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

焦全军[1]，付安民[2]，张 肖[1]，孙 涛[2]，张 苏[1]
(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室，北京 100094;
2. 国家林业局调查规划设计院，北京 100714)

摘 要: 防治荒漠化管理往往需要掌握人类因素对植被生长动态影响的关键数据，气候变化背景下的干旱半干旱地区草原植被覆盖多属于缓慢量变，这种变化很难通过土地利用/覆盖类型的转换来分析. 旨在掌握2001—2014年内蒙古锡林郭勒草原植被覆盖变化时空特征，定量掌握关键区域气候因子与植被的动态关联关系，进而分离和评估气候和人类因素对区域植被覆盖变化的贡献. 结果表明: 研究区植被覆盖2001—2014年总体呈增加趋势，年内最大的归一化植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)每年增幅为0.001 8; 气温和降水对锡林郭勒草原植被变化均有显著作用，两者共同驱动的NDVI预测模型决定系数(R^2 = 0.65)大于气温(R^2 = 0.46)或降水(R^2 = 0.54)单要素驱动的结果; 气候和人类因素对区域植被覆盖增长总体均呈现积极的作用，人类因素特别是生态治理保护措施对草原植被覆盖的贡献远大于气候因素变化. 耦合遥感数据的植被变化驱动力分析方法，有助于提高干旱半干旱地区人地相互作用的定量评估能力，为防治荒漠化工作提供重要科学数据支撑.

关键词: 植被变化; 基于NDVI的残差趋势法RESTREND; 气候变化; 人类活动; 归一化植被指数
中图分类号: U 461; TP 308 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254 - 0037(2017)05 - 0659 - 06
doi: 10.11936/bjutxb2016100013

Driving Factors of Vegetation Changes in Xilingol Grassland Based on MODIS Data

JIAO Quanjun[1], FU Anmin[2], ZHANG Xiao[1], SUN Tao[2], ZHANG Su[1]
(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, Beijing 100714, China)

Abstract: Assessment of vegetation change and its causes in arid and semiarid regions are important for ecosystem protection project management. However, slow changes of vegetation coverage in arid and semiarid regions are difficult to explain through land use/cover type changes. Aimed to analyze the sensitivity of climate driving factors on vegetation changes, the human-induced and climate-driven vegetation changes in the Xilingol Grassland, Inner Mongolia from 2001 to 2014 were distinguished. Results show that vegetation coverage in the study area from 2001 to 2014 has an increasing trend, and the annual maximum normalized difference vegetation index (NDVI) is 0.001 8. The decision coefficient (R^2) of the vegetation index prediction model constructed by temperature and precipitation factors is 0.65, better than the results only using temperature factor (R^2 = 0.46) or precipitation factor (R^2 = 0.54). The contribution of human factors to the increase in vegetation cover is much greater than that of climate factors. The RESTREND method is a useful tool to improve the assessment of human-induced

收稿日期: 2016-10-10
基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目(201204202); 国家科技支撑计划课题(2013BAC03B02)
作者简介: 焦全军(1981—)，男，副研究员，主要从事植被遥感方法及应用方面的研究，E-mail: jiaoqj@radi.ac.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

vegetation changes in arid and semiarid regions, and can provide scientific data support for the prevention and control of desertification work.

Key words: vegetation dynamics; RESTREND; climate change; human activity; normalized difference vegetation index (NDVI)

