

滑永春,萨如拉,王冰.内蒙古草原NPP时空变化及驱动力[J].中国沙漠,2021,41(5):130-139.

内蒙古草原NPP时空变化及驱动力

滑永春,萨如拉,王冰

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 植被净初级生产力(NPP)及驱动力分析是全球变化研究的核心内容。以1982—2015年内蒙古草原为研究对象,基于GIMMS NDVI3g、ERA5气象和草原类型数据,采用CASA模型生成草原NPP。综合运用趋势分析、偏相关、复相关及残差分析法探讨1982—2015年草原NPP变化趋势,并定量确定气候因子和人类活动对草原动态变化的影响程度。结果表明:(1)内蒙古1982—2015年NPP极显著和显著增加的草原面积占草原总面积的11.76%、18.92%。NPP极显著和显著减少的草原面积占草原总面积的4.26%、8.08%。草原NPP增加的面积大于减少的面积,草原处于恢复状态。(2)内蒙古草原92.87%的区域NPP与气候因子之间表现出很好的相关性,气温驱动、降水驱动和降水、气温复合驱动分别占总面积的2.06%、70.71%和20.11%,气候变化对3种草原影响程度荒漠草原>典型草原>草甸草原。(3)人类活动对草原NPP也产生很大影响。其中起到正向作用通过显著性检验($P<0.1$)的区域占草原总面积的41.12%,起到负作用($P<0.1$)的占5.34%。综上所述,1982—2015年内蒙古草原总体处于恢复状态,在气候和人类活动共同作用下生态环境得到了极大改善。

关键词: 内蒙古草原; NPP; 趋势变化; 驱动力分析

文章编号: 1000-694X(2021)05-130-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00074

中图分类号: S812

文献标志码: A

0 引言

全球变化与陆地生态系统之间的相互作用是目前全球变化研究的热点问题^[1]。气候的改变严重影响着陆地生态系统的结构和功能,在生态系统构成中,植被是对气候变化最为敏感的部分^[2-4]。草原约占整个陆地生态系统总面积的30%^[5],具有防风、固沙、保土、调节气候、净化空气、涵养水源等生态功能,是陆地生态系统的重要组成部分^[6-8]。

植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)是绿色植物在单位时间、单位面积内累积有机物的总量,是植物光合作用吸收的碳总量减去呼吸作用消耗碳的差值^[9-11],对陆地生态系统碳循环研究和植被长势监测有着重要的意义^[12]。近年来,随着对全球变化及碳循环研究的不断深入,NPP的估算受到越来越多学者的关注,国际地圈-生物圈计划(IGBP)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)和京都议定书都将NPP的研究列为核心内容^[13]。草原NPP

是草原生态系统中土-草-畜系统与气候等因子共同作用的结果,是其结构和功能的表现,也是固碳能力的直接表征^[14-15]。目前,草原NPP研究的主要方法包括收获量测定法、生物量调查法以及借助各种模型拟合全球或区域尺度上植被NPP的模型模拟法^[16-17]。而在众多模型中,气候生产力模型由于所用参数简单、易获取,在实践中被广泛地应用^[18-21]。

内蒙古草原约占全国草原总面积的1/4,在维系生态平衡、区域发展中有着重要的意义^[22]。内蒙古草原的动态变化及其驱动机制一直受到广泛关注^[23-33]。然而目前绝大多数学者针对内蒙古草原变化驱动力的分析主要集中在气候因子,并没有充分考虑气候因子的复合作用对植被生长的影响,且对人类活动影响的定量研究比较少。为此,基于草原NPP和气象等数据,运用趋势分析、相关分析和残差分析等方法,探讨1982—2015年来内蒙古草原NPP变化趋势及气候、人类活动对其变化的

收稿日期:2021-04-19; 改回日期:2021-06-21

资助项目:内蒙古自然科学基金项目(2018MS03049);内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0067);内蒙古农业大学高层次人才引进项目(170014);“双一流”建设项目(206045)

作者简介:滑永春(1981—),男,山西大同人,讲师,主要从事荒漠化植被遥感研究。E-mail: 398721962@qq.com

通信作者:王冰(E-mail: wbingbing2008@126.com)

综合影响,旨在为区域生态建设提供技术支撑和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古(37°24'—53°2'N, 97°12'—126°04'E)位于中国北部,地处欧亚大陆内部。由东北向西南

