化有着不可推卸的责任^[22]。本文以美国国家宇航局(NASA)发布的2015年7—8月的Landsat OLI遥感影像(空间分辨率为15 m)为数据源,对原始影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、镶嵌、裁剪和波段合成等处理,结合研究区土地用途、经营、利用方式等特点,通过目视解译提取了锡林郭勒草原露天煤矿开采点信息。

2.3 研究方法

2.3.1 像元二分模型

本文采用像元二分模型反演植被覆盖度,其基本原理为:假设每个像元是由纯植被和纯土壤两个部分组成,检测到的NDVI数据是以两个纯组分的

面积比重加权线性组合。本文参考李苗苗^[23]提出的方法提取研究区 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 值,即 $NDVI$ 值累计概率为5%和95%的 $NDVI$ 值作为 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 值。具体换算公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDVI$ 、 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 分别为任意像元、纯植被像元和纯土壤像元的植被指数。像元二分模型被广泛应用在植被覆盖变化研究中,该模型具有较高准确性和易操作性^[24]。

为了验证基于MODIS遥感数据反演的植被覆盖度是否有效,于2015年7月在研究区内共选取51个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方进行验证。利用GPS获得采样点的经纬度坐标,根据样方地理位置将像元二分模型反演的植被覆盖度与实测结果之间有较高相关性,相关系数 $R^2=0.908$,说明像元二分模型具有一定的准确性和可靠性,可运用于锡林郭勒草原植被时空演变及驱动机制研究(图2)。

2.3.2 标准差分析

标准差用于考察数据变量离散程度^[25],其值越大,表示研究区在研究时间段内植被覆盖度离平均值的距离越远,植被覆盖度年际变化大,稳定性差。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2} \quad (3)$$

式中: S 为标准差; n 为研究时间段的年数; $NDVI_i$ 为第*i*年的NDVI均值; \overline{NDVI} 为多年NDVI平均值。

本文采用ArcGIS的自然断裂聚类分析将植被

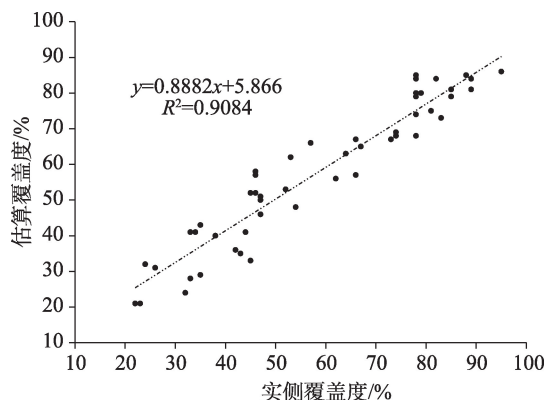


图2 锡林郭勒草原植被覆盖度估算结果与实测结果相关性分析

Figure 2 Correlation between the estimation and measurement of vegetation coverage in Xilingol League

2019年7月

覆盖度标准差 S 分为以下五个不同类型:低($0.055 \leq S < 0.008$)、较低($0.075 \leq S < 0.055$)、中($0.095 \leq S < 0.075$)、较高($0.119 \leq S < 0.095$)、高($S \geq 0.245$)。

2.3.3 植被覆盖度变化趋势

基于一元线性回归方程中的斜率来表示每个像元的植被覆盖度变化趋势^[26]。文本参考 Stow^[27]的做法来分析每个像元的植被覆盖度变化,其计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n i NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4)$$

式中: θ_{slope} 为趋势线斜率大小; n 和 $NDVI_i$ 含义同式(3)。 θ_{slope} 大于0表示在研究时间段内植被覆盖度呈增加趋势; θ_{slope} 小于0植被覆盖度呈减少趋势; θ_{slope} 等于0则说明研究区的植被覆盖度未发生变化。

2.3.4 偏相关分析

地理系统是由多个要素组成的庞大而复杂系统,采用偏相关分析来衡量两个要素之间的密切程度,排除其他要素的影响^[28]。本文分别计算出固定降水后的植被覆盖度与气温偏相关系数和固定气温后的植被覆盖度与降水偏相关系数。

2.3.5 残差分析

残差是指实际观测值与预测值之间的差异值,本文采用残差分析法来区分研究区生长季NDVI值变化中的自然因素和人文因素影响。首先对每个像元建立NDVI值与气温、降水的回归模型,并逐像元预测降水、气温因子对NDVI值的贡献,在不考虑其他因素的情况下,预测NDVI值与实际NDVI值之间残差大小就等于各像元的人文影响贡献程度。目前,相关研究结果已证明植被覆盖残差趋势值是评估人类活动生态效益的最直接有效的方法之一^[29]。具体计算公式如下:

$$y = a + bx_1 + cx_2 \quad (5)$$

$$\sigma = NDVI_{\text{max}} - NDVI'_{\text{max}} \quad (6)$$

式中: y 为因变量NDVI值; x_1 、 x_2 为自变量,即降水和气温2个气候因子; a 和 b 分别被称为截距和斜率; σ 为残差; $NDVI_{\text{max}}$ 和 $NDVI'_{\text{max}}$ 分别是实测NDVI值和估算NDVI值。 σ 值为正表明人类活动促进植

