2001—2016 年毛乌素沙地植被的生长状况

曹艳萍[1,2]，庞营军[3]，贾晓红[3]

(1. 河南大学 环境与规划学院，河南 开封 475004；2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室，河南 开封 475004；3. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所，北京 100091)

摘　要：[目的] 对 2001—2016 年毛乌素沙地植被生长状况进行研究，为该区域生态系统的可持续发展提供理论支持。[方法] 基于 MODIS EVI 植被指数分析 2001—2016 年毛乌素沙地生长季和非生长季的植被生长状况，并讨论植被生长与气候变化、人类活动的关系。[结果] ①毛乌素沙地植被覆盖度偏低，南部植被覆盖度明显高于北部区域。②毛乌素沙地 2001—2016 年植被覆盖度好转趋势明显。③生长季，毛乌素沙地南部和东部地区植被覆盖度变化速率大于中部和北部地区；且南部和东部的植被覆盖度部分呈显著增加，部分呈显著减小趋势。非生长季，南部地区植被覆盖度以显著增加为主。④毛乌素沙地 EVI 年最大值与降水呈正相关，与气温呈弱负相关；EVI 年最小值与降水呈强正相关，与气温呈弱正相关。⑤农作物种植面积的增加、大规模人工造林以及大牲畜规模的控制等人类活动有助于植被覆盖度的提高。[结论] 受气候因素和人类活动影响，21 世纪以来毛乌素沙地植被生长状况好转。

关键词：毛乌素沙地；植被；气候变化；人类活动

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)02-0029-09　　**中图分类号**：Q948，TP79

文献参数：曹艳萍，庞营军，贾晓红. 2001—2016 年毛乌素沙地植被的生长状况[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：29-37. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 02. 005；Cao Yanping，Pang Yingjun，Jia Xiaohong. Vegetation growth in Mu Us sandy land from 2001 to 2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：29-37.

Vegetation Growth in Mu Us Sandy Land from 2001 to 2016

Cao Yanping[1,2]，Pang Yingjun[3]，Jia Xiaohong[3]

(1. *The College of Environment and Planning of He'nan University*，*Kaifeng*，*He'nan* 475004，*China*；2. *Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Region*，*Kaifeng*，*He'nan* 475004，*China*；3. *Institute of Desertification Studies Chinese Academy of Forestry*，*Beijing* 100091，*China*)

Abstract：[Objective] In order to provide theoretical support for the sustainable development of ecosystems in the Mu Us sandy land，the research on the vegetation growth status in this region from 2001 to 2016 was carried out. [Methods] Based on MODIS EVI vegetation index，we analyzed the vegetation growth status of the growth season and non-growth season in Mu Us sandy land during 2001—2016. The relationship between vegetation and climate change，human activities was discussed. [Results] ① Vegetation coverage in Mu Us sandy land was relatively low. The vegetation coverage in the southern area was significantly higher than that in the northern region. ② The vegetation coverage in Mu Us sandy land showed an obvious improvement during 2001—2016. ③ In the growing season，the rate of vegetation coverage change in the southern and eastern regions was higher than that in the central and northern regions. Vegetation coverage in the southern and eastern region displayed a significant increase，and some showed a significant decrease. In the non-growth season，vegetation coverage in the southern region was mainly increased. ④ The annual maximum value of EVI in Mu Us sandy land was positively correlated with precipitation and weakly negatively correlated with temperature. The annual minimum value of EVI was strongly positively correlated with precipitation，and weakly positively correlated with temperature. ⑤ Human activities such as the increase of crop acreage，large-scale afforestation projects，and the control of large livestock numbers all contribute to the improvement of

收稿日期：2018-07-22　　**修回日期**：2018-09-29

资助项目：国家重点研发计划课题“京津冀风沙源区土地沙化形成机制与生态修复机理”(2016YFC0500801)；国家自然科学基金项目(41701010；41701503)

第一作者：曹艳萍(1986—)，女(汉族)，河南省封丘县人，博士，讲师，主要从事植被遥感方面的研究。E-mail：caoyp@henu. edu. cn。

通讯作者：庞营军(1984—)，男(汉族)，河北省邯郸市人，博士，助理研究员，主要从事荒漠化过程与机理方面的研究。E-mail：pangyingjun@caf. ac. cn。

vegetation coverage. [Conclusion] Due to climatic factors and human activities, the vegetation growth of Mu Us sandy land had improved since the 21st century.

Keywords: Mu Us sandy land; vegetation; climate change; human activity

植被生长状况是自然和人类活动交互作用的结果,尤其是人类活动影响日益剧烈的今天,植被变化深刻记录了人类活动的烙印。国内外相关领域学者已从不同角度探讨了植被对气候变化、土地利用及植被建设等人类活动的响应[1-6]。已有研究发现中国不同区域植被生长状态不同,驱动因素不同。整个中国,生长季的植被变化与气温变化一致;区域尺度,生长季植被变化与降水相关[7]。中国蒙古高原的植被覆盖在 1998—2012 年先退化后好转;荒漠和草原植被的 NDVI 与降水呈正相关关系,与气温呈负相关[8]。受降水量和气温上升影响,新疆植被覆盖好转[9];大量施肥、灌溉面积增加等生产活动提高了农田植被覆盖,而载畜量的增加则降低了该区域部分草地的 NDVI[10];华北平原植被覆盖呈上升趋势,与年降水量的偏相关性高于其与年气温的偏相关性[11];岷江上游流域低植被覆盖区受坡度影响显著,而极高度植被覆盖区受海拔高度影响显著[12]。

毛乌素沙地是我国四大沙地之一,该区域位于中国北方半干旱区的农牧交错带,处于森林—草原—荒漠的生态应力带上,是我国重要的生态屏障区,其生态环境具有较强的敏感性和脆弱性[13]。近年来,随着全球气候变化和人类活动的不断加剧,该地区植被覆盖随之发生变化[13]。深入研究 21 世纪以来毛乌素沙地的植被生长状况,对于客观评价中国农牧交错带的荒漠化治理效果,及时制定对应措施具有重要意义。闫峰等[13]利用 MODIS EVI 数据分析了 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况,发现该区域 EVI 指数在研究时段按 0.002 5/a 的速度递增。刘静等[14]利用 NDVI 和像元分解模型建立毛乌素沙地植被覆盖度遥感定量模型,发现该区域植被覆盖状态整体呈好转趋势,局部区域在退化。