呈长条形分布,东西距离约 2 400 km,南北跨度 1 700 km。土地总面积 118.3 万 km²,占全国总面积的 12.3%。气候以温带大陆性季风气候为主。年平均气温 -5—10 ℃,自东向西递增;降水量 35—530 mm,自东南向西北递减。内蒙古草原总面积 8 666.7 hm²,约占全区总面积的 60%,占全国草原总面积的 1/4 以上。草原类型基本可以划分为草甸草原、典型草原和荒漠草原等 3 种类型(图 1)。

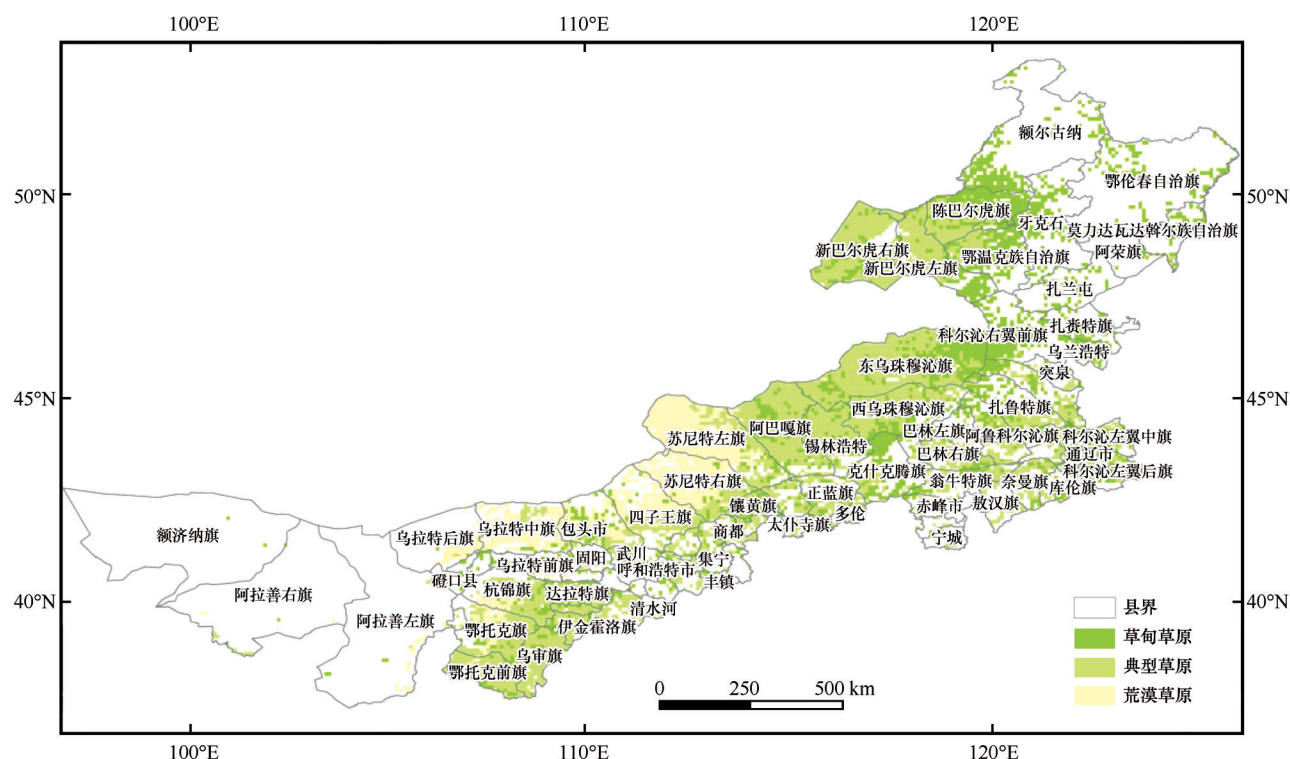


图1 内蒙古草原空间分布

Fig.1 Spatial distribution of grassland in Inner Mongolia

1.2 数据与研究方法

1.2.1 数据获取及预处理

GIMMS NDVI3g 获取及处理。植被指数数据为美国国家宇航局(NASA)最新提供的第三代NDVI 数据集(GIMMS NDVI3g V1.0)(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>),该数据集时间跨度为1982—2015年,时间分辨率为15 d,空间分辨率为8 km,已进行了图像预处理。使用Matlab对1982—2015年覆盖内蒙古草原的GIMMS NDVI3g数据进行格式转换、图像裁剪、投影转换等处理,形成内蒙古草原的月度NDVI数据集。