被生长,草原生态环境获得改善,反之则说明人类活动对植被生长产生负面作用,即人类活动引起草原生态环境的退化。

3 结果与分析

3.1 锡林郭勒草原植被覆盖度的时间变化特征

2000—2015年锡林郭勒生长季NDVI值呈现波动上升趋势,其增长速率为0.0021/a,高于蒙古高原地区生长季NDVI值增长速率0.0012/a^[30](图3)。说明草原植被覆盖显著增加。但不同阶段表现出不同的变化特征,2000—2003年、2004—2009年和2010—2013年生长季NDVI值明显增长。其中波谷出现在2000年、2004年(NDVI值为0.718)和2010年,波峰出现在2003年、2009年和2012(NDVI值为0.764)年。以上关于锡林郭勒草原植被覆盖度年际变化特征与杭玉玲^[31]、贾若楠^[32]等人的研究结果一致。

3.2 锡林郭勒草原植被覆盖度的空间变化特征

锡林郭勒草原植被变化在空间分布上存在明显地域差异性(图4),呈现由东到西递减趋势,形成东高西低过渡分布特征。低值区域主要分布于苏尼特右旗、苏尼特左旗大部分地区,该区域土地类型主要以荒漠草原为主,植被稀少;而高值区集中分布于东乌珠穆沁旗及西乌珠穆沁旗地区和零散分布于南部部分旗县。研究区近16年平均植被覆盖度为0.471,其中草甸草原地区植被覆盖度最高

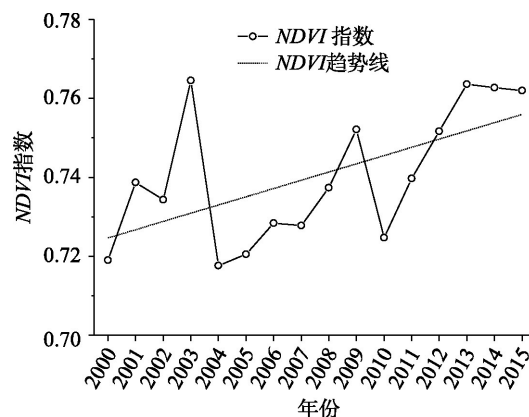
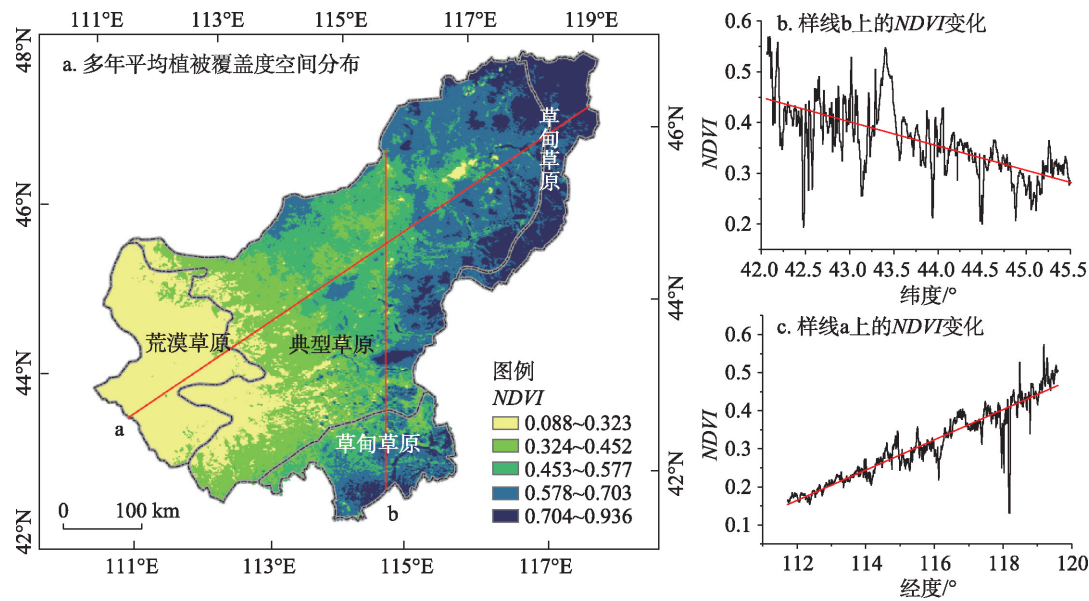


图3 2000—2015年锡林郭勒草原地区植被覆盖度的动态变化

Figure 3 Variation of annual mean NDVI in Xilingol League, 2000-2015



审图号:GS(2016)1569号

图4 2000—2015年锡林郭勒草原地区多年平均植被覆盖度空间分布及植被覆盖度值经纬度变化特征
Figure 4 Spatial distribution of vegetation coverage and variation with longitude and latitude in Xilingol League, 2000-2015

0.672,典型草原植被覆盖度其次0.512,荒漠草原植被覆盖度最低0.259,空间差异性显著。

从样线a植被覆盖度变化发现,随着样线往西,经度增加,植被覆盖度呈波动上升态势,研究区草原类型自东向西分别为草甸草原-典型草原-荒漠草原的分布相吻合。西部荒漠草原地区植被覆盖度变化波动相对平稳,进入典型草原与草甸草原地区,植被覆盖度和植被覆盖度的变化波动更明显。剖面线经过水体或高壁等景观时,植被覆盖度变化曲线波动式直线下降,如样线a经过乌拉盖高壁地区(东经118°附近),植被覆盖度值变化曲线出现异常低值。从样线b植被覆盖度变化可以看出,锡林郭勒草原地区植被覆盖随着纬度增加而衰退,即植被覆盖度从南到北逐渐变小。

从表1可知,锡林郭勒草原地区2000—2007年

平均植被覆盖度为47.847%,2008—2015年平均植被覆盖度为51.884%,增长4.037%。其中典型草原地区植被覆盖变化最快,16年内增长4.786%,草甸草原地区植被覆盖增长了3.150%,荒漠草原地区变化最小,仅增长1.830%。由此可见,典型草原地区植被变化最明显,成为整个研究区中最活跃、受自然演进和人类活动影响最强烈地区。