植被在防风固沙、保持水土及涵养水源等方面发挥着不可替代的生态功能. 气候变化和人类活动不可避免地对植被生态系统造成了各种影响. 遥感是开展大尺度植被变化监测研究的重要手段,其中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)是最常用于表征植被覆盖状况的遥感指标[1-2]. NOAA 极轨卫星提供了全球覆盖、时间序列最长的多光谱卫星数据,常被用于植被覆盖变化的监测,如基于 NOAA NDVI 数据开展的 1982—1999 年中国范围内的植被变化特征分析[3],北方草地变化及其与气候变化的关系分析[4]. 尽管不少研究人员都开展了植被变化与气候因素[3-4]、土地利用[5]的动态关联分析,但定量分解草原植被变化的气候和人类活动因素的贡献仍比较困难. 一种基于降水驱动的 NDVI 残差趋势法(RESTREND)在 2004 年被提出[6],用以分离和评估气候与人类活动因素对草原植被覆盖变化的贡献. RESTREND 方法的原理可靠、操作简单,得到了广泛的应用[7-11]. 同时,该方法多强调了降水的主导影响,这在干旱半干旱区植被变化分析中存在不足. 气温的升高造成土壤水分蒸发及植物蒸腾作用的加强,在干旱半干旱区易导致植被出现干旱胁迫,因此,气温应是干旱半干旱区植被覆盖变化分析中不可忽略的因素[4,7]. 另外,目前该方法主要用于全球及大区域植被退化的研究[12],对大规模人为生态工程建设区域的应用分析较少.

锡林郭勒草原属于中温带半干旱大陆性气候,水资源紧缺、生态脆弱,对气候变化作用敏感,是京津北方风沙的主要来源地,近年来该区域内的生态治理建设得到越来越多的重视,如 2000 年后开展的京津风沙源治理工程,实行了控制载畜量以及退耕还林还草等多项长效举措[13]. 定量区分人为和气候因素对植被覆盖变化的各自贡献,是准确、客观地评价生态工程效果的关键所在,有助于生态治理保护工作的管理和改进. 文献[7,14]利用 NOAA NDVI 数据通过 RESTREND 方法分析了锡林郭勒草原 20 世纪末近 20 年的植被覆盖变化. 然而,该区域 21 世纪初启动京津风沙源生态工程以来的研究则相对缺乏. 同时,由于 2000 年后新出现的 MODIS NDVI 数据被认为较 NOAA 数据的定量化精度更高[15],本研究利用 2001—2014 年 MODIS NDVI 时间序列数据,在 RESTREND 方法基础上,融合降水和气温因子,评估区域内气候和人类因素对锡林郭勒草原植被覆盖变化的贡献.

1 数据与方法

1.1 研究区及数据获取

研究区锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中部,包括锡林郭勒盟内的 7 个旗市,如图 1 所示,经纬度分别为 42°~47°N、111°~120°E. 年平均气温 -2~2 ℃,平均降雨量 295 mm,由东南向西北递减,且主要集中在 7—9 月. 研究区植被覆盖以典型草原、荒漠草原为主.

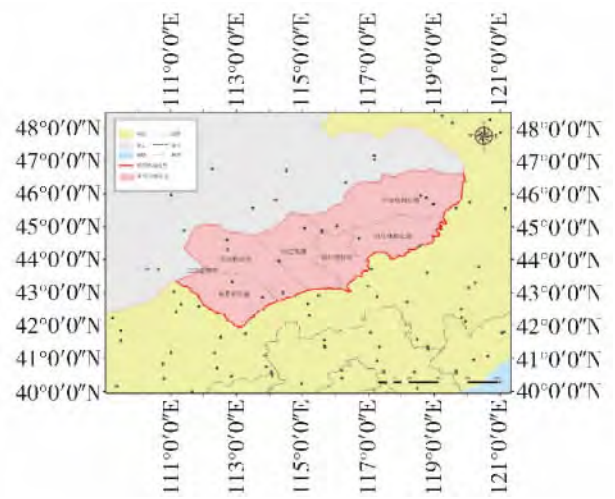


图 1 研究区及气象站点示意图

Fig. 1 Study area and climate site

对 2001—2014 年 MODIS 数据进行拼接、镶嵌,形成研究区的 MODIS NDVI 时间序列数据. 年内最大 NDVI 是表征某年植被覆盖状况的关键参数[7]. 根据 MODIS 云标示信息,从某一年内有效的 NDVI 序列数据中提取每一个像元的最大 NDVI 值,得到年内最大 NDVI(设为 $NDVI_{max}$),并实现 MODIS 去云效果,构建了 2001—2014 年的 MODIS $NDVI_{max}$ 时间序列.

