

锡林郭勒植被NDVI时空变化及其驱动力定量分析

史娜娜 肖能文 王琦 韩煜 高晓奇 冯瑾 全占军*

中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

摘要 定量评价归一化植被指数(NDVI)变化特征及其驱动机制, 对了解区域生态变化特征, 促进区域生态与社会经济的可持续发展具有重要作用。该文利用MODIS-NDVI数据, 采用趋势分析法探讨了锡林郭勒2000–2015年生长季植被NDVI时空格局; 然后, 将各驱动因子的空间影响面积与植被显著增加/减少区域进行空间叠加分析, 二者比例即为贡献率大小。结果表明: 研究区植被NDVI整体缓慢增加, 呈现“东北高西南低”的分布格局。NDVI显著增加面积大约是显著减少面积的2倍, 且在气候和人类活动的双重作用下, 植被NDVI表现出显著的空间异质性。在NDVI显著增加区域, 气候影响比例为47.79%, 且降水和气温影响比例相当; 禁牧及草畜平衡政策是最主要的人为影响因素, 占比69.55%。在NDVI显著减少区域, 气候因素占比52.55%, 且以降水影响为主; 人类活动占比24.73%。在NDVI显著增加区域, 人类活动的影响大于气候因素, 且二者耦合作用较突出。

关键词 归一化植被指数; 驱动机制; 气候响应; 人类活动; 锡林郭勒

史娜娜, 肖能文, 王琦, 韩煜, 高晓奇, 冯瑾, 全占军 (2019). 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, 43, 331–341. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0254

Spatio-temporal dynamics of normalized differential vegetation index and its driving factors in Xilin Gol, China

SHI Na-Na, XIAO Neng-Wen, WANG Qi, HAN Yu, GAO Xiao-Qi, FENG Jin, and QUAN Zhan-Jun*

State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract

Aims Quantitative evaluation of the vegetation normalized differential vegetation index (NDVI) dynamics plays an important role in understanding of the characteristics of regional ecological environment change and realizing the harmonious and sustainable development between regional ecology and socio-economy.

Methods The study employed the supplementary trend analysis with MODIS-NDVI data, analyzed the spatio-temporal patterns of vegetation NDVI and the driving factors behind the changes in Xilin Gol during 2000–2015. Then, the ratio of the overlapped areas to the areas with significant NDVI changes was defined as the contribution rate.

Important findings 1) NDVI represented a slow vegetation increase trend and showed a “Northeast high and Southwest low” spatio-temporal pattern. The NDVI significantly increased area was twice of the area significantly reduced. 2) The vegetation NDVI showed a significant spatial heterogeneity under the dual effects of climate and human activities. In the area of NDVI significantly increased, climate factor accounted for 47.79% of the causes, and the precipitation and temperature make nearly equal contributions while the policies of grazing prohibition and balance management between grass and livestock is the most important human factor, accounting for 69.55% of the causes. 3) In the area of NDVI significantly reduced, climate factors accounted for 52.55% of the causes, in which precipitation was the main factor among all. Human activities accounted for 24.73% of the causes. 4) In the area of NDVI significantly increased, the impact of human activities is greater than that of climatic factors, and the coupling effect between them is prominent.

Key words normalized differential vegetation index; driving mechanism; climate response; human activity; Xilin Gol

Shi NN, Xiao NW, Wang Q, Han Y, Gao XQ, Feng J, Quan ZJ (2019). Spatio-temporal dynamics of normalized differential vegetation index and its driving factors in Xilin Gol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 331–341. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0254

收稿日期Received: 2018-10-16 接受日期Accepted: 2019-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501108-5和2016YFC0501101-3)。Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC0501108-5 and 2016YFC0501101-3).

* 通信作者Corresponding author (quanzj@craes.org.cn)

锡林郭勒地处内蒙古自治区中部,既是国家重要的畜产品基地,又是西部大开发的前沿,也是距京津唐最近的草原牧区,更是北方重要的生态屏障,具有重要的战略地位。作为生态脆弱区,锡林郭勒生态退化对当地畜牧业和周边生态产生了一定影响(Piao *et al.*, 2003)。植被是陆地生态系统的直接表征,而归一化植被指数(NDVI)作为最常用的植被响应指标,能够反映区域生态环境变化状况(Pettorelli *et al.*, 2005; Wardlow & Egbert, 2008; 袁丽华等, 2013; 赵卓文等, 2017)。因此,开展区域植被变化及驱动力定量研究,厘清气候和人类活动的作用机制,可为区域生态保护与修复提供科学依据。

遥感数据具有覆盖面积广、时相分辨率高的特点,为研究地表植被NDVI变化提供了长序列数据源,而SPOT、MODIS-NDVI等数据的普及提高了研究的可靠性。利用NDVI分析中国植被活动时空格局的结果表明,不同地区、同一地区不同季节的植被具有明显的空间分异性(方精云等, 2003; Piao *et al.*, 2003; 梁四海等, 2007; 罗玲等, 2009; 神祥金等, 2013; 白建军等, 2014)。关于植被NDVI变化的驱动力,主要关注的是气候因子,特别是气温和降水与植被的响应关系。研究结果表明,在年际关系上,植被对降水的响应更显著;在月际关系上,NDVI对降水和气温响应均存在时滞效应(孙艳玲等, 2010; 穆少杰等, 2012)。此外,人类活动,如城镇化(周锡饮等, 2014)、人工造林(李晓光, 2014)、农田扩张(王子玉等, 2017)、放牧(Li *et al.*, 2012)等对植被NDVI变化也会产生较大影响。

关于锡林郭勒植被NDVI变化的研究成果已有较多,如杨强等(2015)利用回归分析得出2000–2013年锡林郭勒年最大植被覆盖度有所增加;由于牧业、矿业、道路建设等活动加剧,植被覆盖状况整体改善不明显(姜晔等, 2010); Chuai等(2013)认为植被与气温和降水的关系因植被类型而异,且存在滞后效应;邢旗等(2005)和孙小龙等(2014)分析得出休牧和禁牧对植被恢复起到了积极作用;而不同植被类型生长季结束时间呈现出了差别较小的延迟趋势(迟登凯等, 2016); Li等(2012)认为放牧是造成1980–2006年锡林郭勒植被变化的主要因素,合理控制放牧规模将有助于植被恢复; Mu等(2013)认为土地利用变化是导致植被变化的主要成因。上述研究在评价方法上,大多采用回归分析、相关性分析

研究驱动因子的作用机制,这两种方法虽应用较多,但忽略了要素之间的关联性和耦合性,且缺乏客观的空间化、定量化方法;此外,容易忽略驱动因子作用的空间差异性,且由于社会经济因素的难获得性,未能深入分析人类活动对植被NDVI的影响;而气候、工业化、城市化等驱动因子对区域植被态势的影响却是多时相、动态变化的,且表现出不同的空间分异特征,模型结果往往不能有效揭示植被NDVI的动态演化,并难以预测其发展趋势。