根据公式(3)对锡林郭勒草原地区每个像元进行趋势分析,从更深层次探讨研究区内植被覆盖的退化、改善或未发生变化的趋势,并对趋势结果在ArcGIS上可视化表达(图5)。近16a锡林郭勒草原植被覆盖度呈逐年改善趋势,草原生态环境从劣变好的方向发展。从锡林郭勒草原植被变化趋势图上可以看出(5a),2000—2015年该草原26.975%地区植被呈退化趋势,主要分布于苏尼特左旗和苏尼特右旗的大部分地区以及浑善达克沙地西北部地区。植被改善区域主要分布于研究区中部的锡林浩特市及东乌珠穆沁旗北部地区,占总面积的73.025%。植被显著变化(包含显著改善和显著退化)面积比重为19.078%,占据研究区面积的1/5左右,剩余4/5面积的地区植被变化不明显。从趋势变化的空间分布规律可初步验证锡林郭勒草原植被退化区域均属于人类活动较强地区,即人类城镇

表1 锡林郭勒草原地区三大草地类型区平均植被覆盖度
Table 1 Average vegetation coverage of the three types of grassland (%)

类型	2000—2007年	2008—2015年	16年变化
草甸草原	65.602	68.752	3.150
典型草原	48.746	53.532	4.786
荒漠草原	24.940	26.770	1.830
锡林郭勒地区平均	47.847	51.884	4.037

2019年7月

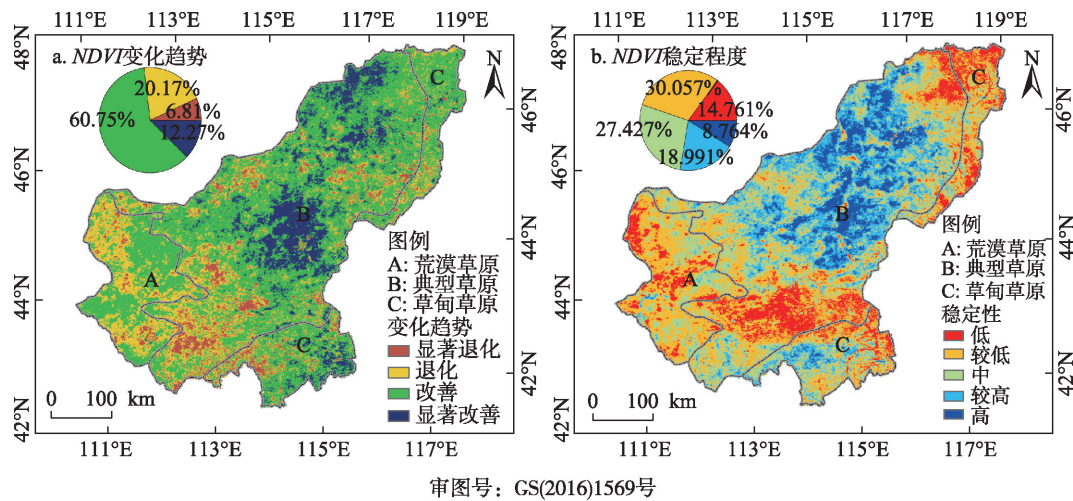


图5 锡林郭勒草原地区植被覆盖度变化趋势(a)与稳定程度(b)空间特征

Figure 5 Significance test results for NDVI linear trend (a) and stability degree (b) of each pixel in Xilingol League

建设、矿产资源开发及开垦农田等活动对自然环境造成影响,使得区域植被覆盖退化。

锡林郭勒草原植被的标准差值介于0.008~0.245之间,在空间分布上呈“两边高、中间低”特征,存在显著的空间差异性(图5b)。高和较高稳定区主要集中在分布于以锡林浩特市为中心的周边地区,南部的正镶白旗、正蓝旗部分地区亦有零散分布,与植被显著改善区的空间吻合度强。高稳定区占8.764%,较高稳定区占18.991%;中稳定区占全研究区面积1/4以上(27.427%),零星分布于整个研究区;较低和低的稳定区所占的面积比重为44.818%,其中较低稳定区面积最大(占30.057%),在研究区的东西两个边缘地区呈斑块状分布。对比植被变化趋势图和稳定程度分布图可以发现,植被改善区与高稳定性区、植被退化区与低稳定性区之间存在空间上的吻合性。锡林浩特市等中部地区及东、西乌珠穆沁旗西部地区均为典型草原地区,植被覆盖度相对较高,其发生变化的波动性相对低。

3.3 气候因子对植被覆盖变化的影响

利用锡林郭勒地区境内气象站数据获得生长期降水量和气温平均值,并分析近16年气候变化趋势。生长期平均降水量最大值出现在2012年(327.7 mm),平均降水量最小值出现在2005年(176.027 mm);2000—2015年间的生长期平均气温在13.36~14.88℃之间,最大值和最小值分别出现在2001年和

2003年。总体而言,锡林郭勒地区降水量呈现出上升趋势,而气温变化呈现出轻微下降趋势,但两者变化均不很显著。锡林郭勒地区降水量和气温从南部到北部、从东部到西部呈现出递减的空间格局,受纬度和海陆位置影响明显。