研究区及邻近区域 2001—2014 年的逐旬气温和降水量资料来源于中国国家气象局以及蒙古国共

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

享的气象站点，并基于经纬度和 DEM 回归的方法进行温度插值，对降雨数据进行 Q_Kriging 插值. 有研究[7]分析发现该区域夏季 6—8 月降水和气温与 $NDVI_{max}$ 关系敏感. 本文将 6—8 月的日均气温取平均值即得夏季平均气温；将 6—8 月的降水量累加即得夏季累积降水指标.

1.2　RESTREND 方法

基于 NDVI 的残差趋势法(RESTREND)主要是在长时间序列的 NDVI 中剔除气候的影响来分析人为因素所导致的土地覆盖变化. 因此，利用长时间序列植被指数进行植被变化监测主要分为以下 2 步：1) 由长时间序列的 NDVI 构建回归分析模型，从而分析气候因素对植被的影响；2) 结合实测 NDVI 与第 1 步基于气候因子估测的 NDVI，得到 NDVI 的残差项，结合这些残差项构建时间序列回归模型，用于表征人类活动因素对植被覆盖变化的贡献[8].

由于干旱与半干旱区草原植被生长可能受到气温和降水的共同影响，因此本研究将采用气温和降水共同作用的回归分析模型来预测 $NDVI_{max}$. 根据地面调查资料选择人类活动强度低的草原区域像元作为训练，根据气候因子和 MODIS $NDVI_{max}$ 时间序列构建回归分析模型，分析降水和气温 2 个气候因子对 $NDVI_{max}$ 的综合影响，预测方程为

$$NDVI_{max,sim} = \lambda_1 P + \lambda_2 T + b \quad (1)$$

式中：P 为 6—8 月累积降水量；T 为 6—8 月平均气温；λ_1 为降水量对应的多项式的系数；λ_2 为气温对应的多项式的系数.

为消除气候因素的影响，将实测 $NDVI_{max}$ 与气候因子估测的 $NDVI_{max,sim}$ 进行相减得到 $NDVI_{max}$ 残差结果 ε，即

$$\varepsilon = NDVI_{max} - NDVI_{max,sim} \quad (2)$$

式中：$NDVI_{max}$ 为实际计算或观测得到的年内最大植被指数；$NDVI_{max,sim}$ 为气候因子回归模型得到的年内最大植被指数预测值.

对多年的残差结果 ε 进行关于年份 t 的回归分析进行人类因素贡献的趋势分析，建立线性回归方程

$$\varepsilon = at + b \quad (3)$$

如果平均年度变化速率(即回归方程的斜率) $a>0$，则多年来人类活动对于植被覆盖有正面影响，若 $a<0$，则多年来人类活动对于植被覆盖有负面影响. 气候因子预测 $NDVI_{max}$ 存在的误差将带入 $NDVI_{max}$ 残差结果 ε，通过对 ε 时间序列的回归方程斜率分析，有助于减弱气候贡献预测带来的系统误差影响.

2　结果与分析

2.1　MODIS NDVI 时序变化分析

研究区范围内 2001—2014 年，MODIS $NDVI_{max}$ 变化速率专题图结果如图 2 所示. 锡林郭勒草原 2001—2014 年植被覆盖总体呈增加趋势，但 NDVI 变化呈现明显的空间异质性，中部(南北走向)区域有较为明显的植被增加趋势；研究区西部的大部分地区显示植被覆盖的增幅不明显；研究区东部的大部分地区显示为植被覆盖减少趋势. 经统计，锡林郭勒草原 2001—2014 年平均每年 $NDVI_{max}$ 数值增加 0.0018，有 48.12% 的草原区域植被覆盖有明显增加，然而还有 16.7% 的草原呈现植被覆盖降低的趋势.