在气候变化和人类活动双重作用下,植被在不同时段呈现不同变化特征,需要时时关注毛乌素沙地植被生长状况。本文采用 MODIS EVI 数据,探讨 2001—2016 年的毛乌素沙地生长季和非生长季的植被时空变化,在此基础上探讨气候变化和人类活动对植被变化的影响,以期为该区域生态系统的可持续发展提供理论支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于北纬 37°27.5′—39°22.5′,东经 107°20′—111°30′之间,包括内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部,陕西省榆林市的北部以及宁夏回族自治区盐池县的东北部,总面积近 4.00×10^4 km^2,约占中国沙漠沙地总面积的 3.6%[15]。地处中纬度西风带,全年大部分时间为西北季风控制,气候寒冷干燥,具有明显的季风特征,多年平均气温为 6.0～8.5 ℃,低于同纬度的华北平原地区;多年平均降水量为 250～440 mm。降水在时间上集中分布在 7—9 月份,自东南向西北递减[16]。毛乌素沙地植被种类较多,分为草原植被、荒漠植被和沙地植被,草原植被主要有大针茅、本氏针茅、冷蒿等;荒漠植被有红砂、藏锦鸡儿、柠条等;沙地植被有油蒿、柳叶鼠李、锦鸡儿、油松、樟子松等[17]。

1.2 植被指数数据

MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)数据是目前应用最广泛的遥感影像数据之一,具有较高的光谱分辨率和时间分辨率。本文采用 Terra MODIS 传感器的 L_3 级 16 d 增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI),时间跨度为 2001—2016 年,空间分辨率为 250 m,从美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)陆地分布式数据档案中心(Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC, https://lpdaac.usgs.gov/)获取。EVI 计算过程引入蓝光波段,增益因子及背景调整项,可有效消除大气噪声影响,且改善归一化植被指数的红光饱和和土壤背景干扰影响。

基于 16 d EVI 数据,根据国际通用的最大值合成法(maximum value composite, MVC)得到研究区域 2001—2016 年逐月 EVI 图谱。基于月 EVI 时序图谱,根据最大值合成法得到年 EVI 最大值序列图谱,代表年内生长季(5—9 月份)的植被生长状态。基于月 EVI 时序图谱,根据公式 1[18]求研究区域逐格网的逐年 EVI 最小值序列图谱,代表年内非生长季(10 月至翌年 4 月)的植被生长状态。

$$EVI_i = Min(EVI_{i,j}) \tag{1}$$

式中:EVI_i——第 i 年的 EVI 数据;$EVI_{i,j}$——第 i 年的 j(1—12 月)月 EVI 数据。

基于 2001—2016 年 MODIS EVI 的每一像元的逐年均值,说明毛乌素沙地植被覆盖空间分布特征。当 EVI>0.1 时,其代表的像元才是植被像元[19],结

合刘静等[14]的植被覆盖类型划分标准将毛乌素植被覆盖区域划分为 3 级,0.10<EVI≤0.30 代表的像元是低植被覆盖区域;0.30<EVI≤0.60 代表的像元是中植被覆盖区域;0.60<EVI≤1.00 代表的像元是高植被覆盖区域。

1.3　气象数据

本文采用的降水、气温数据主要来源于国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)的"中国地面气候资料日值数据集(V3.0)",时间跨度为 1957—2016 年。整个毛乌素沙地分布 8 个气象站点。取同一时刻所有气象站点的降水和气温均值作为研究区域的降水和气温值,基于此得到毛乌素沙地 1957—2016 年的年降水量和年气温时序数据集。

1.4　Theil-Sen median 趋势分析和非参数 Mann-Kendall 检验方法

本文采用 Theil-Sen median 趋势分析和非参数 Mann-Kendall 趋势检验方法(简称 MK 趋势检验法)分析植被指数空间格网变化趋势和显著性检验。该方法基于秩的非参数分析方法,不要求所分析数据遵循某一概论分布,也不受少数异常值干扰。Theil-Sen median 趋势计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数值,其计算公式为:

$$\mathrm{slope}_{\mathrm{EVI}}=\mathrm{median}\left(\frac{X_j-X_i}{j-i}\right) \tag{2}$$

X 指的是 EVI 植被指数,$2001\leqslant i<j\leqslant 2016$。当 $\mathrm{slope}_{\mathrm{EVI}}>0$ 时,反映 EVI 呈增长趋势,反之则反映 EVI 呈退化的趋势。非参数 Mann-Kendall 趋势检验方法用来判断趋势的显著性,被广泛应用于全球不同区域时间序列的趋势特征分析过程中[20]。具体计算思路为:

设时间序列为 $X=(X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n)$,表示 n 个独立的、随机的同分布的样本。检验统计量 S 的计算公式为:

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(X_j-X_i) \tag{3}$$

式中:$\mathrm{sgn}(X_j-X_i)=\begin{cases}+1 & (X_j-X_i)>0\\ 0 & (X_j-X_i)=0\\ -1 & (X_j-X_i)<0\end{cases}$,$S$ 为正态分布,其均值为 0,方差 $\mathrm{var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18$。当 $n>10$ 时,标准的正态系统变量通过下列公式计算:

$$\mathrm{UF}=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}} & S<0\end{cases} \tag{4}$$

这里 UF 为标准正态分布,给定显著性水平 a,当 $|\mathrm{UF}|>U_{1-a/2}$(本文中 $a=0.05$,$U_{1-a/2}=\pm 1.96$),表明原假设不可接受,即时间序列的上升或下降趋势通过 95%的显著性检验,反之不通过。