ERA5气象数据。气象资料为ECMWF公开的ERA5再分析数据(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>),

时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.125°。选用覆盖内蒙古草原1982—2015年1—12月0.125°的EC-MWF-ERA5气象模式2 m高度气温、降水。使用Matlab对数据进行格式转换、年度合成、图像裁剪、投影转换和重采样等处理。

草原数据。草原类型数据是在中国科学院植物研究所制作的1:100万全国植被类型数据基础上,完成对内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原范围的提取。对草原图进行投影转换、栅格化等处理,获得投影和分辨率与遥感数据一致的数字化产品。

1.2.2 模型及方法

1.2.2.1 CASA模型

CASA 模型是利用光能量利用率来估计 NPP 的

代表性模型,也是在全球NPP估计中使用最多、最成熟的模型。采用朱文泉等^[19]改进的光能利用率模型计算NPP:

$$NPP_{xt} = APAR_{xt} \times \varepsilon_{xt} \quad (1)$$

式中: $APAR_{xt}$ 代表像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); ε_{xt} 代表像元 x 在 t 月的实际光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

光合有效辐射计算公式:

$$APAR_{xt} = SOL_{xt} \times 0.5 \times FPAR_{xt} \quad (2)$$

式中: SOL_{xt} 为像元 x 在 t 月的全日照总辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$); $FPAR_{xt}$ 为植被对入射光合有效辐射 (PAR) 的吸收量; 常数 0.5 为太阳有效辐射占总日照的比率。

光能利用率 (ε) 计算公式:

$$\varepsilon_{xt} = T_{ext} \times W_{ext} \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: T_{ext} 为气温对光能利用率胁迫系数; W_{ext} 为水分对光能利用率胁迫系数; ε_{\max} 为最大光能利用率。依据包刚等^[20]对内蒙古草原植被最大光能利用率研究结果进行 ε_{\max} 取值, 草甸草原、典型草原和荒漠草原最大光能利用率分别为 0.654 、 0.553 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 和 0.511 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。

1.2.2.2 年际NPP变化趋势计算

基于像元的一元线性回归分析, 模拟34年来研究区植被的变化趋势, 计算公式为:

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

式中: θ_{slope} 为趋势变化率; $n=34$ (监测年数); C_i 为内蒙古第 i 年的植被 NPP。 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 表示植被 NPP 降低, 反之则表示植被 NPP 上升。采用 F 检验对植被 NPP 的年际趋势变化进行显著性检验。计算公式为:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \times \frac{n-2}{n} \quad (5)$$

式中: y_i 、 \hat{y}_i 分别表示研究区第 i 年草原覆盖度值的实际值与回归值, \bar{y} 为 34 年植被 NPP 的年际平均值。根据 F 检验结果将内蒙古草原 NPP 的变化趋势分为 6 个变化等级: 极显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$), 显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.05$), 不显著减少 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$); 不显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$); 显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.05$), 极显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$)。

1.2.2.3 偏相关分析

偏相关分析可用于去除一个自变量的影响, 只分析另一个自变量对因变量的影响。相关系数的计算是偏相关分析的第一步:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: r_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; \bar{x} 、 \bar{y} 为各自变量的平均值。相关系数值介于区间 $[-1, 1]$, 其绝对值越大说明相关关系越强。

偏相关系数的计算公式:

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中: $r_{xz,y}$ 表示去除变量 y 后变量 x 和 z 之间的偏相关系数; r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别表示变量 x 与 y 、 x 与 z 、 y 与 z 之间的相关系数。

采用 t 检验进行相关检验:

$$t = \frac{r_{xz,y}}{\sqrt{1-r_{xz,y}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (8)$$

式中: n 为样本数; m 为自由度个数。

1.2.2.4 复相关分析

复相关分析主要分析多个因素对一个因素的影响, 假设 y 和 z 是自变量, x 为因变量, 则它们之间的复相关系数计算如下:

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (9)$$

采用 F 检验法进行检验:

$$F = \frac{r_{x,yz}^2}{1 - r_{x,yz}^2} \frac{n - k - 1}{k} \quad (10)$$

式中: $r_{x,yz}$ 是复相关系数; n 为样本数; k 为自变量个数。

1.2.2.5 残差分析

采用残差分析法分析人类活动对植被 NPP 变化的影响, 此方法广泛应用于植被动态变化驱动力分析中。通过对 NPP 值与气温、降水做二元一次线性回归模拟, 求出 NPP 的预测值, 然后真实 NPP 与预测值 NPP 做差, 求出人类活动对 NPP 的影响。

$$\varepsilon = \text{NPP}_{\text{真实值}} - \text{NPP}_{\text{预测值}} \quad (11)$$

式中: ε 为残差, 即人类活动对 NPP 的影响程度。 $\varepsilon > 0$, 人类活动对 NPP 起到正面作用; $\varepsilon < 0$, 人类活动对 NPP 起到负面作用; $\varepsilon \approx 0$, 人类活动作用甚微。

2 结果与分析

2.1 草原NPP时空变化

1982—2015年,内蒙古草原NPP极显著增加和显著增加的面积占草原总面积的11.76%、18.92%,极显著减少和显著减少的面积占草原总面积的4.26%、8.08%,不显著增加和不显著减少的面积占草原总面积的41.66%、31.34%(图2)。①草甸草原:NPP极显著增加和显著增加的面积占其总面积的7.84%、12.74%,主要分布于鄂尔多斯市、锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗、通辽市的北部、兴安盟的东部、呼伦贝尔市的东部;NPP极显著减少和显著减少的面积占草甸草原总面积的6.90%、13.29%,主要分布于赤峰市的西部、通辽市的扎鲁特旗、兴安盟的科尔沁右翼中旗、呼伦贝尔的东部;剩余73.96%草甸草原地区变化不显著。②典型草原:NPP极显著增加和显著增加的面积占典型草原总面积的15.19%、23.10%,集中在鄂尔多斯市北部、锡林郭勒盟的北

部、通辽市的南部、呼伦贝尔市的东部;NPP极显著减少和显著减少的面积占典型草原总面积的3.97%、6.85%,集中于锡林郭勒盟的西乌珠穆沁旗、赤峰市的西部、通辽市的扎鲁特旗、兴安盟的科尔沁右翼中旗;剩余70.05%典型草原NPP变化不显著。③荒漠草原:NPP极显著增加和显著增加的面积占荒漠草原总面积的7.92%、16.76%,集中于鄂尔多斯市的西南部、巴彦淖尔市的北部、锡林郭勒盟的苏尼特左旗;NPP极显著减少和显著减少的面积占荒漠草原总面积的0.42%、2.52%,主要分布在锡林郭勒盟的苏尼特左旗和苏尼特右旗;剩余80.72%荒漠草原地区NPP变化不显著。

2.2 草原NPP变化驱动力

2.2.1 降水

由图3A可知,1982—2015年内蒙古草原年NPP和年降水量在年际变化趋势上具有高度的一致性,表明年降水量在一定程度上影响着草原年NPP的变化趋势。由图3B可知,除了呼伦贝尔市的东、南、北部,锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗东部,兴安盟的科尔沁右翼前旗以及鄂尔多斯市的准格尔旗,其余97.21%草原年NPP与年降水量均呈正相关。草原年NPP与年降水量偏相关性通过显著性检验($P<0.1$)所占比例为88.33%,其中,草甸草原显著相关($P<0.1$)面积占其面积72.83%,典型草原显著相关($P<0.1$)所占比例为93.90%,荒漠草原显著相关($P<0.1$)所占比例为98.66%。由此可见降水对草原NPP的影响为荒漠草原>典型草原>草甸草原,越往西北干旱地区降水对草原NPP的影响越大。