为了揭示锡林郭勒地区植被覆盖度与气象因子之间的关系,本文利用公式(5)计算16a间生长期平均植被覆盖度与降雨量和气温之间逐像元偏相关系数。植被与年降水量之间的最大和最小偏相关系数分别为0.873和-0.868,与年平均气温的最大和最小偏相关系数分别为0.871、-0.870。从偏相关系数空间分布图(图6a-6b)发现,植被覆盖与降水、气温之间正、负相关性共存,58.404%像元的植被与降雨量偏向系数为正值,主要分布于研究区中西部地区,而东乌珠穆沁旗东部及北部边境线地区的植被覆盖度与降雨量之间呈现明显负相关性,其中12.923%像元通过了0.05水平的显著性检验。与此相反,有56.438%像元的植被与气温之间呈负相关,其中18.049%像元通过了5%的显著性检验,主要集中在分布于苏尼特右旗、苏尼特左旗及阿巴嘎旗的部分地区及南部的部分旗县。植被与气温之间偏相关系数为正值区域占比为43.562%,并通过5%显著性检验的像元占14.291%;东乌珠穆沁旗东部地区植被覆盖度与气温的偏相关系数最高,可能是人类活动所导致,出现温度促进植被生长现象。

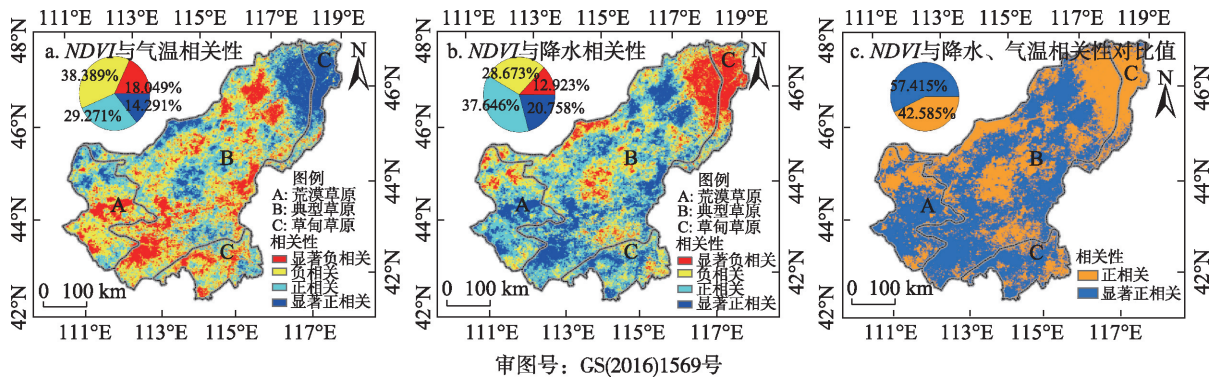


图6 锡林郭勒草原植被覆盖度与气温(a)、降水(b)偏相关系数及两者对比值(c)空间分布

Figure 6 Significance test results for correlation coefficients of NDVI and annual temperature (a) and NDVI and precipitation (b) and partial correlation coefficient (c) of each pixel in Xilingol, 2000-2015

总而言之,植被覆盖度与降水之间存在正相关关系,与气温之间呈负相关关系;通过对比每个像元植被与降水和气温之间绝对相关系数发现(图6c),植被与降雨量绝对相关系数大于与气温绝对相关系数的像元占57.415%,表示锡林郭勒草原地区2000—2015年间的植被变化对气候因子的响应很大,尤其对降雨的响应程度高于气温的响应程度。这与前人相关研究结论相同。气象因子是影响草原植被的主要原因,在干旱、半干旱草原地区,降水量则是影响草原植被覆盖关键因子^[33]。

3.4 人类活动对植被覆盖变化的影响

气象因子是植被变化的重要的驱动因子^[34],尤其在草原地区气候对草原植被的影响会被放大;但随着快速发展的城镇化和工业化进程中,人类活动

成为不能被忽略的驱动因素之一。本文采用残差分析法来实现植被变化中气象和人类活动影响分离,用残差 σ 值大小来衡量草原生态环境变化人类活动响应程度。并利用ArcGIS空间分析功能研究人类活动对植被覆盖度影响过程,从 σ 值变化斜率的计算结果表明(图7),近16年来,人类活动对植被的作用包括正向和负向两个方面,正向作用大于负向作用。

(1)正向作用。人类活动对植被改善的促进作用,该类地区占总面积的34.911%,主要分布于研究区西部地区,包含苏尼特右旗、苏尼特左旗及东乌珠穆沁旗西北地区,分别占该类型区域面积的23.565%、14.384%和14.897%(表2),在南部旗县的部分地区零散分布。为了减轻北方地区荒漠化的

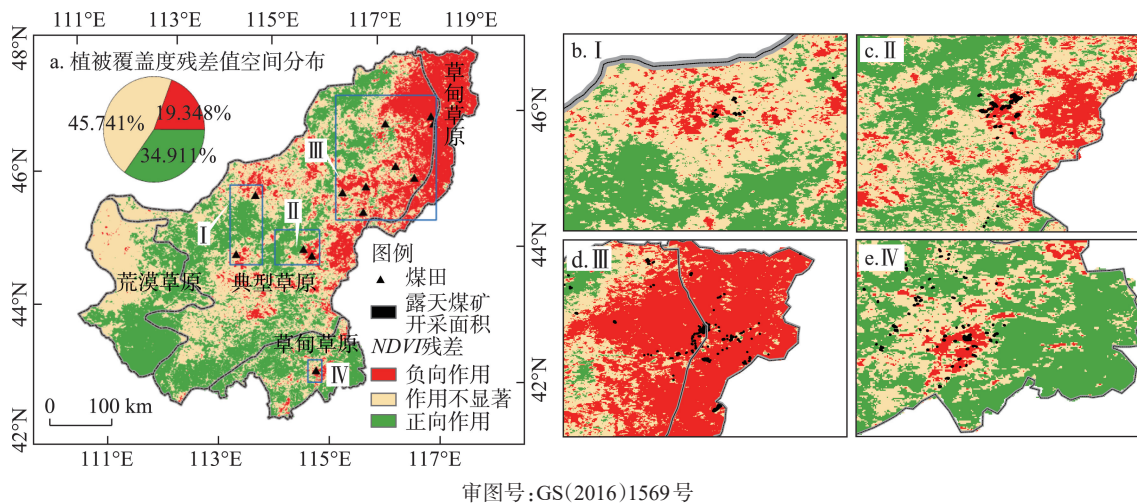


图7 2000—2015年植被覆盖度残差变化趋势空间分布和矿产资源开发关系

Figure 7 Spatial distribution of trends in fractional vegetation coverage residuals and its relationship with mineral resources development, 2000-2015