将数据序列 $(X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n)$ 的逆序列按照上述过程再计算一次。同时使 $|\mathrm{UB}|=-\mathrm{UF}$。若 UF 和 UB 两条曲线出现交点,且交点位于置信区间内,该交点对应的时刻即序列突变开始的时刻。本文采用 MK 方法对 1957—2016 年的毛乌素沙地降水和气温进行突变分析。

1.5　气象要素趋势分析

采用最小二乘拟合气候要素(气温和降水)随时间的变化速率,即气候要素 y 随时间 t 变化的线性回归系数,可采用一元一次方程表示,并对相关系数进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　毛乌素沙地气候要素趋势与突变分析

由 1957—2016 年毛乌素沙地降水量和气温的年际变化趋势(图 1)可知,毛乌素沙地年均降水量在 1957—2016 年呈不显著减少趋势,倾向率约为 −0.069 mm/a ($p>0.05$)。气温呈现显著升高趋势,倾向率约为 0.029/a ($p<0.01$)。从气温和降水量的多年变化趋势可知毛乌素沙地气候变化有干热化发展趋势。

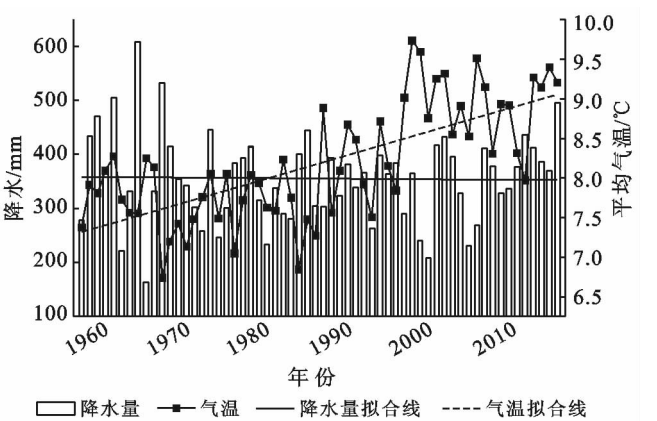


图 1　毛乌素沙地 1957−2016 年降水与气温数据的时序分布

毛乌素沙地的气候环境在 1957—2016 年内经历了突变,尤其是气温的突变比较明显(图 2)。MK 突变检验结果显示:1957—2016 年,UF 和 UB 曲线在 1993 年相交,且交点在置信区间内,说明毛乌素沙地有明显的突变现象,且自 1993 年起,毛乌素沙地气温

开始明显的增暖趋势，尤其是 1998 年以后，气温开始显著上升，趋势显著性水平超过 0.05 临界线。毛乌素沙地年降水量的 MK 突变检测结果显示（图 2），UF 和 UB 曲线在置信水平内有 6 个交点，说明该地区降水量时序变化波荡起伏，尤其是 21 世纪以来降水剧烈变化。



图 2 毛乌素沙地气温与降水数据的 MK 突变分析

2.2 毛乌素沙地植被覆盖的空间分布与变化趋势特征

2.2.1 空间分布特征 对 2001—2016 年的 MODIS EVI 年最大值求平均得到 EVI 多年平均值的空间分布（图 3），用以说明毛乌素沙地植被覆盖格局分布特征。毛乌素沙地植被指数多年平均值为 0.22，植被覆盖度偏低，整个区域 EVI 值分布在 0.03～0.78 之间，EVI 高值区与低值区呈镶嵌状分布，且 EVI 低值区呈西北—东南走向的长条状，与区域主导风向一致。毛乌素沙地南部 EVI 值明显比北部高。将毛乌素 EVI 值范围分为 4 级，统计结果如表 1 所示。毛乌素沙地无植被覆盖区域（EVI 值小于等于 0.10）占毛乌素总面积的 1.35%，植被覆盖区域（EVI 值大于 0.10）占整个沙地总面积 98.65%。植被低覆盖区域（EVI 值在 0.10～0.30）占总面积的 84.89%；中覆盖区域（EVI 值在 0.30～0.60）占总面积的 13.63%，集中分布在鄂托克前旗和乌审旗南部，和定边县和靖边县等地区；高覆盖区域稀少。

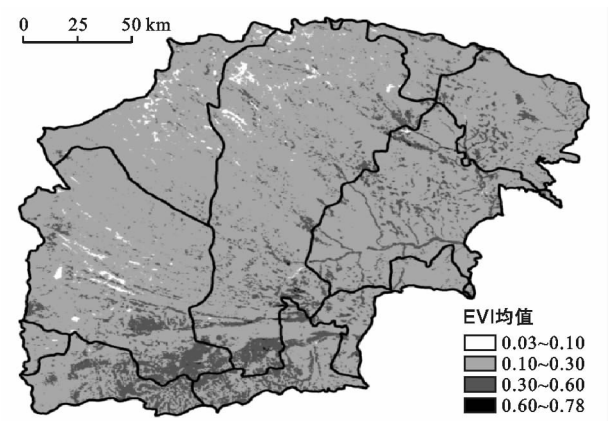


图 3 毛乌素沙地 EVI 2001—2016 年平均值空间分布

表 1 毛乌素沙地 EVI 分级

EVI 分级	占总面积比例/%
≤0.10	1.35
0.10<EVI≤0.30	84.89
0.30<EVI≤0.60	13.63
EVI>0.60	0.13

2.2.2 变化趋势特征 利用 Theil-Sen median 趋势分析方法统计 2001—2016 年毛乌素沙地逐像素 EVI 年最大值的变化趋势，正值表示该格网植被覆盖呈增长趋势，负值表示减少趋势，0 值表示植被覆盖稳定不变。EVI 年最大值变化趋势的统计结果（图 4）表明，EVI 年最大值格网年变化率介于－0.044～0.054/a 之间，其中整个研究区域的 0.01%格网的植被指数 EVI 年最大值稳定不变，9.27%格网的 EVI 年最大值呈减少趋势，90.72%格网的 EVI 年最大值呈增长趋势。整体上，毛乌素沙地生长季的植被以增长趋势为主。整个研究区域 4.83%格网的 EVI 年最大值的年变化速率介于 0.01～0.054/a 之间，集中分布在毛乌素沙地南部区域；63.4%格网 EVI 年最大值的年变化率介于 0～0.005/a 之间，呈微弱增长趋势；22.3%格网 EVI 年最大值的年变化率介于0.005～0.01/a 之间。研究区域 4.93%格网 EVI 年最大值的年变化率介于－0.044～－0.001/a 之间，植被覆盖呈快速退化状态；集中连片分布在毛乌素南部、中部及东部区域的局部地区；4.34%格网 EVI 年最大值的年变化率介于－0.001～0/a 之间，主要分布在严重退化区域的周边地区。对变化趋势进行 MK 显著性检验可知，EVI 年最大值呈减少趋势的格网中仅