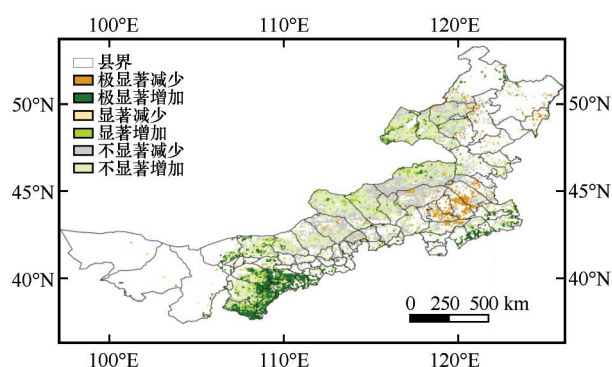


图2 NPP变化等级分布

Fig.2 NPP change grade distribution

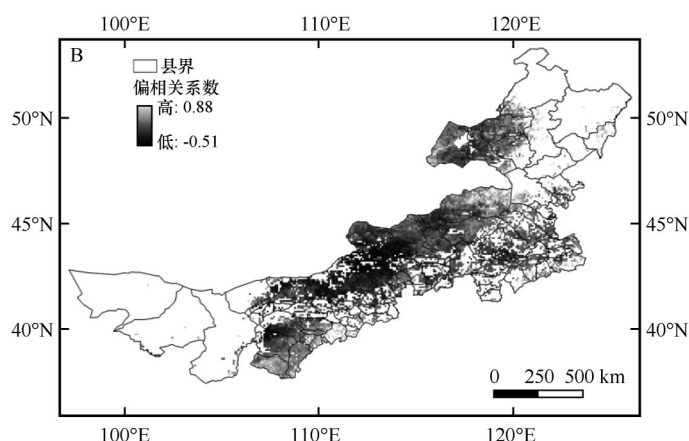
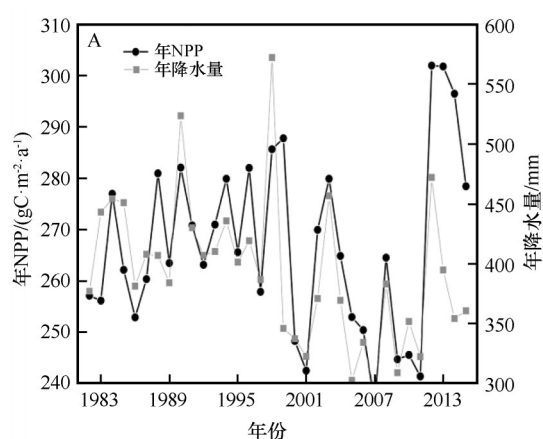


图3 内蒙古年NPP与年降水量的变化(A)及偏相关分布(B)

Fig.3 Change of annual NPP and annual total precipitation (A) and partial correlation distribution (B) in the Inner Mongolia

2.2.2 气温

由图 4A 可知,1982—2015 年内蒙古草原年 NPP 与年平均气温在年际波动上也有一定的规律性。由图 4B 可知,年 NPP 与年平均气温正相关的区域占研究区总面积的 74.58%,主要分布于除了呼伦贝尔市东部、锡林郭勒盟东北部以外的地区。草

原年 NPP 与年平均气温偏相关性通过显著性检验 ($P<0.1$) 的区域占总面积的 19.68%,其中,草甸草原显著相关 ($P<0.1$) 面积占其面积为 15.48%,典型草原显著相关 ($P<0.1$) 所占比例为 18.60%,荒漠草原显著相关 ($P<0.1$) 所占比例为 30.76%。气温对草原 NPP 的影响程度为荒漠草原>典型草原>草甸草原。

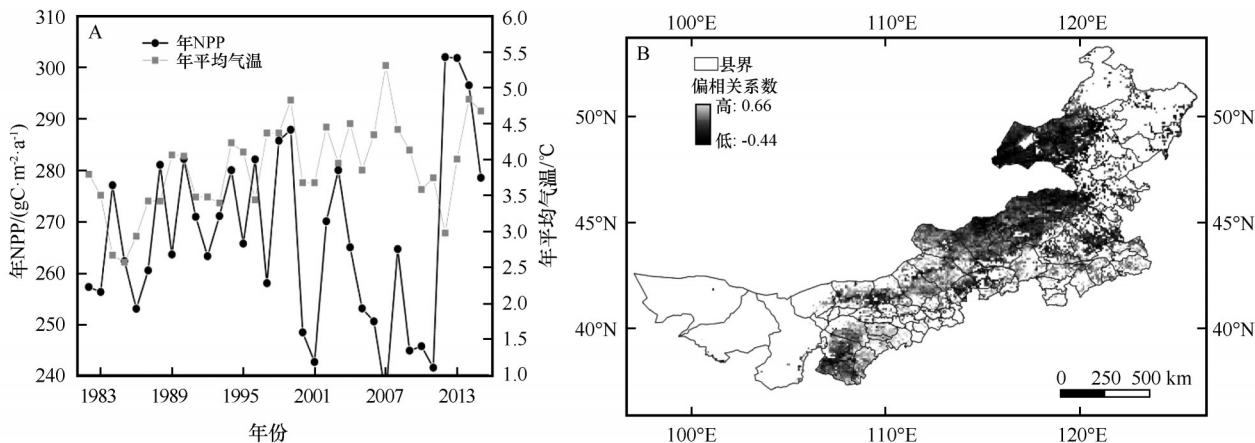


图 4 内蒙古年 NPP 与年平均气温的变化(A)及偏相关分布(B)