本文以锡林郭勒为研究区,在栅格尺度上采用MODIS-NDVI数据分析2000–2015年锡林郭勒植被NDVI变化,辨识NDVI发生显著变化的区域;分析气候因素与人类活动等驱动因子的空间变化态势,并与植被NDVI显著变化区域进行空间叠加,结合区域地表植被覆盖来解析锡林郭勒植被变化过程及其驱动力的作用范围和强度。研究结果将为掌握区域生态变化特征,促进区域生态和社会经济协调发展提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒盟地处内蒙古自治区中部(41.58°–46.77° N, 111.15°–119.97° E),总面积20.26万km²,是距京津冀经济圈最近的草原牧区。锡林郭勒地势南高北低,以高平原为主,各种地貌相间分布。海拔700–2 000 m;该区属于中温带干旱、半干旱大陆性季风气候,年平均气温0–4 °C,年降水量300–380 mm,由西南向东北递增,受制于降水量的空间分布格局,草原类型从西南向东北依次为荒漠草原、典型草原和草甸草原(图1)。

1.2 数据来源

本文采用的数据包括NDVI数据、气象数据、社会经济数据等。NDVI数据:采用MODIS数据(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率500 m,时间分辨率30 d,采用最大值合成法生成研究区2000–2015年生长季(4–10月)NDVI长时间序列数据;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>),利用锡林郭勒及其周边30个气象站点的气温和降水数据,采用kriging插值法生成2000–2015年共计16年的气温和降水空间分布数据,空间分辨率500 m;城镇化及工矿化、农田扩张数据提取自土地利用数据。该数据包括2000、2010和2015年3期,来源于中

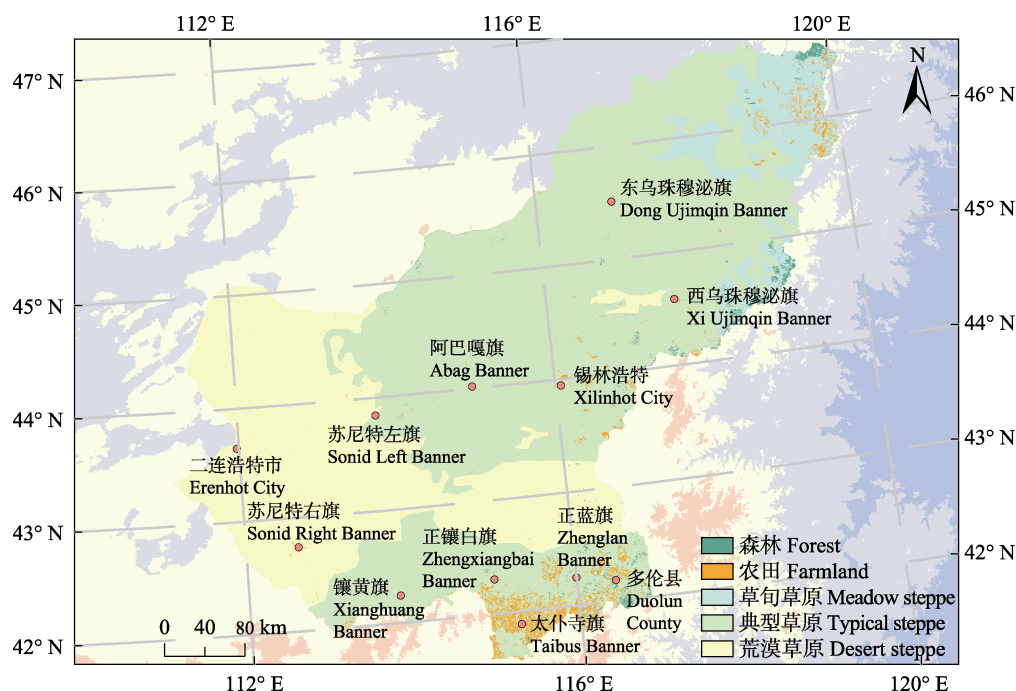


图1 锡林郭勒植被类型分布图。

Fig. 1 Vegetation distribution in Xilin Gol.

国科学院资源环境数据中心, 空间分辨率500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 线性趋势法

在栅格尺度上, 利用线性趋势法分析植被 NDVI 年际变化趋势。线性趋势法在像元尺度对变化趋势进行拟合, 拟合方程的斜率即为变化强度。该方法的优点在于拟合过程中采用了研究时段内各年份的数据, 由此避免了随机偶发因素对植被的影响, 拟合结果更贴近于植被真实的变化情况(王震等, 2016)。此外, 通过 t 检验法 ($p < 0.05$) 对植被 NDVI 的显著性进行检验, 确定植被发生显著变化的区域。趋势分析法的数学模型如下:

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

式中, n 为研究时段的长度, 本研究为 2000–2015 年, 共计 16 年; $NDVI_i$ 为第 i 年的年均 NDVI 值。当 $slope > 0$ 时, 表明研究时段内 NDVI 呈增长趋势, 反之则呈现减少趋势。

1.3.2 驱动力分析

植被 NDVI 变化受气温、降水等气候因素以及禁牧/草畜平衡政策、城镇化及工矿化等人类活动因素的

综合影响。因此, 考虑气候等自然因素的空间差异以及经济社会数据的可获取性, 选取年平均气温、年降水量作为反映气候因素的指标, 选取禁牧/草畜平衡政策、城镇化及工矿化、农田扩张、人工造林等作为反映人类活动的指标。具体分析过程如下: 首先, 采用相关性分析方法(刘宪锋等, 2015)分别计算气温和降水量与 NDVI 的相关性, 通过 t 检验 ($p < 0.05$) 找出二者显著相关区域; 其次, 人类活动指标空间化; 再次, 将上述结果分别与植被显著增加区域和植被显著减少区域进行空间叠加, 重叠区域即为驱动力影响区域; 最后, 计算各驱动力影响面积占植被显著增加/减少总面积的百分比, 此百分比即为贡献率大小。其中, 人类活动指标处理过程如下: 第一步, 将锡林郭勒划定的禁牧和草畜平衡区利用 ArcGIS 进行矢量化, 采用 conversion 功能将其转换为栅格数据; 第二步, 利用 combine 功能分析各驱动因素 2000 年向 2015 年转换数据, 依次提取城镇及工矿用地扩张区域、农田扩张区域和退耕还林/草数据。

2 结果和分析

2.1 植被 NDVI 时空变化特征

2.1.1 时间变化特征

以每年 NDVI 平均值代表其当年值分析时间序

列特征, 结果表明, 2000–2015年NDVI整体缓慢增加, 增速为每10年0.048, 表明植被状况有一定好转(图2A)。NDVI峰值出现在2003、2008和2012年, 与同期降水量波峰一致, 表明降水增加可促进植被生长。该结论与贾若楠等(2016)、杭玉玲等(2014)的研究结果一致。