有 10.32%通过显著性检验,零星地分布在定边县和靖边县北部,榆林市南部和东部,及乌审旗中部局部区域;66.72%的 EVI 年最大值增长趋势格网通过显著性检验。整体上,2001—2016 年毛乌素沙地生长旺季的植被覆盖度呈显著增长趋势;南部和东部地区植被覆盖度变化速率大于中部和北部地区。

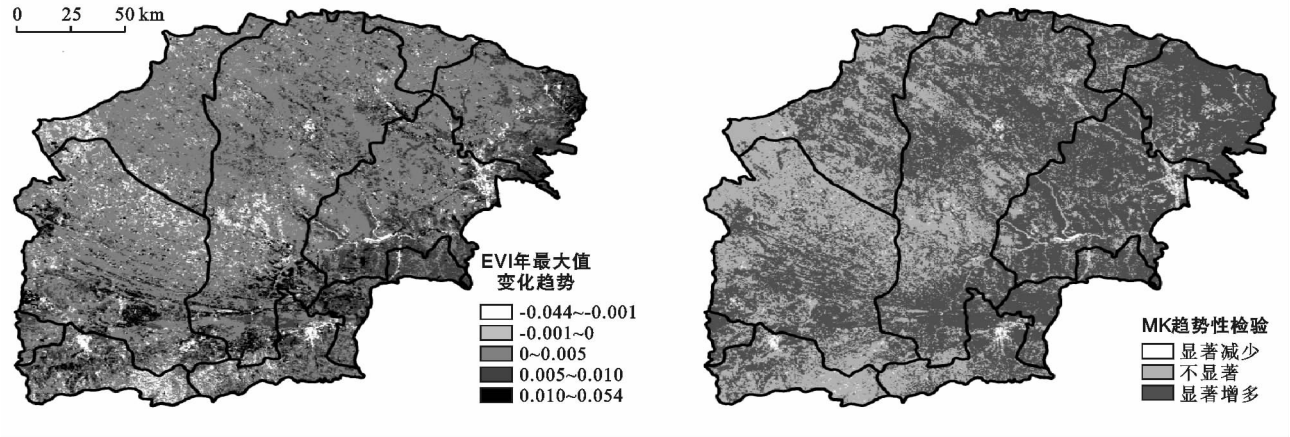


图 4　毛乌素沙地 EVI 年最大值变化趋势及显著性检验

利用 Theil-Sen median 趋势分析方法统计毛乌素沙地逐像素 EVI 逐年最小值在 2001—2016 年的变化趋势(图 5),由图 5 可知,EVI 逐年最小值的格网年变化率介于−0.006～0.009/a 之间,变化幅度明显小于 EVI 逐年最大值的变化速率。研究区域 83.18%格网的 EVI 逐年最小值呈增长趋势,区域总格网的 59.27%年变化速率介于 0.000 3～0.006/a 之间,主要分布在毛乌素沙地南部地区。区域总格网的 16.54%的 EVI 年最小值呈减少趋势,5.08%的 EVI 年最小值的年变化率介于−0.006～−0.000 3/a 之间,集中分布在毛乌素沙地的西部和东部地区;11.46%的 EVI 年最小值的年变化率介于−0.000 3～0/a 之间,主要分布在年变化率为−0.006～−0.000 3/a的格网周边,及毛乌素沙地的中部和北部地区。对变化趋势进行 MK 显著性检验可知,EVI 减少格网中的 8.77%通过显著性检验,主要分布在鄂托克前旗和榆林市北部,及神木县区域;EVI 增长趋势格网中的 42.41%通过显著性检验,主要分布在毛乌素南部区域。整体上,2001—2016 年毛乌素沙地非生长季的植被覆盖度呈显著增长趋势的格网大于显著减小趋势的格网,其中南部地区以显著增加为主。