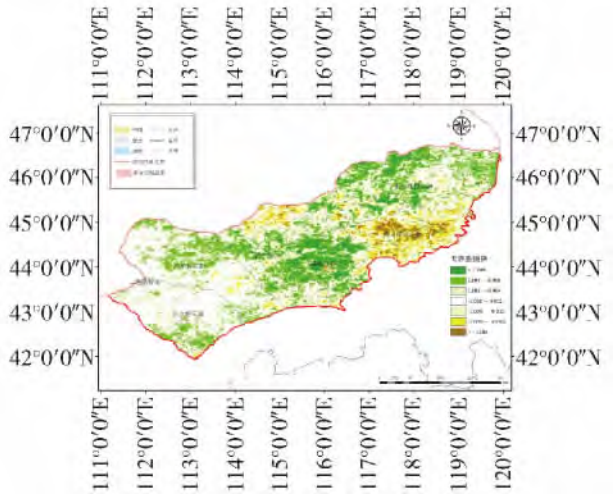


图 2　研究区 2001—2014 年 NDVI 变化速率

Fig. 2　NDVI annual increase in the study area from 2001 to 2014

2.2　气候因子驱动的 NDVI 预测模型结果

气候因子和植被指数回归分析的结果如图 3 所示. 该区域草地年内最大植被指数与夏季降水之间存在较为明显的正相关，其决定系数(R^2)为 0.54. 草原 NDVI 与夏季气温呈负相关，R^2 为 0.46，其敏感程度低于降水与 NDVI 之间的关系. 当研究区夏季降水和气温共同作用时，预测气候因子驱动的某年 $NDVI_{max}$ 值，预测结果明显好于单独使用降水或气温所得的 $NDVI_{max}$ 预测结果，实际的 $NDVI_{max}$ 数据与气候因子预测 $NDVI_{max}$ 数据回归的 R^2 达到 0.65. 因此，综合利用降水和气温作为气候因子驱动的草原 NDVI 预测模型，优于单一气候因子驱动的方法，能

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

够获得较高的 $NDVI_{max}$ 估测精度.

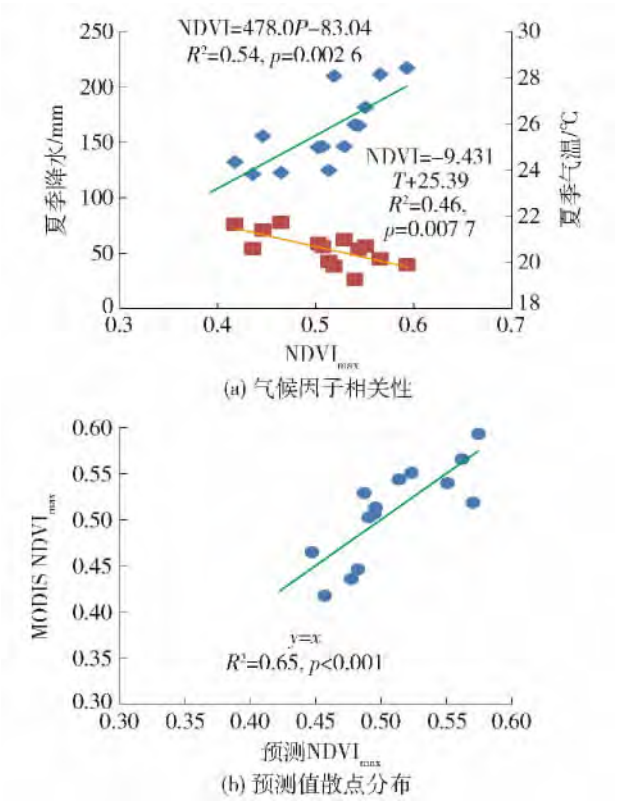


图 3 2001—2014 年研究区草地 NDVI 与气候因子相关性及预测值散点分布

Fig. 3 Regressions between NDVI and climate factors and scatter plotand NDVI predicted values in the study area from 2001 to 2014