构建了草地、林地、沙地和农田4种生态系统类型的NDVI序列(图2B), 近16年来, 4种生态系统类型的NDVI存在一致性。2001、2005、2007和2009年植被长势处于低谷, 与降水波谷相对应(图2A)。林地植被NDVI最高, 农田次之, 沙地最低。

2.1.2 空间变化特征

2.1.2.1 空间分布特征

图3A为2000–2015年锡林郭勒土地利用变化分布。该区以草地为主, 农田、林地、水域等类型所占比例较小。草地广泛分布于全盟, 主要有典型草原植被、草甸草原植被和荒漠

草原植被; 农田主要分布在农牧交错区的多伦县和太仆寺旗; 林地主要分布在东乌珠穆沁旗东北部。利用ArcGIS的重分类功能将锡林郭勒生长季NDVI划分为5个等级(图3B), NDVI小于0.30的区域占总面积的18.13%, 主要分布在苏尼特左旗西部、苏尼特右旗北部、二连浩特市等, 该区主要为荒漠草原; NDVI值在0.30–0.45之间的地区占全盟面积的23.61%, 主要分布在苏尼特左旗东部、苏尼特右旗南部、阿巴嘎旗西南部、镶黄旗和正镶白旗北部等, 为荒漠草原-典型草原过渡区; NDVI值在0.45–0.60之间的地区占全盟面积的25.14%, 主要分布在东乌珠穆沁旗南部、锡林浩特、阿巴嘎旗东部、正镶白旗和正镶蓝旗等, 以典型草原植被为主; NDVI值在0.60–0.75之间的地区占全盟面积的25.45%, 主要分布在太仆寺旗、多伦县、东乌珠穆沁旗中北部、西乌珠穆沁旗等, 地表水比较丰富, 农业较为发达;

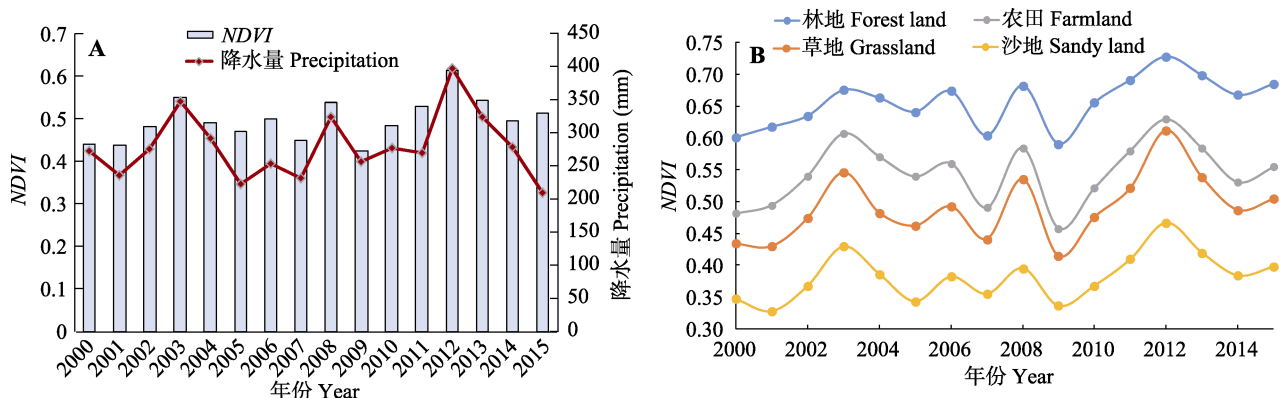


图2 锡林郭勒2000–2015年归一化植被指数(NDVI)时间序列特征。A, 区域NDVI。B, 不同生态系统类型NDVI。
Fig. 2 Time-series dynamics of normalized differential vegetation index (NDVI) in Xilin Gol during 2000–2015. A, Regional NDVI value. B, NDVI value of different ecosystem types.

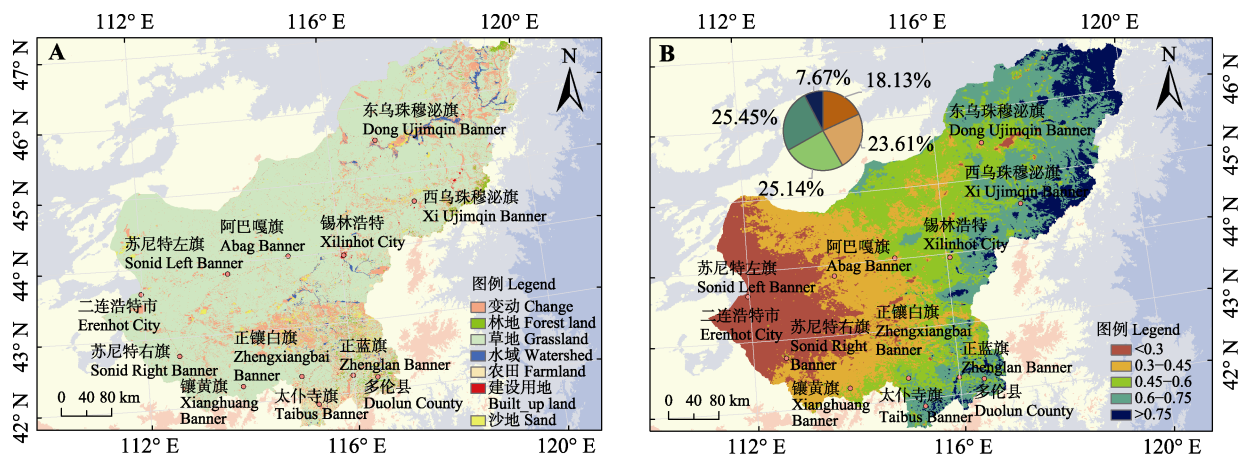


图3 锡林郭勒归一化植被指数(NDVI)空间分布特征。A, 生态系统类型。B, NDVI分级。
Fig. 3 Spatial distribution of normalized differential vegetation index (NDVI) in Xilin Gol. A, Ecosystem types. B, NDVI classification.