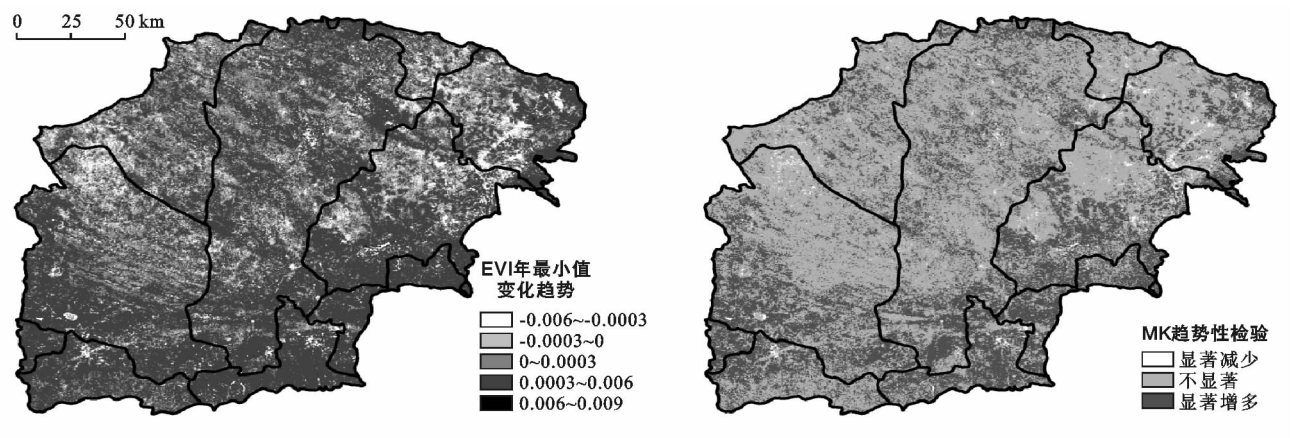


图 5　毛乌素沙地 EVI 年最小值变化趋势及显著性检验

2.3　毛乌素沙地植被覆盖度的时间变化特征

2.3.1　年变化特征　为研究毛乌素沙地植被覆盖区域 EVI 随时间变化的特点,取 2001—2016 年 EVI 的区域格网均值进行时序上的分析,代表逐年的植被覆盖状况,其年际变化如图 6 所示。2001—2016 年,毛乌素 EVI 年最大值的年际值分布在 0.18～0.26 之间;最小值出现在 2001 年,最大值出现在 2016 年;年变化速率为 0.003 8/a(p=0.000 1)。从年际变化来看,2001—2016 年 EVI 年最大值呈逐年极显著增加趋势,即植被生长季的植被覆盖呈好转趋势。EVI 年

最小值的逐年均值平稳分布在 0.05～0.08 之间，最小值出现在 2011 年，最大值出现在 2013 年，年变化速率为 0.000 3/a(p=0.547 5)。EVI 年最小值变化幅度小。整体上，2001—2016 年毛乌素沙地植被状况有明显的好转趋势，且生长旺季呈极显著增长趋势。

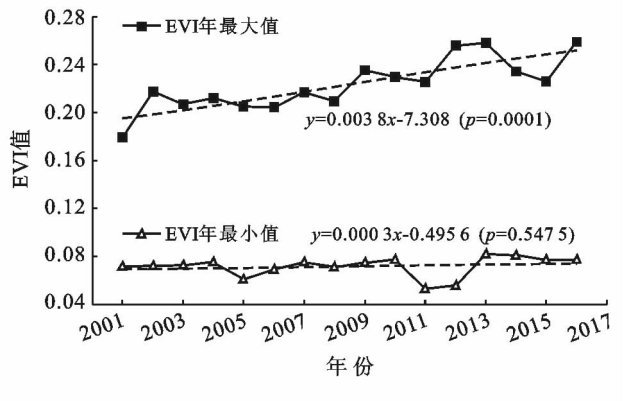


图 6 毛乌素沙地 EVI 年最大值、年最小值时序分布

2.3.2 月变化特征 从月植被指数 EVI 的变化趋势来看(图 7)，毛乌素沙地月 EVI 在 0.08～0.21 之间波动，年内变化趋势明显，呈典型的单峰分布，月平均 EVI 最低值在 1 月，最高值在 8 月。月 EVI 峰区出现在 7～8 月，约 0.20 左右；谷值区出现在 12 月至翌年 3 月，约 0.084 左右。月降水量年内变化也呈典型单峰分布，8 月份降水峰值为 84 mm。月 EVI 与毛乌素沙地的月降水分布同步，二者相关系数高达 0.99。

以多年月平均 EVI 为基准，2001—2016 年各月 EVI 值减去对应月份的 EVI 的多年平均状态，得到该地区的相对 EVI 指数。当相对 EVI 指数结果为负值时，说明本月 EVI 少于 EVI 的平均状态，植被处于退化状态；当结果为正值时，说明本月 EVI 多于 EVI 的平均状态，植被处于好转状态；当结果为 0 时，表示本月 EVI 和 EVI 平均状态相当，植被处于稳定状态。由相对 EVI 指数月时序分布图(图 7)可知，相对 EVI 指数在－0.05～0.04 间波动变化，最小值发生在 2001 年 7 月，最大值发生在 2016 年 9 月。毛乌素沙地植被分布可分为两个阶段，2001 年 1 月至 2008 年 8 月相对 EVI 指数多为负值，说明该时段毛乌素沙地植被以退化状态为主；2008 年 9 月之后相对 EVI 指数以正值为主，说明毛乌素沙地植被处于好转状态。

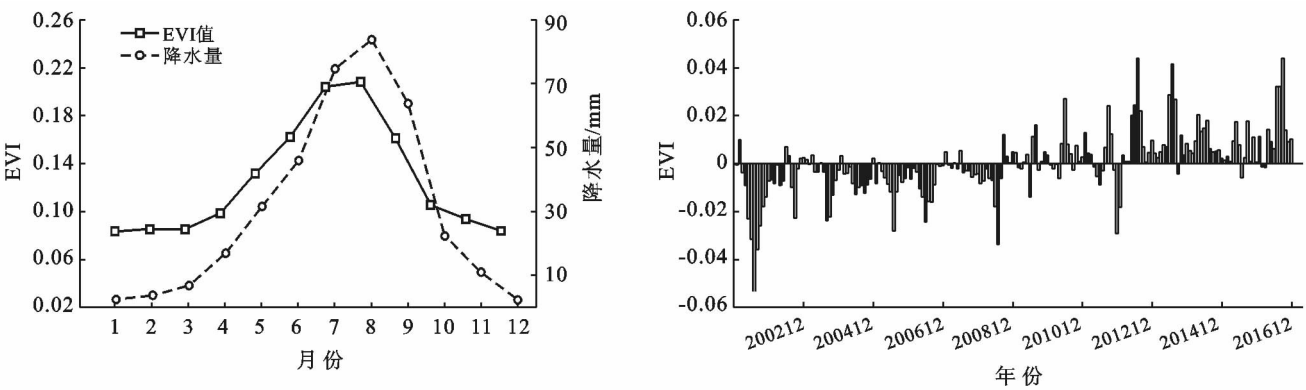


图 7 毛乌素沙地 EVI 月变化

3 讨 论

毛乌素沙地在沙漠化过程中植被的稳定性会降低[21]；而气候因素和人为因素是导致毛乌素沙地植被覆盖变化的决定因素[22]。本文重点讨论气候因子和人类活动与区域植被指数 EVI 之间的关系。