Fig.4 Change of annual NPP and annual average temperature (A) and partial correlation distribution (B) in the Inner Mongolia

2.2.3 降水、气温复合驱动力

由图 5 可知,通过显著性检验 ($P<0.1$) 的面积占总面积的 92.87%,主要分布在除了呼伦贝尔市的东、南、北部,锡林郭勒盟的东乌珠穆沁旗东部,兴安盟的科尔沁右翼前旗的其他草原地区。其中,草甸草原显著复相关 ($P<0.1$) 面积占其面积为 80.16%,典型草原显著复相关 ($P<0.1$) 所占比例为 98.00%,荒漠草原显著复相关 ($P<0.1$) 所占比例为 99.58%。这说明降水、气温复合效应对草原 NPP 的影响也是荒漠草原>典型草原>草甸草原。而研究

区草原年 NPP 与年降水量、年平均气温的显著偏相关 ($P<0.1$) 区域分别为 88.33% 和 19.68%,说明研究区年降水量和年平均气温有很强的相关性,两者的复合作用对草原 NPP 有很大影响。

2.2.4 基于气候因子的草原 NPP 变化驱动类型分区

根据前人经验和草原 NPP 变化的实际情况,对气候因子引起的草原 NPP 变化驱动类型进行分区。分区依据见表 1。92.87% 的区域 NPP 与气候因子之间表现出很好的相关性,属气候因子驱动型(图 6)。其中单独气温驱动型占比最小,仅为研究区总面积的 2.06%,主要分布于鄂尔多斯市的乌审旗、伊金霍洛旗、杭锦旗、准格尔旗,呼伦贝尔的牙克石市、鄂伦春自治旗;降水驱动型和降水、气温复合驱动型

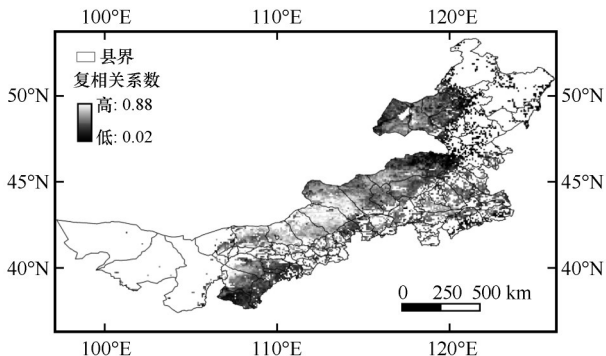


图 5 内蒙古草原 NPP 与年降水量、年平均气温的复相关分布
Fig.5 Multiple correlation distribution of grassland NPP with annual total precipitation and annual average temperature in Inner Mongolia

表 1 基于气候因子 NPP 变化驱动类型分区依据
Table 1 Division basis of driving types of NPP change based on climate factors

NPP 变化类型	分区依据	
	$R_{\text{NPP-T}}$	$R_{\text{NPP-P}}$
气温驱动型	$t \geq 0.1$	$F \geq F_0$
降水驱动型	$t \geq 0.1, F \geq F_0$	
降水、气温复合驱动型	$t \leq 0.1$	$t \leq 0.1, F \leq F_0$
非气候因子驱动型		$F \leq F_0$

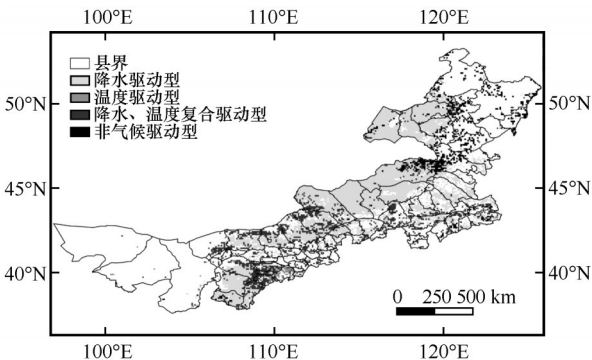


图 6 1982—2015 年内蒙古草原 NPP 变化的气候因子驱动类型

Fig.6 Climate driven patterns of grassland NPP change in Inner Mongolia from 1982 to 2015