NDVI值大于0.75的地区占全盟面积的7.67%, 分布在东乌珠穆沁旗东北部、西乌珠穆沁旗东侧, 以草甸草原和林地为主, 是全盟植被最好的区域。整体来看, 锡林郭勒植被NDVI格局呈现“东北高西南低”的分布特征。

2.1.2.2 空间趋势特征 2000–2015年锡林郭勒植被NDVI变化趋势及显著性分析结果(图4A)表明, 植被NDVI整体表现为上升趋势, 增加和减少的面积

分别占83.19%和16.81%。植被呈增加趋势的区域面积为168 539.5 km², 其中显著增加的区域面积为9 097.25 km², 占总增加面积的5.40%, 主要分布在东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、多伦县、太仆寺旗、阿巴嘎旗、正蓝旗、正镶白旗。对于不同生态系统类型, 草地植被显著增加区域面积为1 446 km², 占总显著增加区域面积的15.89%; 林地显著增加面积为36.75 km², 占总显著增加面积的0.40%; 沙地植被显著增加的面积为451.5 km², 占总显著增加面积的4.96%。植被呈下降趋势的区域面积为34 060 km², 其中显著减少的区域面积为4 232.25 km², 占总减少面积的12.43%, 主要分布在西乌珠穆沁旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、镶黄旗等地区。对于不同植被类型, 草地植被显著减少区域面积为678.75 km², 占总显著减少区域面积的16.04%; 林地显著减少面积为31.50 km², 占总显著减少面积的0.74%; 沙地植被显著减少的面积为119.75 km², 占总显著减少面积的2.83%。

考虑到全国生态环境十年变化(2000–2010年)、全国生态环境五年变化(2010–2015年)、退耕还林/还草等生态保护与建设工程实施效果, 以及生态系统2000、2010及2015年数据需求, 将锡林郭勒NDVI变化过程分为2个阶段, 2000–2010年为第1阶段, 2010–2015年为第2阶段, 分别研究各阶段NDVI空间变化特征。图4B表明, 2000–2010年, NDVI变化以不显著下降为主(50.49%), 主要分布在东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、镶黄旗、正镶白旗、苏尼特左旗等区域; 其次为不显著上升(35.09%)。图4B表明, 2010–2015年, NDVI以显著上升为主(51.47%), 不显著下降区域占26.97%, 上升区域主要分布在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗(草甸草原区)及锡林浩特市、阿巴嘎旗(典型草原区)。总体来看, 锡林郭勒植被NDVI变化以中、南部增加为主, 西部有所下降。

2.2 植被NDVI变化驱动力解析

根据中国科学院资源环境数据中心2000–2015年生态系统数据, 锡林郭勒生态系统以草地为主, 2000、2010和2015年草地分别占全盟面积的88.92%、87.28%和87.14%, 优势地位突出。2000–2015年, 草地减少3 609.25 km², 减幅2.00%; 林地呈现下降趋势, 减幅0.81%; 农田增加, 增幅12.60%; 建设用地是增幅最大的土地利用类型, 增幅高达90.01%。此外, 区域气候呈现变暖趋势(于国

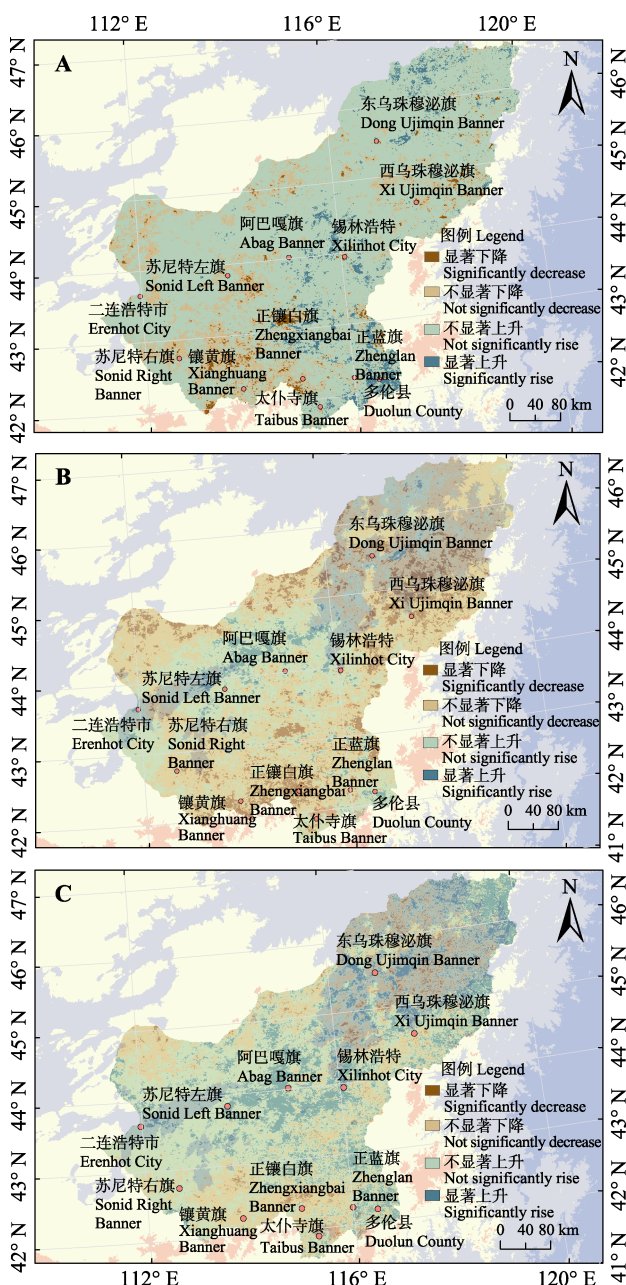


图4 锡林郭勒盟归一化植被指数(NDVI)变化显著性检验结果。A, 2000–2015年。B, 2000–2010年。C, 2010–2015年。

Fig. 4 Significance of spatial changes of normalized differential vegetation index (NDVI) in Xilin Gol. A, 2000–2015. B, 2000–2010. C, 2010–2015.

茂, 2011)。为分析区域气候和人类活动对植被NDVI的驱动机制, 选取了气候、城镇化、工矿化、农田扩张、沙漠化、禁牧/草畜平衡政策等因子开展植被NDVI驱动力分析。

2.2.1 植被显著增加区域驱动力分析

全球气候变化导致区域气温和降水随之变化, 进而对植被生长造成显著影响(孙小龙等, 2014)。图5是锡林郭勒植被NDVI与降水和气温相关性分析的空间分布, 结果表明典型草原和荒漠草原对降水的响应显著, 农牧交错区植被和草甸草原植被对气温的响应更显著。植被显著增加区域气候和人类活动的驱动因素分布见图6, 植被NDVI显著增加受气候影响的面积为1 461.75 km², 占全区植被显著增加面积的47.79%。植被NDVI受气候因子影响区域空间

差异显著, 部分植被显著增加的区域只受降水、温度的单独影响, 部分区域则受降水和气温的耦合作用。降水对植被变化影响较气温大, 特别是典型草原区与沙地区, 这主要与上述地区典型草原与荒漠草原对降水具有高敏感性响应有关(王子玉等, 2017)。降水与气温耦合作用下植被显著增加, 但在影响区域方面较为分散, 主要分布在东乌珠穆沁旗和多伦县, 前者位于典型草原向草甸草原的过渡区, 后者位于农牧交错区, 均处于降水较多的区域, 适当的温度上升可促进植被生长。