3.1 气候因子与植被生长状况的关系

由图 8 毛乌素沙地 2001—2016 年降水、气温时序分布图可知，该时段区域降水和气温均呈上升趋势，但变化趋势未通过显著性检验。经偏相关性分析可知，EVI 年最大值与降水(r=0.43)和气温(r=－0.12)的相关性较弱，EVI 年最小值与气温呈强正相关性(r=0.71)，与降水呈弱正相关性(r=0.24)。

该时段极端气候特征影响植被生长状况，例如，2005 年降水量为 230.76 mm，较 2001—2016 多年平均降水量(375.42 mm)少 144.66 mm，为枯水年；该年气温为 8.53 ℃，较 2001—2016 多年平均气温(8.92 ℃)低 0.39 ℃；2005 年 EVI 年最大值为 0.21，较 2001—2016 EVI 多年平均值(0.22)低 0.01；2005 年 EVI 年最小值为 0.06，较 2001—2016 EVI 多年平均值(0.07)低 0.01，严重的干旱低温环境使毛乌素沙地生长季和非生长季的植被生长状况较差。2012 年降水量较多年平均降水量多 61.23 mm，为丰水年，植被生长季的植被指数较多年平均值高 0.03；该年气温较多年平均气温低 0.95 ℃，非生长季的植被指数较多年平均值低 0.02。

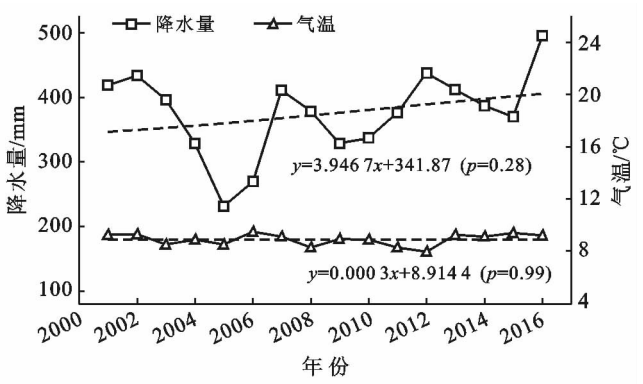


图 8　毛乌素沙地 2001－2016 年降水、气温时序分布

依据降水和气温时序分布规律,可将 2001—2016 年气候特征划分为两个阶段:2001—2006 阶段和 2007—2016 阶段。基于月降水量、月气温分别计算 2001—2016 年的生长季(5—9 月份)和非生长季(10 月至翌年 4 月)降水累积量和月平均气温。分别分析生长季和非生长季的降水累积量、平均气温,及对应的植被指数 EVI 年最大值和 EVI 年最小值的关系。由生长季(10 月至翌年 4 月)植被生长状况(EVI 年最大值)、降水、气温年时序分布特征(图 9)可知,毛乌素生长季多年平均降水量为 307.85 mm,2001—2006 阶段年平均降水量(298.80 mm)低于多年平均值,2007—2016 阶段年平均降水量(315.08 mm)高于多年平均值。毛乌素生长季多年平均气温为 19.86 ℃,2001—2006 阶段年平均气温(20.03 ℃)高于多年平均值,2007—2016 阶段年平均气温(19.75 ℃)低于多年平均值。毛乌素生长季植被指数多年平均 EVI 为 0.223 5,2001—2006 阶段年 EVI 平均值(0.204 3)低于多年平均值,2007—2016 阶段年 EVI 平均值(0.235 0)高于多年平均值。整体上,毛乌素沙地生长季的植被生长状况与降水变化呈正相关关系,均由低于多年平均值转向高于多年平均值,而与气温变化呈负相关关系(气温分布由高于多年平均值转向低于多年平均值)。毛乌素沙地生长季植被生长状况与降水呈正相关性,与气温呈负相关性,即生长季降水增多、气温降低有利于植被生长。闫峰等[13]分析 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时亦发现该区域植被生长状况好转与降水增多趋势,与气温降低趋势相一致,该结论与本文研究结果相同;乌兰吐雅等[23]发现毛乌素沙地 NDVI 与累积降水量有正相关,与气温的关系不显著;王立新等[24]指出毛乌素沙地植被盖度变化与气候变化密切相关。受基础数据、研究方法、分析时段等多种因素影响,不同学者分析同一区域时研究结果存在异同。而不同沙地的植被覆盖变化影响因素亦存在异同,例如呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地 NDVI 与累积气候因子关系不显著[23];而浑善达克沙地生长季的植被覆盖度的变化趋势与降水量呈正相关,与气温呈负相关[25]。