2.3 气候和人类活动影响分离分析

研究区 2001—2014 年气候因素和人类因素贡献的 NDVI 变化速率如图 4 所示. 从气候因子预测的 $NDVI_{max}$ 变化速率结果看,气候因子对研究区植被覆盖增加的贡献总体呈弱的正效应,降水和气温因子导致研究区 2001—2014 年每年增加 $NDVI_{max}$ 值为 0.000 4. 空间分布差异方面,研究区气候因子对植被覆盖增加的贡献从东南部到西北部由负效应转为正效应、再转为负效应的现象. 这说明,气候因子对于本区域的不同地区作用是不同的,本文采用的分离气候因素和人类活动对植被变化贡献的方法是必要的.

从表征人类活动影响效果的 $NDVI_{max}$ 残差变化速率结果上看,研究区中部区域东北—西北走廊上人类活动因子对植被 $NDVI_{max}$ 增加的贡献成正效应,而在西部区域则存在明显的负效应. 经统计,研究区人类活动促使植被 $NDVI_{max}$ 平均每年增加 0.001 4,人类活动变化对植被覆盖增加起到正效应的区域占总面积的 47.03%,远大于人类活动对植被覆盖增加呈负效应的区域面积(占总面积的 20.09%).

对比区域内各旗市 $NDVI_{max}$ 变化及贡献分离结果,锡林浩特市的植被覆盖增加明显,该区域的人类活动对植被覆盖增加起到主要作用,气候因素也起到一定的贡献,同样的情况出现在东乌珠穆沁旗、阿巴嘎旗、苏尼特右旗,而西乌珠穆沁旗出现了较大幅度的 $NDVI_{max}$ 数值减少; 尽管二连浩特、苏尼特左旗的气候因素变化对植被覆盖增加起到负作用,但结果显示人类活动对植被覆盖增加起到积极效果,从而扭转了气候因素带来的不利影响,促使这些区域