2000–2015年, 人类活动影响下植被显著增加面积为6 875.50 km², 占全盟植被显著增加面积的78.96%。禁牧及草畜平衡政策是促使区域植被NDVI增加的主要因素, 影响面积占比为69.55%, 主要分

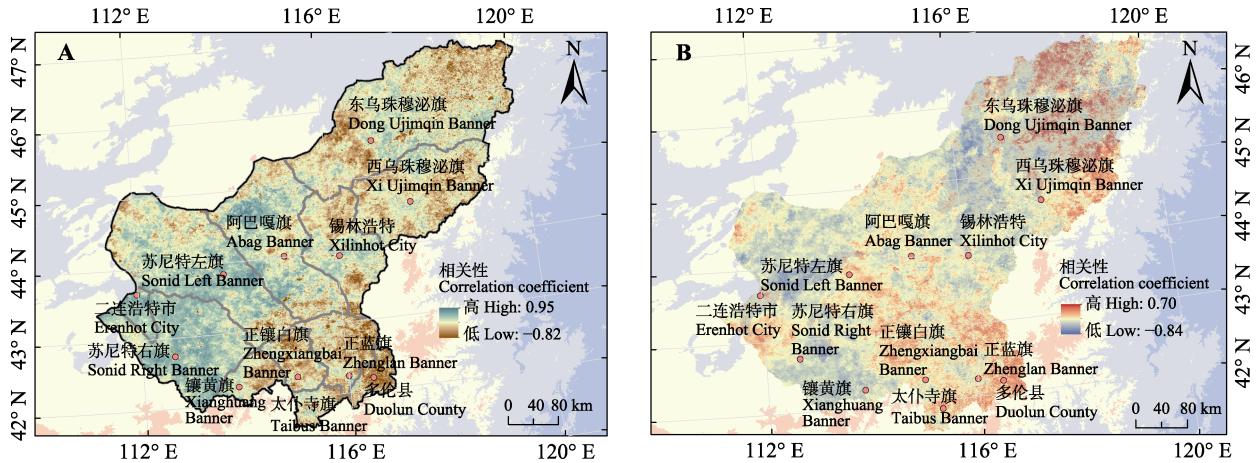


图5 锡林郭勒2000–2015年归一化植被指数(NDVI)与气候因素相关性空间分布。A, 降水。B, 气温。

Fig. 5 Spatial distribution of correlation between normalized differential vegetation index (NDVI) and climate factors in Xilin Gol during 2000–2015. A, Precipitation. B, Air temperature.

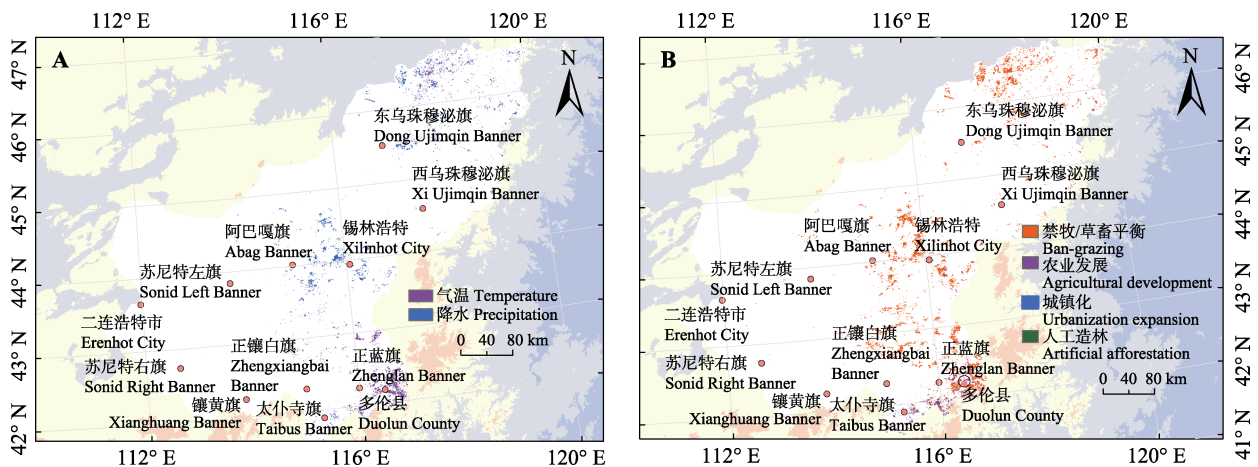


图6 植被归一化指数(NDVI)显著增加区域驱动因子空间分布。A, 气候因子。B, 人类活动因子。

Fig. 6 Spatial distribution of driving factors in region with significant increased normalized differential vegetation index (NDVI). A, Climatic factors. B, Human activities.

布在东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、阿巴嘎旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县等, 该项政策实施效果显著。城镇化主要对少数旗县部分区域植被NDVI显著增加有影响, 如多伦县、太仆寺旗、锡林浩特市等, 究其原因, 农村劳动力大量析出, 在一定程度上缓解了迁出地的人口压力, 促进了当地植被覆被状况改善(李仕冀等, 2015)。人工造林在短时间内促进植被恢复, 对局地植被覆盖增加具有积极影响, 主要分布于东乌珠穆沁旗、多伦县、正蓝旗、阿巴嘎旗、苏尼特左旗, 表明生态工程的实施在一定程度上达到了改善区域生态环境的效果。尽管人工造林实施效果逐渐显现, 但在区域性干旱背景下, 却未能抵消2014和2015年的干旱胁迫对植被生长的不利影响, 导致NDVI下降。农田扩张对植被显著增加的影响主要集中在多伦县、太仆寺旗, 影响面积为709.75 km², 该区为农牧交错区, 田地耕作促进了农田植被的保水能力, 减少了土壤侵蚀, 一定程度上促进了植被覆盖度增加。

在植被显著增加区域, 气候和人类活动共同影响的面积为4 004.75 km², 占植被显著增加总面积的45.99%, 主要涉及7个旗县, 包括东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、多伦县、太仆寺旗、正蓝旗、阿巴嘎旗、正镶白旗等, 表现为降水和气温与禁牧/草畜平衡政策、降水与农田扩张等都有一定的耦合作用。

2.2.2 植被显著减少区域驱动力分析

2000–2015年, 锡林郭勒植被NDVI显著减少区域气候及人类活动的空间分布见图7。气候因素对植

被显著减少的影响面积为2 017.75 km², 占全盟植被显著减少面积的52.55%。降水对植被显著减少的影响尤为明显, 主要集中在苏尼特左旗、苏尼特右旗、镶黄旗等, 其影响面积为1 644.25 km²。以苏尼特右旗为例, 近40年来降水整体平稳下降, 气温升高, 呈现变暖趋势, 加剧了草地生态系统退化, 进而影响植被覆盖度使其呈现下降趋势(尹燕亭等, 2012)。植被显著减少受气温影响的面积为373.5 km², 主要分布于多伦县、锡林浩特市、西乌珠穆沁旗。苏尼特左旗受到气温、降水的共同影响。