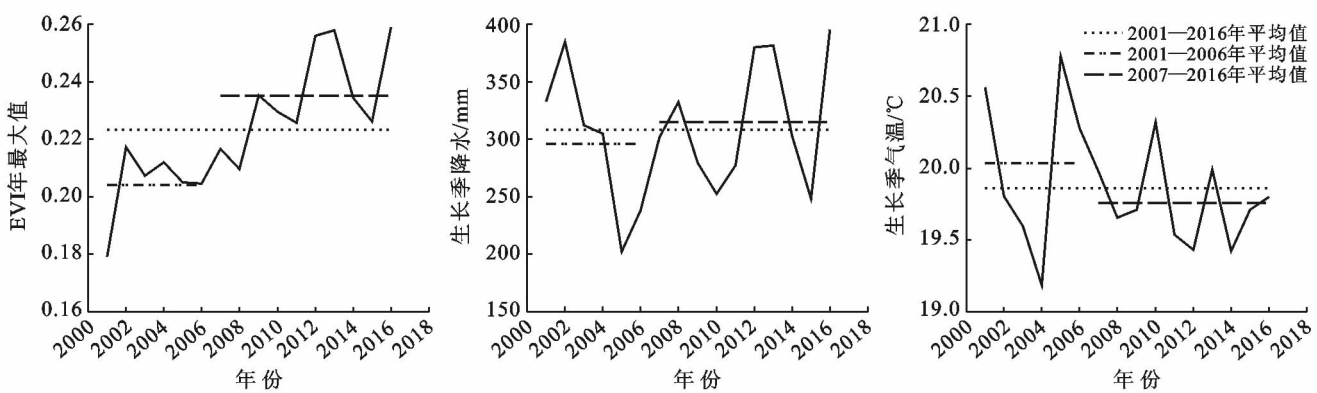


图 9　毛乌素 2001－2016 年 EVI 年最大值、生长季降水、生长季气温时序分布

分析非生长季(10 月至翌年 4 月)植被生长状况(EVI 年最小值)、降水、气温年时序分布特征(图 10)可知,毛乌素非生长季降水量较少,多年平均降水量为 64.96 mm,2001—2006 阶段年平均降水量(50.21 mm)低于多年平均值,2007—2016 阶段年平均降水量(73.81 mm)高于多年平均值。毛乌素非生长季气温很低,多年平均气温为 1.05 ℃,2001—2006 阶段年平均气温(1.02 ℃)低于多年平均值,2007—2016 阶段年平均气温(1.07 ℃)高于多年平均值。毛乌素非生长季植被指数较低,多年平均 EVI 为 0.071 9,2001—2006 阶段年 EVI 平均值(0.070 6)低于多年平均值,2007—2016 阶段年 EVI 平均值(0.072 7)高于多年平均值。整体上,毛乌素沙地非生长季的植被生长状况与降水、气温变化呈正相关关系,均由低于多年平均值转向高于多年平均值。毛乌素沙地非生长季的降水增多、气温升高,有利于植被生长好转。

毛乌素沙地生长季和非生长季植被生长状况受气候要素影响,整体上降水增多有利于植被生长;生长季的气温增长抑制植被生长,而非生长季的气温增长促进植被生长。

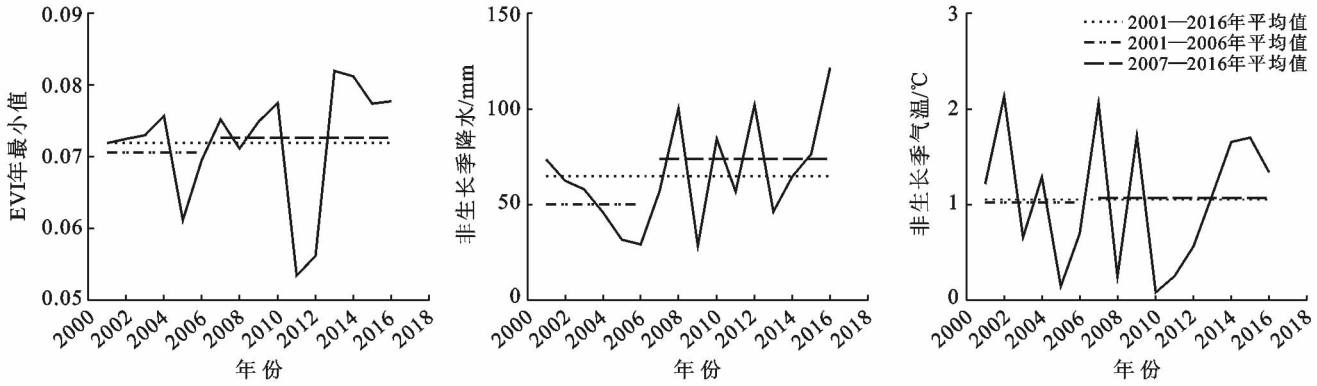


图 10 毛乌素 2001—2016 年 EVI 年最小值、非生长季降水、非生长季气温时序分布

3.2 人类活动对植被生长状况的影响

植被覆盖的时空变化是自然因素和人类活动交互作用的结果。毛乌素沙地气候暖干化发展趋势明显,21 世纪以来国家“退耕还林”工程以及后期的飞播造林、沙区封育等生物和工程措施相继在毛乌素沙地实施,故农业活动、生态建设等人类活动也在不断加强。考虑到毛乌素沙地主要包括内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部,陕西省榆林市的北部,整理收集了鄂尔多斯市和榆林市统计年鉴中两地区近十来年的农作物播种面积、造林面积和大牧畜数量分布情况。由图 11 可知,2000 年以来鄂尔多斯市和榆林市农作物播种面积逐年增多;2001—2016 年,鄂尔多斯市累计造林 1.63×10^6 hm^2,榆林市累计造林 6.92×10^5 hm^2。地方政府的“禁牧、休牧、轮牧”政策促使牧区牧畜结构发生变化,鄂尔多斯市 2001—2006 年大牧畜存栏头数直线上升,2006 年牛、马、驴、骡、骆驼等大牧畜数量达到高峰(39.47 万头),之后 2007—2016 年阶段快速减少;榆林市 2002—2006 年大牧畜数量较多,2007—2016 年相对 2002—2006 年阶段减少较多。

整体上,2007—2016 年大畜牧数量减少一定程度上缓解了毛乌素沙区草场的放牧压力,故 2007—2016 年植被指数较 2001—2006 年植被指数高。农业活动、大范围的造林工程及“禁牧、休牧、轮牧”政策等均对毛乌素沙地植被的生长状况改善产生了积极的影响,植被覆盖不断提高。相关研究指出封禁保护措施[26]、土地利用变化与沙地的植被覆盖度变化有密切的关系,例如元志辉等[25]研究发现浑善达克沙地合理的土地利用是影响其植被覆盖度出现增加趋势的重要影响因素之一。2000—2010 年毛乌素沙地高中覆盖草地、林地面积增加[27],有助于该区域植被覆盖度的增加。