分别占研究区总面积 70.71% 和 20.11%。前者覆盖草原的全境；后者集中于鄂尔多斯市，巴彦淖尔市北部，包头市达尔罕茂明安联合旗，乌兰察布市的四子王旗，锡林郭勒盟苏尼特左旗、苏尼特右旗、东乌珠穆沁旗，赤峰市，通辽市等。非气候驱动型占研究区总面积的 7.13%，主要分布于锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗东部、通辽市的扎鲁特旗、兴安盟的科尔沁右翼前旗、呼伦贝尔市东部等。

各种草原降水驱动面积占该类型总面积比例排序为典型草原>荒漠草原>草甸草原；气温驱动排序为典型草原>草甸草原>荒漠草原；降水、气温复合驱动排序为荒漠草原>典型草原>草甸草原；非气候驱动排序为草甸草原>典型草原>荒漠草原(表 2)。这说明气候变化对 3 种草原影响的程度荒漠草原>典型草原>草甸草原。

表 2 内蒙古各种草原类型 NPP 变化的气候因子驱动力分区百分比

Table 2 Area proportion of driving forces of climate factors on NPP change of different grassland types in Inner Mongolia					
草原类型	降水驱动 /%	气温驱动 /%	降水、气温复合驱动 /%	非气候驱动 /%	合计 /%
草甸草原	59.18	1.83	19.14	19.84	100.00
典型草原	77.92	2.62	17.47	2.00	100.00
荒漠草原	68.60	0.71	30.27	0.42	100.00

2.2.5 草原 NPP 变化的人为驱动力

草原 NPP 变化很可能为气候驱动因子和人类活动共同作用的结果。本研究通过残差法得到人类活动对草原 NPP 变化的影响。从图 7A 可以看

出，1982—2015 年研究区 NPP 残差呈现先下降后上升的趋势，表明人类活动对草原 NPP 的影响由开始的负向干扰变为后来的正向改善。由图 7B 可知，残差变化大于 0 的区域占研究区总面积的 77.29%，其中通过显著性检验 ($P<0.1$) 的占 41.12%，人类活动起到正向作用的地区主要分布于鄂尔多斯市、巴彦淖尔市的乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗，包头市的达尔罕茂明安联合旗，乌兰察布市四子王旗，锡林郭勒盟北部和呼伦贝尔市的西部。这说明研究区内各种林业工程、水保措施、草原保护条例实施对上述区域的草原恢复起到了非常重要的作用。人类活动起到负面作用的地区集中在锡林郭勒盟的南部地区，赤峰市的巴林左旗、巴林右旗、阿鲁科尔沁旗，通辽市的扎鲁特旗，兴安盟的科尔沁右翼中旗，以及呼伦贝尔市东部等。其中通过显著性检验 ($P<0.1$) 的区域占研究区总面积的 5.34%，考虑为人类频繁的生活生产等活动造成，如城镇建设、过度开垦樵采、放牧等。人类活动对各种草原类型的影响程度典型草原 (均值: 0.63) > 荒漠草原 (均值: 0.33) > 草甸草原 (均值: 0.24)，且均值都为正，说明人类活动对植被恢复起到正向作用。

2.2.6 NPP 变化的综合驱动力

基于 1982—2015 年研究区草原年 NPP 的变化趋势图、年草原 NPP 与年降水量、年均气温的复相关系数图、NPP 残差趋势图及草原类型图的叠加分析，得到表 3。

在草原年 NPP 与年降水量、年均气温的复相关性显著区域：①当人类活动为正向干扰时，草甸草原 NPP 极显著、显著增加面积分别占该限制条件区域总面积的 17.89%、9.29%，NPP 不显著变化的面积占该限制条件区域总面积的 72.82%，NPP 减少的面积为 0。典型草原 NPP 极显著、显著增加面积分别占该限制条件区域总面积的 23.69%、11.31%，不显著变化的面积占该区域总面积的 65.00%，无 NPP 减少区域。荒漠草原 NPP 极显著、显著增加面积分别占该限制条件区域总面积的 19.66%、19.90%，不显著变化的面积占该限制区域总面积的 60.44%，无 NPP 减少区域。②在人类活动无明显干扰时，草甸草原 NPP 极显著减少、极显著增加、显著减少、显著增加、不显著变化的面积分别占该限制条件区域总面积的 0.93%、1.52%、3.86%、2.10% 和 91.59%，NPP 减少的面积大于增加的面积。典型草原 NPP 极显著减少、极显著增加、显著减少、显著增加、不显著