2019年7月

表2 不同地区植被覆盖受人类活动作用的面积比重

地区	负向作用	作用不显著	正向作用
正镶白旗	0.155	2.036	5.979
阿巴嘎旗	6.444	15.946	14.482
东乌珠穆沁旗	48.251	19.763	14.897
多伦县	0.139	0.622	4.468
二连浩特市	0.001	0.182	0.014
苏尼特右旗	0.193	9.662	23.565
苏尼特左旗	1.930	25.261	14.384
太仆寺旗	0.463	1.482	2.558
西乌珠穆沁旗	31.187	10.496	1.612
正蓝旗	1.951	5.436	5.969
锡林浩特市	9.156	7.874	6.488
镶黄旗	0.021	1.189	5.514

危害,国家及各级政府部门相继实施生态工程,其中最典型的是始于1978年的“三北防护林”工程,经过几十年的大规模植树造林,对生态环境脆弱地区起到了重要的防护作用。根据中国科学院相关研究表明,“三北防护林”工程对降低沙尘暴强度贡献显著^[35-37]。根据相关资料,锡林郭勒地区相继实施了退耕还林还草、京津风沙源地治理及“三北防护林”等生态工程,通过以上工程项目实施,扭转草原生态环境系统退化趋势。苏尼特右旗将生态建设作为最大的基础建设,把防沙治沙作为生态建设的重中之重,通过封沙育林、飞播造林、工程固沙、退耕还林等工程的实施,有效地遏制了沙化土地的扩展蔓延。例如,京津风沙源地治理项目区植被盖度

从实施前的不到10%提高到治理后3~5年的40%以上,牧草高度由不足15 cm增至目前的30 cm。

(2)负向作用。人类活动对植被覆盖度起负向作用,即人类破坏草原生态环境,导致植被退化。此类地区面积约占19.348%,主要分布于东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗东部地区,面积占比分别为48.250%和31.187%,锡林浩特市周边地区呈现零散分布态势。人类活动负向作用类型有很多,包括区域工业化、城镇化、过度放牧和开垦等。从图8可以看出,锡林郭勒盟地区牲畜数量在研究时间段内呈逐年减少趋势,从2000年的1025.62万头(只)减至2015年的730.33万头(只);同期东乌旗和西乌旗的牲畜数量也分别减少了52.65万和71.05万头(只)。锡林郭勒盟的畜均占有草场面积从2000年的25.43亩提高到2015年的36.04亩,说明研究区放牧压力呈明显的好转态势,对草原植被退化的影响明显减少。上述结论与前人的相关研究结果一致。即在禁牧、轮牧、休牧等条件下草原生态环境得到逐步恢复^[38,39]。

随着工业化和城镇化的快速发展,煤炭资源开发逐渐成为锡林郭勒草原“支柱产业”,使得露天煤炭开采成为草原植被退化的主要驱动因素之一。从图7可看出,锡林郭勒草原露天煤矿开采点与人类活动负向作用区(图中的红色地区)高度重合,证实了矿产资源开发对草原植被变化的负面影响。露天煤矿开采直接破坏原生植被,加剧草原沙漠化和水土流失进程^[40]。煤矿开采需大量抽取地下水,

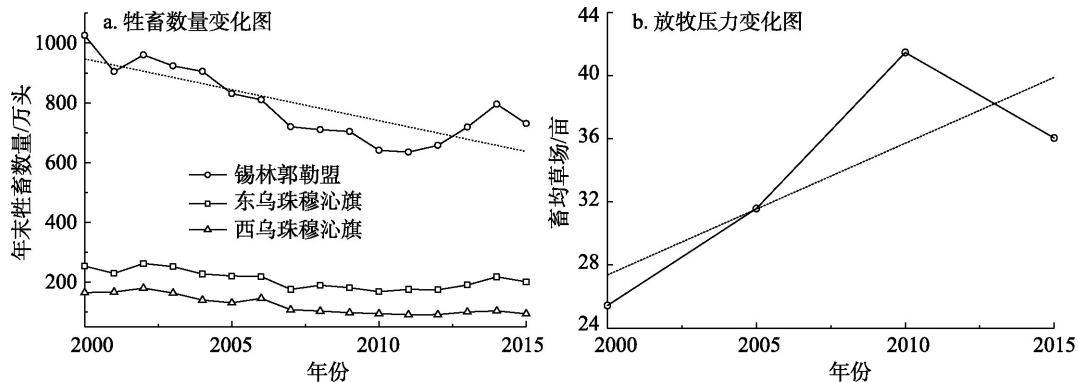


图8 锡林郭勒盟牲畜数量和放牧压力变化

Figure 8 Livestock numbers and grazing pressure in Xilingol, 2000-2015

导致地下水位下降,同时截流地表径流,使人畜饮用水来源受到严重威胁。根据 Greenpeace 的估算,每开采 1 t 煤炭需要破坏 2.54 m³ 地下水资源^[41]。2004 年修建的乌拉盖水库开始截流,导致乌拉盖湿地干涸甚至消失。此外,煤矿开采所产生的粉尘与烟尘等有害气体对水、空气和动植物的健康造成直接损害,从而影响生态系统结构。