人类活动影响下植被显著减少的面积为949.75 km², 占全盟植被显著减少面积的24.73%。根据各驱动因素占比, 沙地扩张、城镇化对植被显著减少的影响较大, 其中, 沙地扩张的影响主要集中在苏尼特左旗东部, 苏尼特右旗有零星分布。城镇化影响植被显著减少的区域主要分布在锡林浩特市、东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗, 主要是工矿用地增加导致植被迅速减少。以锡林浩特市为例, 2000年工矿用地面积为47.38 km², 到2015年增长为73.20 km², 增长了54.5%, 且由于大部分区域未开展植被生态修复工程, 因此植被覆盖度较低, 植被显著减少。随着经济社会发展, 锡林郭勒人口密度和道路密度不断增加, 造成草地可利用面积减少, 进而引起植被NDVI降低, 与王云霞等(2015)研究结论一致。此外, 农田扩张对植被显著减少的影响较小。

在植被显著减少区域, 气候和人类活动共同影响的面积为579.75 km², 占植被显著减少区域面积的15.09%, 主要分布在西乌珠穆沁旗、锡林浩特市、

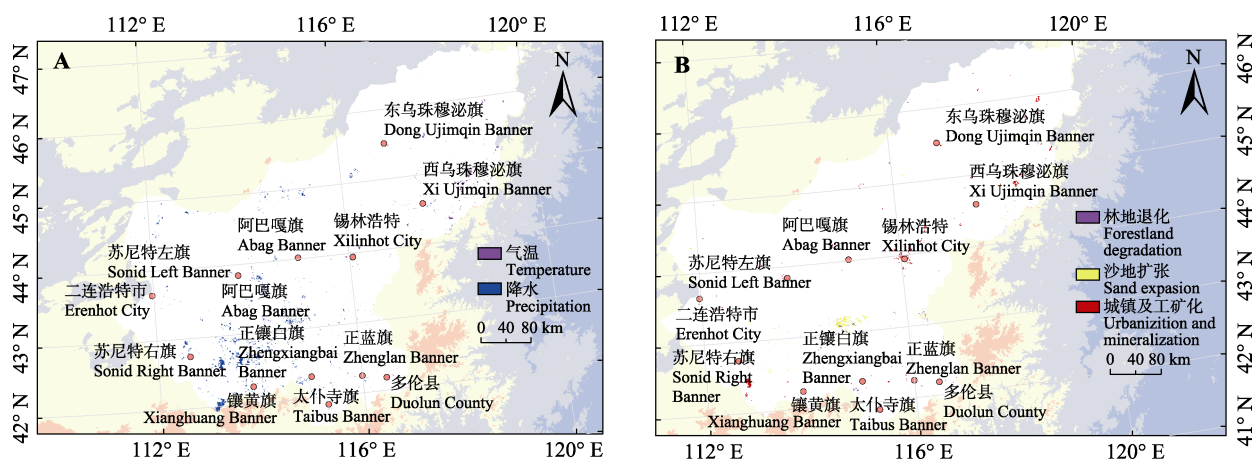


图7 植被归一化指数(NDVI)显著减少区域驱动因子空间分布。A, 气候因子。B, 人类活动因子。

Fig. 7 Spatial distribution of driving factors in region with significant decreased normalized differential vegetation index (NDVI). A, Climatic factors. B, Human activities.

苏尼特左旗等, 具体表现为降水和气温与林地退化、城镇化的耦合作用。

3 讨论和结论

锡林郭勒植被NDVI整体改善, 局部恶化。这与杭玉玲等(2014)、Li等(2012)的研究结论一致。锡林郭勒东北部的东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗植被NDVI在2000–2010年下降趋势最为明显, 在2010年之后逐步恢复; 锡林郭勒南部的农牧交错区植被NDVI与气象因子的相关系数并不高, 但多数像元的NDVI均显著增加, 究其原因, 太仆寺旗和多伦县是生态建设工程的重点实施区, 工程全面, 实施效果较好, 既改善了当地生态, 又优化了产业结构, 促进了经济发展(李兴华等, 2012; 缪丽娟等, 2013; 杭玉玲等, 2014)。

在植被显著增加区域, 人类活动的影响程度超过气候因素, 这也表明我国实施的禁牧/草畜平衡、退耕还林还草等诸多生态恢复工程具有积极效果, 如京津风沙源治理工程对工程区草地土壤碳汇具有极大的促进作用(卓莉等, 2007; 张良侠等, 2014; 周锡钦等, 2014)。在植被显著减少区域, 降水对植被NDVI的影响强度超过人类活动的局部影响, 是影响植被生长的最直接因素, 这与杭玉玲等(2014)的研究结论一致。而城镇化、工业用地增长加剧了这一进程。根据《锡林郭勒盟统计年鉴》, 锡林郭勒城镇化率不断提高, 由2000年的39.60%增长至2015年的63.87%; 2000、2010和2015年工矿用地面积分别为171.43 km²、289.17 km²、323.58 km², 2000–2010年增加117.74 km², 增长速率为68.68%; 2010–2015年增加34.41 km², 增长速率为11.90%, 可见, 矿山开发力度较大。此外, 过度放牧是植被退化的一个

重要推动因素。对比锡林郭勒植被NDVI与牲畜存栏数变化可知(图8), 牲畜存栏数减少, NDVI在一定程度上得以恢复, 这与王云霞等(2015)研究认为气候暖干化基础上的过度放牧导致退化草地占可利用草地的比例增加的结论一致, 因此, 控制放牧强度依然是提升植被NDVI的有效手段。

从不同植被类型来看, 近16年来草甸草原、典型草原和荒漠草原生长季NDVI均呈上升态势, 特别是荒漠草原植被好转趋势显著, 可能与该区实施的生态保护与恢复工程有关。从气候角度分析, 植被NDVI与气候因子(温度和降水)相关分析的显著性结果表明, 降水对植被的影响强度超过气温的影响, 是区域尺度上导致研究区植被变化的最直接原因。

研究虽取得了一些结果, 尚存在以下改进之处: (1)由于数据的可获得性, 并未引入放牧、地下水动态变化等变量, 后续研究可考虑引入相关数据; (2)研究方法较为简单, 需构建耦合系统动力学的植被动态变化模型, 详细分析其影响机制, 进一步明确各驱动因子贡献率的大小、影响程度和变化方向, 为区域生态保护与恢复提供技术支撑。

综合本文研究结果, 可得出以下结论:

(1)在空间尺度上, 植被NDVI呈现“东北高西南低”的分布格局, 西乌珠穆沁旗、东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、阿巴嘎旗、太仆寺旗和多伦县的植被覆盖增加趋势明显。