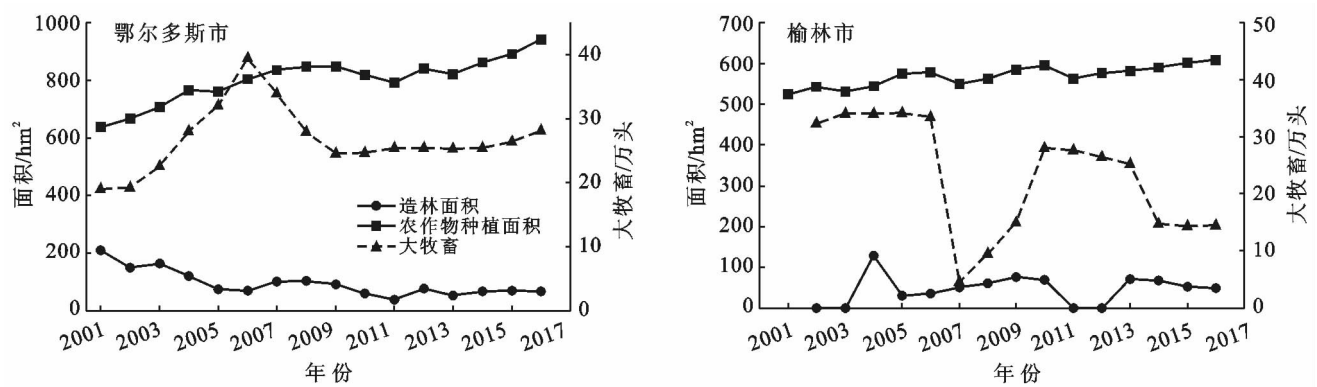


图 11 毛乌素沙地 2001—2016 年造林和农作物总播种面积和大牧畜情况

4 结 论

(1) 毛乌素沙地多年平均 EVI 值介于 0.03~0.78之间,区域平均值为 0.22,表明该区域植被覆盖度偏低;空间分布不均,南部 EVI 值高于北部。

(2) 毛乌素沙地生长季的植被覆盖度以显著增长为主。非生长季的植被覆盖显著增长的格网主要分布在毛乌素沙地南部,显著减少的格网主要分布在鄂托克前旗和榆林市北部,及神木县区域。整体上,毛乌素沙地 2001—2016 年植被覆盖好转趋势明显,

生态环境有所改善。

(3) 毛乌素沙地 EVI 年最大值与降水呈正相关,与气温呈弱负相关;EVI 年最小值与降水呈强正相关,与气温呈弱正相关。农作物种植面积的增加、大规模人工造林、以及大牲畜规模的控制等人类活动有助于缓解生态环境压力,提高植被覆盖度。

[参 考 文 献]

[1] Yang Limin, Wylie B K, Tieszen L L, et al. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U. S. Northern and Central Great Plains[J]. Remote Sensing of Environment, 1998,65(1):25-37.

[2] Anyamba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981—2003[J]. Journal of Arid Environments, 2005,63(3):596-614.

[3] Senay G B, Elliott R L, Arvanitis L G. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation [J]. Forest Ecology&Management, 2000,128(1):83-91.

[4] Liu Ya, Li Yan, Li Shuangcheng, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015,7(10):13233-13250.

[5] 王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 2000—2015 年青藏高原草地归一化植被指数对降水变化的响应[J]. 应用生态学报,2018,29(1):75-83.

[6] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报,2015,70(5):705-716.

[7] Piao Shilong, Fang Jingyun, Wei Ji, et al. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China[J]. Journal of Vegetation Science Official Organ of the International Association for Vegetation Science, 2004,15(2):219-226.

[8] 缪丽娟,蒋冲,何斌,等. 近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应[J]. 生态学报,2014,34(5):1295-1301.

[9] 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.

[10] 杜加强,贾尔恒,阿哈提,等. 1982—2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3567-3578.

[11] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报,2017,37(2):576-592.

[12] 张诗羽,张毅,王昌全,等. 岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J]. 水土保持通报,2018,38(1):69-75.

[13] 闫峰,吴波,王艳姣. 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J]. 地理科学,2013,33(5):602-608.

[14] 刘静,银山,张国盛,等. 毛乌素沙地 17 年间植被覆盖度变化的遥感监测[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(7):162-167.

[15] 喻泓,吴波,何季,等. 毛乌素沙地水源圈植物群落的分布格局[J]. 应用生态学报,2015,26(2):388-394.

[16] 柏菊,闫峰. 2001—2012 年毛乌素沙地荒漠化过程及驱动力研究[J]. 南京师大学报:自然科学版,2016,39(1):132-138.

[17] 王静璞,刘连友,贾凯,等. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素[J]. 中国沙漠,2015,35(3):624-631.

[18] Yang Yuting, Long Di, Guan Huade, et al. GRACE satellite observed hydrological controls on interannual and seasonal variability in surface greenness over mainland Australia[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015,119(12):2245-2260.

[19] 陈晋,陈云浩,何春阳,史培军. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. 遥感学报,2001,5(6):416-422.

[20] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1585-1591.

[21] 杨梅焕,曹明明,朱志梅. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中植被的退化和稳定性[J]. 水土保持通报,2017,37(5):10-15.

[22] 房世波,许端阳,张新时. 毛乌素沙地沙漠化过程及其气候因子驱动分析[J]. 中国沙漠,2009,29(5):796-801.

[23] 乌兰吐雅,哈斯础鲁,吉木色,等. 内蒙古四大沙地植被 NDVI 变化及气候响应研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(25):10457-10459.

[24] 王立新,刘华民,杨劼,等. 毛乌素沙地气候变化及其对植被覆盖的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2030-2039.

[25] 元志辉,雷军,包刚,等. 土地利用/覆盖变化对浑善达克沙地植被覆盖度的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(6):330-338.

[26] 杜敏,景璐,胡新培,等. 呼伦贝尔沙地封禁保护措施成效的研究[J]. 林业实用技术,2016(9):13-15.

[27] 罗娟,银山,王永芳. 毛乌素沙地土地利用动态变化分析[J]. 内蒙古林业科技,2014,40(2):5-9.