为阐明锡林郭勒草原矿产资源开发活动与草原植被度变化规律的关系,运用缓冲区距离和每个缓冲区植被残差斜率平均值作散点图(图 9),矿区内的植被残差斜率值低于外围缓冲区的值,随着离矿中心的距离增加,植被残差斜率值越大。伴随草原露天煤矿开采活动引发大规模土地破坏,并对作为保护层的草地植被产生巨大影响。离矿区中心越近,土壤污染越严重,限制了植物的生长,从而影响植被覆盖度的高低,由于排土场下层土含硫,不会产生自然植被。通过多次建立不同半径缓冲区,并统计植被覆盖度残差斜率值大小,当半径大于 30 km 时,平均残差斜率值为正值,说明矿区 30 km 以内区域人类活动强度较大,包括尾矿库侵占草原、交通道路破坏原有景观格局等;而半径大于 30 km 区域的植被覆盖度受矿产资源开发活动强度的影响较小,并随着距离增加,草原生态环境受人类活动的强度具有变小的趋势。本文结论与白淑英等^[42]和卓义等^[43]的研究结论一致。

4 讨论

区域植被动态变化及其驱动力一直是区域生

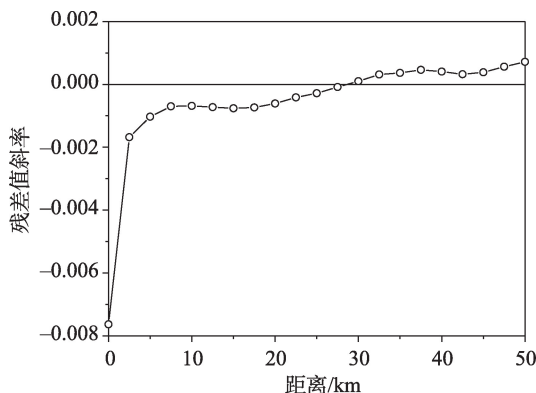


图9 锡林郭勒草原植被覆盖度残差值变化

Figure 9 Change of residual value of vegetation coverage in Xilingol League

态文明建设及全球变化中的核心问题。草原植被退化、草原生态环境演变的主要因素为气候变化与人类活动。本文选择降水和气温探讨了其对草原植被变化的驱动机制,结果显示在研究区东北及中部部分地区植被覆盖变化并非受气候条件主导,而与露天煤矿开采点重合,说明人类相关社会经济活动加快了草原生态环境的退化。

进入 21 世纪,随着区域城镇化和工业化的快速推进,锡林郭勒地区城市建设面积、工矿业用地面积迅速扩张,区域人类活动对草原生态环境的影响日益加重。早在 2003 年锡林郭勒盟就提出“工业强盟”战略,依托丰富的煤炭资源优势,大力推进工业化进程,煤炭开采为主的能源工业现已成为锡林郭勒草原工业经济的半壁江山。城镇的无序扩张及露天煤矿的大规模开发,造成草原植被的严重退化,人类活动已成为草原生态环境退化的最主要因素(图 10)。巴图娜存^[44]等对 1970 年以来锡林郭勒盟草原资源时空变化的研究中指出,人类不合理的开发利用对草地退化起了推动和促进作用,而生态建设等活动缓解或遏制了草原退化趋势。这与本文从宏观层面对锡林郭勒地区植被时空变化特征及其影响因素的分析结论相一致。

锡林郭勒草原是距北京最近的沙源区、京津地区的重要生态屏障,为了更有效地治理京津地区风沙危害,加强生态环境保护建设,构筑北疆生态屏障功能,2000 年启动了京津风沙源地治理工程,将锡

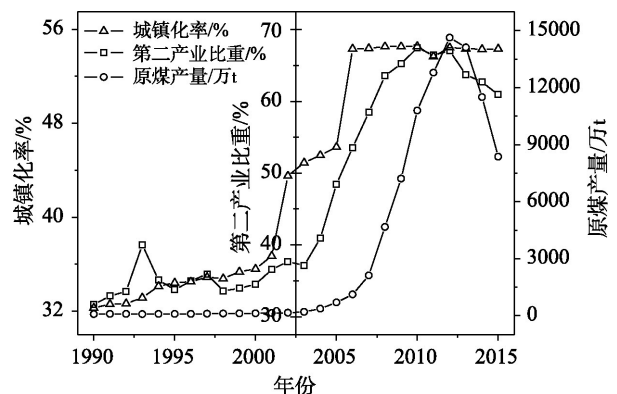


图10 锡林郭勒地区城镇化率、第二产业比重和原煤产量变化

Figure 10 Change of urbanization rate, proportion of the secondary industry, and coal production in Xilingol

2019年7月

林郭勒草原地区列入生态环境治理的重点地区,相继实施了退耕还林还草、生态移民、禁牧轮牧等生态建设工程,对草原生态的改善起到了促进作用。但由于数据的可获取性,本文尚未就生态建设工程对草原植被的促进作用进行定量评价并对其空间溢出效益作出评估。

本文仅选择气温和降水量作为气候驱动因子影响植被覆盖度的变化,而水热条件的滞后性对植被覆盖度的影响未纳入驱动因子分析,未来研究中将进行多因素融合研究,以获得更加客观合理的结果。

5 结论

本文利用趋势分析、残差分析等方法,分析了2000—2015年锡林郭勒草原植被时空变化特征,并探讨了气候变化和矿产资源开发等人类活动对草原生态环境的影响。主要结论为:

(1)2000—2015年,锡林郭勒地区植被覆盖整体上呈缓慢上升的趋势,增长速度为0.0021/a,植被覆盖度改善区域面积占整个研究区面积的73.025%。但植被覆盖度标准差值在0.008~0.245之间,变化趋势存在明显地域差异性,呈“两边高、中间低”空间分布特征。

(2)典型草原地区植被变化最明显,成为整个研究区中最活跃、受自然演进和人类活动影响最强烈地区。

(3)在选取的降水和气温两个自然因子中,锡林郭勒地区植被覆盖度受降水影像大于气温影响。研究区57.415%植被与降水量的相关系数大于植被与气候相关系数。

(4)2000—2015年间,人类活动对研究区植被的影响总体是正向干扰效应大于负向干扰,人类活动对植被改善和生态环境破坏面积分别占研究区面积的34.911%和19.348%;

(5)锡林郭勒草原生态环境破坏过程中露天煤矿开采是最主要的驱动因素,矿产开采活动对草原植被的影响随距离增加而减弱,在30 km范围内影响最大。

参考文献(References):

[1] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland

perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.

- [2] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driver vegetation changes: A critical application of RESTREND in Inner Mongolia[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982.
- [3] 梁顺林, 李小文, 王锦地, 等. 定量遥感: 理论与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Liang S L, Li X L, Wang J D, et al. *Quantitative Remote Sensing: Concept and Algorithm*[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [4] 甘春英, 王今之, 李保生, 等. 连江流域近18年来植被覆盖度变化分析[J]. *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[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 1019-1024.]
- [5] 李惠敏, 刘洪斌, 武伟. 近10年重庆市归一化植被指数变化分析[J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 119-123. [Li H M, Liu H B, Wu W. Vegetation change in the three gorges reservoir area of Chongqing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 119-123.]
- [6] Zhang L, Chen X, Cai X, et al. Spatial-temporal changes of NDVI and their relations with precipitation and temperature in Yangtze River basin from 1981 to 2001[J]. *Geospatial Information Science*, 2010, 13(3): 186-190.
- [7] 包刚, 包玉海, 覃志豪, 等. 近10年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应[J]. *地理科学*, 2013, 33(5): 613-621. [Bao G, Bao Y H, Qin Z H, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 613-621.]
- [8] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2014, 34(7): 882-888. [Bai J J, Bai J T, Wang L. Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000-2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(7): 882-888.]
- [9] Vahagn Muradyan, Garegin Tepanosyan, Asmaryan S, et al. Relationships between NDVI and climatic factors in mountain ecosystems: A case study of Armenia[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 14: 158-169.
- [10] Chu H S, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(2): 2051-2062.
- [11] 马守存, 保广裕, 郭广, 等. 1982—2013年黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应[J]. *干旱气象*, 2018, 36(2): 226-233. [Ma S C, Bao G Y, Guo G, et al. Change trend of vegetation and its responses to climate change in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 226-233.]

- [12] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236–244.
- [13] 周洪建, 王静爱, 岳耀杰, 等. 人类活动对植被退化/恢复影响的空间格局: 以陕西省为例[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4847–4856. [Zhou H J, Wang J G, Yue Y J, et al. Research on spatial pattern of human-induced vegetation degradation and restoration: A case study of Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4847–4856.]
- [14] 王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001–2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 504–519. [Wang J B, Zhao J, Li C H, et al. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 504–519.]
- [15] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近30年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(4): 86–93. [Ma M, Zhang S W, Wei B C. Temporal and spatial pattern of grassland degradation and its determinants for recent 30 years in Xilingol[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(4): 86–93.]
- [16] 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. [Yang Q, Wang T T, Chen H, et al. Characteristics of vegetation cover change in Xilingol League based on MODIS EVI data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 191–198.]
- [17] 王海梅, 李政海, 王珍. 气候和放牧对锡林郭勒地区植被覆盖变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 156–160. [Wang H M, Li Z H, Wang Z. Effects of climate and grazing on the vegetation cover change in Xilingol League of Inner Mongolia, North China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 156–160.]
- [18] 焦全军, 付安民, 张肖, 等. 基于MODIS数据的锡林郭勒草原植被覆盖变化及驱动因子分析[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(5): 659–664. [Jiao Q J, Fu A M, Zhang X, et al. Driving factors of vegetation changes in Xilingol grassland based on MODIS data[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(5): 659–664.]
- [19] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485–4498.
- [20] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417–1434.
- [21] Tucker C J, Newcomb W W, Dregne H E. AVHRR data sets for determination of desert spatial extent[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3547–3565.
- [22] 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[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 604–610. [Zhou X Y, Shi H D, Wang X R. Impact of climate change and human activities on vegetation coverage in the Mongolian Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(4): 604–610.]
- [23] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003. [Li M M. The Method of Vegetation Fraction Estimation by Remote Sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003.]
- [24] 马娜, 胡云锋, 庄大方, 等. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化[J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 251–256. [Ma N, Hu Y F, Zhuang D F, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in plan blue banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 251–256.]
- [25] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. [Xu J H. Mathematical Methods in Contemporary Geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.]
- [26] Mu S J, Yang H F, Li J L, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation coverage and its relationship with climate factors[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 231–246.
- [27] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111–1117.
- [28] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 等. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1367–1378. [Long H L, Li X B, Wang H, et al. Net Primary Productivity(NPP) of grassland ecosystem and its relationship with climate in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1367–1378.]
- [29] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 112–119.
- [30] 温都日娜, 包玉海, 银山, 等. 2000–2014年蒙古高原植被覆盖时空变化特征及其对地表水热因子的响应[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1345–1356. [Wen D R N, Bao Y H, Yin S, et al. The spatial and temporal variation cover in Mongolian Plateau and its response hydrothermal factors from 2000 through 2014[J]. *Journal of Geocryology*, 2017, 39(6): 1345–1356.]
- [31] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000–2010年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. *草地学报*, 2014, 22(6): 1194–1204. [Hang Y L, Bao G, Bao Y H, et al. Spatiotemporal change of vegetation coverage in Xilin Gol Grassland and its responses to climate change during 2000–2010[J]. *Acta Pratacul-*