(2)在气候和人类活动的双重作用下, 植被NDVI表现出显著的空间异质性。2000–2015年, 锡林郭勒植被显著增加面积大约是显著减少面积的2倍, 且由于地理位置和气候条件的空间差异, 不同类型草原的植被NDVI响应气候变化的方式存在着显著的空间差异, 如荒漠草原对降水的响应最敏感,

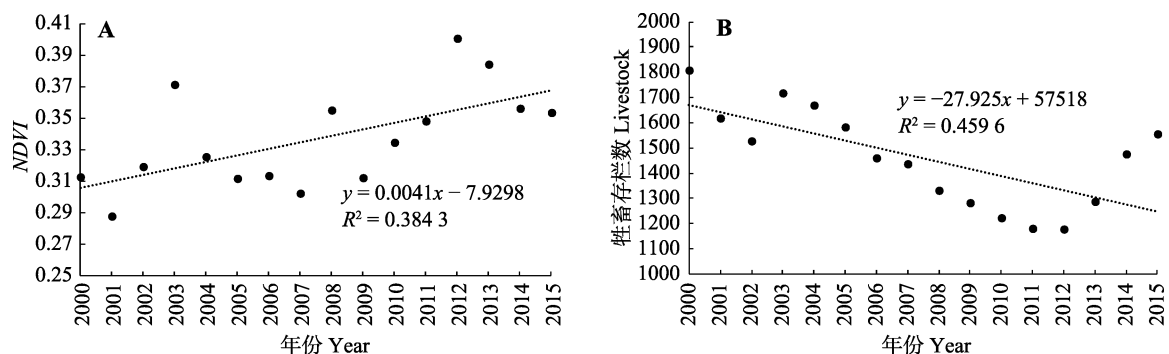


图8 锡林郭勒2000–2015年归一化植被指数(NDVI)(A)和牲畜存栏数(B)变化。

Fig. 8 Changes of vegetation normalized differential vegetation index (NDVI)(A) and livestock inventory (B) in Xilin Gol during 2000–2015.

草甸草原对气温的要求更高; 并且生态工程建设等人类活动具有正向促进作用, 在一定程度上促进了植被恢复, 改善了区域生态环境。

(3)在植被NDVI显著增加区域, 人类活动是主导驱动因素, 且以禁牧及草畜平衡政策影响最大, 占比69.55%, 主要分布在东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、阿巴嘎旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县等。此外, 人工造林在短时间内促进植被恢复, 对局地植被覆盖增加具有积极影响, 但干旱胁迫又对植被生长产生不利影响。气候因素占比47.79%, 且降水和气温影响比例相当。

(4)在植被NDVI显著减少区域, 气候是首要驱动因素, 且以降水影响为主, 以苏尼特左旗和苏尼特右旗尤为明显。人类活动占比24.73%, 以沙地扩张、城镇化为主, 部分区域工矿用地增加导致植被显著减少; 此外, 农田扩张对植被NDVI显著减少影响较小。

参考文献

- Bai JJ, Bai JT, Wang L (2014). Spatio-temporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000–2010. *Scientia Geographica Sinica*, 34, 882–888. [白建军, 白江涛, 王磊 (2014). 2000–2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系. 地理科学, 34, 882–888.]
- Chi DK, Wang H, Li XB, Xu KK, Yu F (2016). The variability of growing season of different vegetation types in Xilingol League. *Pratacultural Science*, 33, 1825–1834. [迟登凯, 王宏, 李晓兵, 许凯凯, 喻峰 (2016). 锡林郭勒盟不同类型植被的生长季变化. 草业科学, 33, 1825–1834.]
- Chuai XW, Huang XJ, Wang WJ, Bao G (2013). NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China. *International Journal of Climatology*, 33, 1696–1706.
- Fang JY, Piao SL, He JS (2003). Vegetation activities enhanced in the past 20 years in China. *Science in China: Series C*, 33, 554–565. [方精云, 朴世龙, 贺金生 (2003). 近20年来中国植被活动在增强. 中国科学: C辑, 33, 554–565.]
- Hang YL, Bao G, Bao YH, Burenjirigala, Altantuya D (2014). Spatio-temporal changes of vegetation coverage in Xilin Gol grassland and its responses to climate change during 2000–2010. *Acta Agrestia Sinica*, 22, 1194–1204. [杭玉玲, 包刚, 包玉海, 布仁吉日嘎拉, Altantuya Dorjsuren (2014). 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. 草地学报, 22, 1194–1204.]
- Jia RN, Du X, Li QZ, Wang HY (2016). Spatiotemporal characteristics of vegetation variation in Xilin Gol League in recent 15 years and its response to climate. *Science of Soil and Water Conservation*, 15(5), 47–56. [贾若楠, 杜鑫, 李强子, 王红岩 (2016). 近15年锡林郭勒盟植被变化时空特征及其对气候的响应. 中国水土保持科学, 15(5), 47–56.]
- Jiang Y, Bi XL, Huang JH, Bai YF (2010). Patterns and drivers of vegetation degradation in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1132–1141. [姜晔, 毕晓丽, 黄建辉, 白永飞 (2010). 内蒙古锡林河流域植被退化的格局及驱动力分析. 植物生态学报, 34, 1132–1141.]
- Li A, Wu JG, Huang JH (2012). Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of RESTREND in Inner Mongolia. *Landscape Ecology*, 27, 969–982.
- Li SJ, Li XB, Tan MH (2015). Impacts of rural-urban migration on vegetation cover in ecologically fragile areas: Taking Inner Mongolia as a case. *Acta Geographica Sinica*, 70, 1622–1631. [李仕冀, 李秀彬, 谈明洪 (2015). 乡村人口迁出对生态脆弱地区植被覆盖的影响: 以内蒙古自治区为例. 地理学报, 70, 1622–1631.]
- Li XG (2014). *Variations and Impact Factors of Vegetation Cover in Inner Mongolia Based on the MODIS-NDVI*. Master degree dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. [李晓光 (2014). 基于MODIS-NDVI的内蒙古植被覆盖变化及其驱动因子分析. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Li XH, Wei YR, Zhang CH (2012). Variation of grassland area and its cause in Inner Mongolia: A case study on Duolun County of Xinlin Gol League. *Pratacultural Science*, 29, 19–24. [李兴华, 魏玉荣, 张存厚 (2012). 内蒙古草地面积的变化及其成因分析: 以锡林郭勒盟多伦县为例. 草业科学, 29, 19–24.]
- Liang SH, Chen J, Jin XM, Wan L, Gong B (2007). Regularity of vegetation coverage changes in the Tibetan Plateau over the last 21 years. *Advances in Earth Science*, 22(1), 33–40. [梁四海, 陈江, 金晓媚, 万力, 龚斌 (2007). 近21年青藏高原植被覆盖变化规律. 地球科学进展, 22(1), 33–40.]
- Liu XF, Pan YZ, Zhu XF, Li SS (2015). Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors. *Acta Geographica Sinica*, 70, 705–716. [刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双 (2015). 2000–2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. 地理学报, 70, 705–716.]
- Luo L, Wang ZM, Song KS, Zhang B, Liu DW, Ren CY, Zhang SM (2009). Research on the correlation between NDVI and climatic factors of different vegetations in the Northeast China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 29, 800–808. [罗玲, 王宗明, 宋开山, 张柏, 刘殿伟, 任春颖, 张素梅 (2009). 1982–2003年中国东北地区不同类型植被NDVI与气候因子的关系研究. 西北植