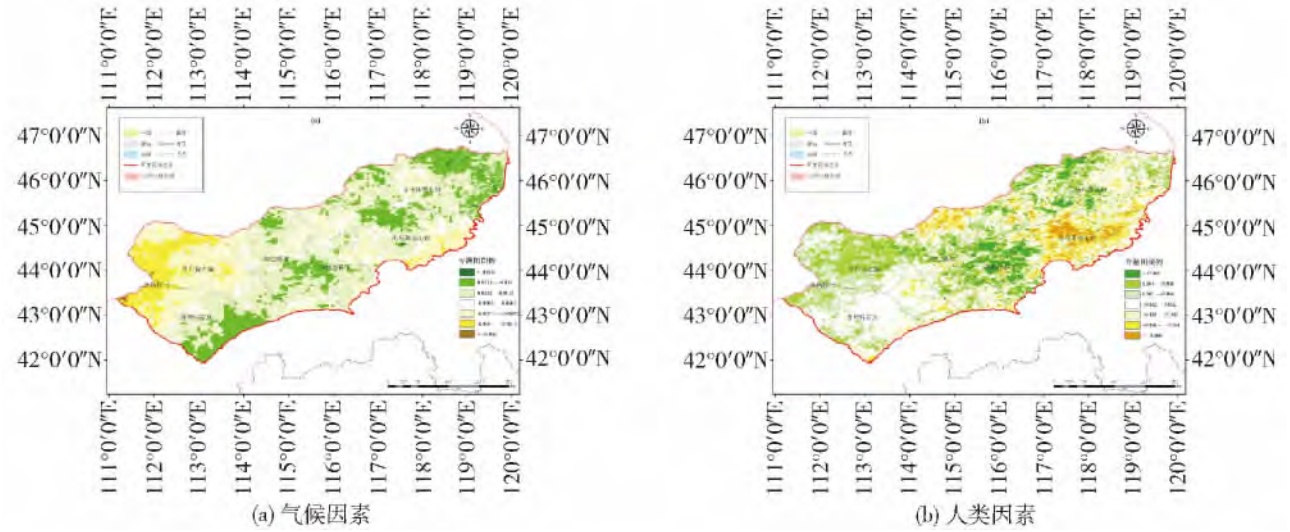


图 4 研究区 2001—2014 年气候因素和人类因素贡献的 NDVI 变化速率

Fig. 4 NDVI annual increase redced by climate factor and human factor in the study area from 2001 to 2014

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的植被覆盖指标 $NDVI_{max}$ 实现增加.

2.4　讨论

文献[14]发现锡林郭勒草原的各旗市在 20 世纪 80 年代到 90 年代都出现了较为严重的人类活动影响加剧的草原退化的现象，并认为放牧强度的持续增加是造成草原退化的重要因素. 文献[7]发现 2001—2006 年该区域植被覆盖已开始增加，本文的研究结果与该研究一致，并明确了自 2006 年起近 10 年来锡林郭勒草原植被覆盖呈现了持续增加的趋势.

通过气候和人类活动因素的贡献分析，该区域 2001 年以来的植被覆盖增加是气候因素和人类活动共同促进的，其中人类活动的生态治理保护作用占据了主要的贡献. 控制载畜量是 21 世纪初启动的生态治理工程的重要举措. 收集了 2001—2014 年研究区域 6 月末的总羊头数的统计数据如图 5 所示. 发现总羊头数平均每年减少约 40 万头，这说明锡林郭勒草原在 2001 年后草原放牧压力得到持续缓解，从而有助于干旱半干旱草原的恢复. 目前在当地的生态恢复试验同样印证了控制载畜量、围封割草等措施的有效性[16]，与本文的评估结果都表明生态治理工程能够促进草地恢复、改善当地的生态状况.

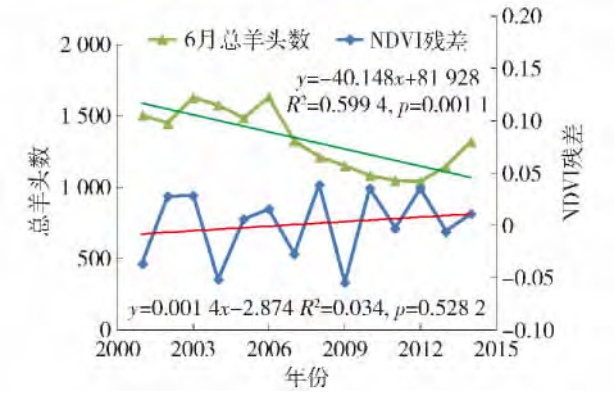


图 5　锡林郭勒盟总羊头数与人类因素贡献的研究区 NDVI 变化

Fig. 5　Changes in the stocking rate and human induced NDVI changes in the Xilingol Grassland

3　结论

本研究基于 MODIS 卫星观测地表的 NDVI 时间序列数据开展 2001—2014 年间锡林郭勒草原植被动态遥感监测，通过分析区域内 NDVI 变化对气候驱动因子的敏感性，最终分离和评估气候和人类活动因素对区域植被覆盖变化的贡献.

1）整体研究区植被覆盖总体呈增加趋势，每年最大 $NDVI_{max}$ 增幅为 0.001 8；植被指数变化趋势具有较强的空间异质性，中部区域植被覆盖普遍增加，西乌珠穆沁旗等东部区域则存在植被退化，西部区域的植被覆盖增幅不明显.

2）降水和气温均对 2001—2014 年间锡林郭勒草原植被覆盖变化的作用明显，降水对草原植被变化的敏感程度略高于气温，综合利用降水和气温作为驱动因子开展的 $NDVI_{max}$ 残差分析，能够提高干旱半干旱地区人地相互作用的定量化评估能力.