2019年7月

- turae Sinica, 2014, 22(6): 1194–1204.]
- [32] 贾若楠, 杜鑫, 李强子, 等. 近15年锡林郭勒盟植被变化时空特征及其对气候的响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 47–56. [Jia R N, Du X, Li Q Z, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation variation in Xilin Gol League in recent 15 years and its response to climate[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(5): 47–56.]
- [33] Zhang X, Dai J, Ge Q. Variation in vegetation greenness in spring across eastern China during 1982–2006[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(1): 1–12.
- [34] 吴仁吉, 康萨如拉, 张庆, 等. 锡林河流域羊草草原植被分异的驱动力[J]. 草业学报, 2015, 26(4): 15–23. [Wu R J, Kang S R L, Zhang Q, et al. Driving forces of *Leymus chinensis* community differentiation in the Xilin River Basin[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 26(4): 15–23.]
- [35] Tan M H. Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(4): 387–396.
- [36] Tan M H, Li X B. Does the Green Great Wall effectively decrease dust storm intensity in China? A study based on NOAA NDVI and weather station data[J]. Land Use Policy, 2015, 43: 42–47.
- [37] Tan M H, Li X B, Xin L J. Intensity of dust storms in China from 1980 to 2007: A new definition[J]. Atmospheric Environment, 2014, 85: 215–222.
- [38] 王子玉, 许端阳, 杨华, 等. 1981–2010年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 1025–1032. [Wang Z Y, Xu D Y, Yang H, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia, 1981–2010[J]. Progress in Geography, 2017, 36(8): 1025–1032.]
- [39] Tong S Q, Zhang J Q, Bao Y H. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982–2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 595–610.
- [40] 姚峰, 古丽·加帕尔, 包安明, 等. 基于遥感技术的干旱荒漠区露天煤矿植被群落受损评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 707–713. [Yao F, Guli J, Bao A M, et al. Damage assessment of the vegetable types based on remote sensing in the open coalmine of arid desert area[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 707–713.]
- [41] 孙庆伟. 警惕煤炭依赖引发水资源危机[EB/OL]. (2012–11–23) [2018–10–30]. <https://www.greenpeace.org.cn/43101/>. [Sun Q W. Be wary of coal dependence and trigger water crisis[EB/OL]. (2012–11–23) [2018–10–30]. <https://www.greenpeace.org.cn/43101/>.]
- [42] 白淑英, 吴奇, 沈渭寿, 等. 内蒙古草原矿区土地退化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 178–186. [Bai S Y, Wu Q, Shen W S, et al. Characteristics of land degradation in mining areas of Inner Mongolia Grassland[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(2): 178–186.]
- [43] 卓义, 于凤鸣, 包玉海. 内蒙古伊敏露天煤矿生态环境遥感监测[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2007, 36(3): 358–362. [Zhao Y, Yu F M, Bao Y H. Remote sensing monitor of the ecological environment of the Yimin open coal mine in Inner Mongolia[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2007, 36(3): 358–362.]
- [44] 巴图娜存, 胡云锋, 艳燕, 等. 1970年代以来锡林郭勒盟草地资源空间分布格局的变化[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1017–1023. [Ba T N C, Hu Y F, Yan Y, et al. The variations and its spatial pattern of grassland changes in Xilinguole from 1975 to 2009[J]. Resources Science, 2012, 34(6): 1017–1023.]

Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS/NDVI in Xilingol, China

A Rong^{1,4}, BI Qige², DONG Zhenhua^{1,3}

(1. School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Department of Environmental Engineering, Hohhot Minzu College, Hohhot 010051, China; 3. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China; 4. Inner Mongolia Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolian Plateau, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Grassland degradation has become an important ecological problem, seriously affecting the social and economic development of northern China. Based on MODIS/NDVI datasets, we analyzed the spatiotemporal patterns of change in vegetation cover and their linkages with climate change and human activities from 2000 to 2015 in the typical grassland region of Xilingol in northern China. The results indicate that NDVI increased significantly, at a growth rate of 0.0021/a. But the trend of vegetation coverage change differed spatially, especially in some areas of northwest Otindag Sandy Land and Sonid Right and Sonid Left Banners, where grassland degradation has occurred. The degraded area accounted for 1/5 of the total, and the grassland vegetation cover in other areas clearly increased. Compared with temperature, precipitation is the main factor affecting vegetation cover change in the study area. Human activities play both a positive and a negative role in improving and degrading grassland vegetation, and the positive effect of human activities on vegetation is greater than the negative effect in Xilingol during 2000–2015. The area of positive human interference accounted for 34.911% of the total, while human activities led to the destruction of the ecological environment of 19.348% of the area. The returning farmland to forest and grassland program, the Beijing-Tianjin sandstorm source control project, the Three-North shelter forest project, and other ecological engineering programs promoted vegetation coverage growth. However, the rapid development of urbanization and industrialization, overgrazing, excessive land reclamation, and other human activities led to decreased vegetation coverage.

Key words: vegetation cover change; residual analysis; MODIS/NDVI datasets; human activities; mining activities; Xilingol