- 物学报, 29, 800–808.]
- Miao LJ, Xu X, Lan YF, Cui XF (2013). Assessing grain-for-green impact on human environment in the farming-pastoral zone of Taipusiqi. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 49(1), 46–50. [缪丽娟, 徐霞, 兰玉芳, 崔雪锋 (2013). 退牧还林(草)工程对中国北方农牧交错带人文环境影响评价: 以太仆寺旗为例. 北京师范大学学报, 49(1), 46–50.]
- Mu SJ, Li JL, Chen YZ, Gang CC, Zhou W, Ju WM (2012). Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001–2010. *Acta Geographica Sinica*, 67, 1255–1268. [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民 (2012). 2001–2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 67, 1255–1268.]
- Mu SJ, Zhou SX, Chen YZ, Li JL, Ju WM, Odeh IOA (2013). Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland. *Global and Planetary Change*, 108, 29–41.
- Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard JM, Tucker CJ, Stenseth NC (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503–510.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Guo QH (2003). Inter annual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geographical Research*, 108, 4401. DOI: 10.1029/2002jd002848.
- Shen XJ, Wu ZF, Du HB (2013). Variation of vegetation in the Northeast China and its response to meteorological factors. *Journal of Northeast University (Natural Science Edition)*, 45(1), 123–130. [神祥金, 吴正方, 杜海波 (2013). 东北地区植被NDVI变化及对气象因子的响应. 东北师大学报(自然科学版), 45(1), 123–130.]
- Sun XL, Liu PT, Li P (2014). The dynamic state of the NDVI index in Xilinguole grassland during 1982–2010. *Chinese Journal of Grassland*, 36(6), 23–28. [孙小龙, 刘朋涛, 李平 (2014). 近三十年来锡林郭勒草原植被NDVI指数动态分析. 中国草地学报, 36(6), 23–28.]
- Sun YL, Guo P, Yan XD, Zhao TB (2010). Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 25, 407–414. [孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 赵天宝 (2010). 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, 25, 407–414.]
- Wang YX, Xiu CB, Cao JM (2015). The role of climatic factors and overgrazing in grassland degradation in Inner Mongolia pastoral area. *Journal of Agrotechnical Economics*, (8), 112–117. [王云霞, 修长柏, 曹建民 (2015). 气候因子与过度放牧在内蒙古牧区草地退化演变中的作用. 农业技术经济, (8), 112–117.]
- Wang Z, Yan WD, Liu SG, Liang XC (2016). Spatiotemporal change of vegetation cover in Hunan Province during 2001–2013. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 36(11), 41–45. [王震, 闫文德, 刘曙光, 梁小翠 (2016). 基于MODIS数据的湖南省2001–2013年植被覆盖指数时空变化研究. 中南林业科技大学学报, 36(11), 41–45.]
- Wang ZY, Xu DY, Yang H, Ding X, Li DJ (2017). Impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in Inner Mongolia, 1981–2010. *Progress in Geography*, 36, 1025–1032. [王子玉, 许端阳, 杨华, 丁雪, 李达净 (2017). 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. 地理科学进展, 36, 1025–1032.]
- Wardlaw BD, Egbert SL (2008). Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1096–1116.
- Xing Q, Liu AJ, Liu YZ (2005). Study on change rangeland vegetation, change using MODIS-NDVI in Xilinguole grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 13(supple), 15–20. [邢旗, 刘爱军, 刘永志 (2005). 应用MODIS-NDVI对草原植被变化监测研究: 以锡林郭勒盟为例. 草地学报, 13(增刊), 15–20.]
- Yang Q, Wang TT, Chen H (2015). Characteristics of vegetation cover change in Xilin Gol League based on MODIS EVI data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31, 191–198. [杨强, 王婷婷, 陈昊 (2015). 基于MODIS EVI数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征. 农业工程学报, 31, 191–198.]
- Yin YT, Hou XY, Ding Y, Han Y (2012). Response of animal husbandry to climate change in desert steppe: A case of Suniteyou Banner, Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(8), 153–159. [尹燕亭, 侯向阳, 丁勇, 韩颖 (2012). 荒漠草原区畜牧业对气候变化的响应研究: 以内蒙古苏尼特右旗为例. 干旱区资源与环境, 26(8), 153–159.]
- Yu GM (2011). *Ecological System Spatio-temporal Changes and Driving Mechanism of Xilin Gol City*. Master degree dissertation, Shandong Normal University, Jinan. [于国茂 (2011). 锡林郭勒盟生态系统时空变化及其驱动机制. 硕士学位论文, 山东师范大学, 济南.]
- Yuan LH, Jiang WG, Shen WM, Liu YH, Wang WJ, Tao LL, Zheng H, Liu XF (2013). The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7798–7806. [袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富 (2013). 2000–2010年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 33, 7798–7806.]
- Zhang LX, Fan JW, Zhang WY, Tang FP (2014). Impact of the Beijing and Tianjin Sand Source Control Project on the grassland soil organic carbon storage: A case study of Xilingol League, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal*

of *Applied Ecology*, 25, 374–380. [张良侠, 樊江文, 张文彦, 唐风沛 (2014). 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响: 以内蒙古锡林郭勒盟为例. *应用生态学报*, 25, 374–380.]

Zhao ZW, Zhang LP, Li X, Wang YX, Wang SL (2017). Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data. *Progress in Geography*, 36, 741–752. [赵卓文, 张连蓬, 李行, 王永香, 王胜利 (2017). 基于MOD13Q1数据的宁夏生长季植被动态监测. *地理科学进展*, 36, 741–752.]

Zhou XY, Shi HD, Wang XR (2014). Impact of climate change and human activities on vegetation coverage in the Mon-

golian Plateau. *Arid Zone Research*, 31, 604–610. [周锡饮, 师华定, 王秀茹 (2014). 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*, 31, 604–610.]

Zhuo L, Cao X, Chen J, Chen ZX, Shi PJ (2007). Assessment of grassland ecological restoration project in XilinGol grassland. *Acta Geographica Sinica*, 62, 471–480. [卓莉, 曹鑫, 陈晋, 陈仲新, 史培军 (2007). 锡林郭勒草原生态恢复工程效果的评价. *地理学报*, 62, 471–480.]

责任编辑: 梁存柱 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答