3）气候和人类活动对植被变化贡献的分离结果显示，研究区人类因素特别是生态治理和保护对植被覆盖增加的贡献远大于气候因子. 鉴于气候变化的缓慢性，研究建议应继续发挥主观能动性，持续加强生态治理工程建设，这是该区域保障社会经济和生态文明持续发展的有效手段.

参考文献：

[1] LEE R, YU F, PRICE K P, et al. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time series analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(12): 2505-2512.

[2] 童晓伟，王克林，岳跃民，等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应 [J]. 生态学报，2014，34(12)：3425-3434.
TONG X W, WANG K L, YUE Y M, et al. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3425-3434. (in Chinese)

[3] 朴世龙，方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化 [J]. 第四纪研究，2001，21(4)：294-302.
PIAO S L, FANG J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 294-302. (in Chinese)

[4] 辛晓平，张保辉，李刚，等. 1982—2003 年中国草地生物量时空格局变化研究 [J]. 自然资源学报，2009，24(9)：1582-1592.
XIN X P, ZHANG B H, LI G, et al. Variation in spatial pattern of grassland biomass in China from 1982 to 2003 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1582-1592. (in Chinese)

[5] 高志强，刘纪远. 基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究 [J]. 气候与环境研究，2000，5(2)：155-164.
GAO Z Q, LIU J Y. The study on driving factors and models of NDVI change based on remote sensing and GIS

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

in China [J]. Climatic & Environmental Research, 2000, 5(2): 155-164. (in Chinese)

[6] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.

[7] LI A, WU J, HUANG J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of restrend in inner mongolia [J]. Landscape Ecology, 2012, 27(7): 969-982.

[8] CAI H, YANG X, XU X. 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.

[9] 张卓，孙建国，汪秀泽，等. 2000—2013 年甘南州植被覆盖变化的驱动力研究 [J]. 遥感信息，2015，6：89-95.
ZHANG Z, SUN J G. WANG X Z, et al. Driving forces of vegetation cover change in gannan prefecture from 2000 to 2013 [J]. Remote Sensing Information, 2015, 6: 89-95. (in Chinese)

[10] HIGGINBOTTOM T, SYMEONAKIS E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions [J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 481-493.

[11] IBRAHIM Y, BALZTER H, KADUK J, et al. Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012 [J]. Remote Sensing, 2015, 7(5): 5471-5494.

[12] WESSELS K J, BERGH F V D, SCHOLES R J. Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 125: 10-22.

[13] 李明志，张学培. 实施京津风沙源治理工程的问题及对策 [J]. 北京林业大学学报(社会科学版)，2004，3(3)：76-79.
LI M Z, ZHANG X P. Problems and countermeasures in implementing sandstorm source control project in and around Beijing and Tianjin [J]. Journal of Beijing Forestry Unversity (Social Science Edition), 2004, 3(3): 76-79. (in Chinese)

[14] 曹鑫，辜智慧，陈晋，等. 基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析 [J]. 植物生态学报，2006，30(2)：268-277.
CAO X, GU Z H, CHEN J, et al. Analysis of human-induced steppe degradation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2): 268-277. (in Chinese)

[15] 陈燕丽，龙步菊，潘学标，等. 基于 MODIS NDVI 和气候信息的草原植被变化监测 [J]. 应用气象学报，2010，21(2)：229-236.
CHEN Y L, LONG B J, PAN X B, et. al. Grassland vegetation change based on MODIS NDVI data and climate information [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(2): 229-236. (in Chinese)

[16] 左万庆，王玉辉，王风玉，等. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究 [J]. 草业学报，2009，18(3)：12-19.
ZUO W Q, WANG Y H, WANG F Y, et al. Effects of enclosure on the community characteristics of Leymus chinensis in degenerated steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(3): 12-19. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net