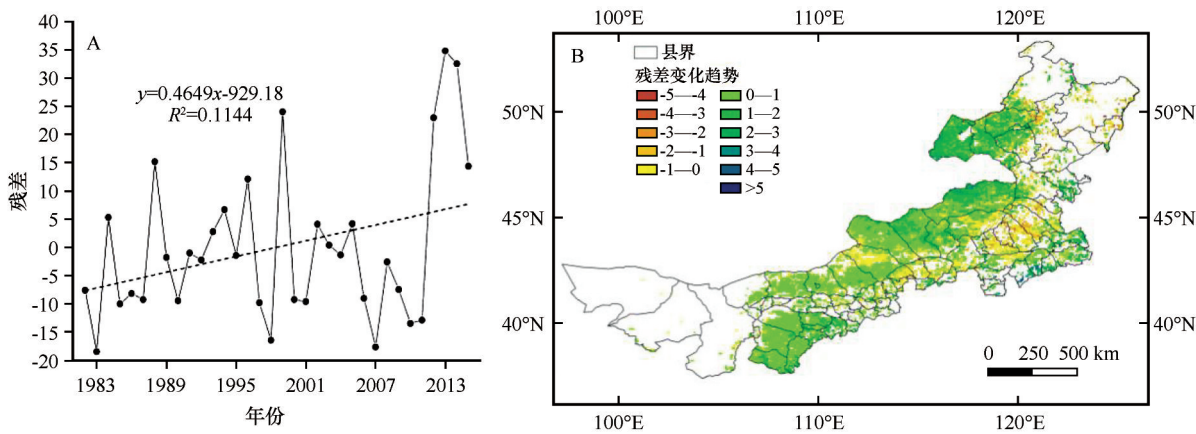


图7 1982—2015年内蒙古草原NPP残差年际变化(A)及变化趋势空间分布(B)

Fig.7 Interannual variation of grassland NPP residual value in Inner Mongolia from 1982 to 2015 (A) and spatial distribution of variation trend (B)

表3 综合驱动因素对草原NPP变化的影响 (km²)

Table 3 Effects of comprehensive driving factors on NPP change of grassland (km²)

NPP变化趋势	年降水量与年均气温对草原NPP有复相关作用			年降水量与年均气温对草原NPP无复相关作用		
	人类活动无明显干扰作用的面积	人类活动为负向干扰作用的面积	人类活动为正向干扰作用的面积	人类活动无明显干扰作用的面积	人类活动为负向干扰作用的面积	人类活动为正向干扰作用的面积
草甸草原	极显著减少	480.41	8 527.19	—	1 621.37	—
	极显著增加	780.66	—	9 488	60.05	1 741.47
	显著减少	1 981.67	5 584.71	—	2 281.92	—
	显著增加	1 080.91	—	4 924.15	—	1 561.32
	不显著变化	47 079.71	4 924.15	38 612.57	8 046.79	6 545.52
典型草原	极显著减少	780.66	9 908.36	—	60.05	—
	极显著增加	3 422.89	—	34 469.07	—	3 242.73
	显著减少	2 582.18	5 224.41	—	—	—
	显著增加	4 143.49	—	16 453.88	60.05	780.66
	不显著变化	90 015.92	3 903.29	94 579.77	120.1	1 140.96
荒漠草原	极显著减少	120.1	240.2	—	—	—
	极显著增加	1 621.37	—	4 864.1	—	240.2
	显著减少	1 561.32	240.2	—	—	—
	显著增加	2 522.13	—	4 924.15	—	60.05
	不显著变化	53 385.03	120.1	14 952.61	60.05	—
总计	211 558.43	38 672.62	223 268.31	8 347.04	10 508.86	17 474.74

变化的面积分别占其限制区域总面积的 0.77%、3.39%、2.56%、4.10% 和 89.17%，NPP 增加的面积大于减少的面积。荒漠草原 NPP 极显著减少、极显著增加、显著减少、显著增加、不显著变化的面积分别占限制区域总面积的 0.20%、2.74%、2.64%、4.26% 和 90.16%，NPP 增加的面积大于减少的面积。③当人类活动为负向干扰时，草甸草原 NPP 极显著、显

著减少面积分别占该限制条件区域总面积的 44.79%、29.34%，NPP 不显著变化的面积占该限制区域总面积的 25.87%，NPP 增加的面积为 0。典型草原 NPP 极显著、显著减少面积分别占该限制条件区域总面积的 52.05%、27.44%，NPP 不显著变化的面积占该区域总面积的 20.50%，无 NPP 增加区域。荒漠草原 NPP 极显著、显著减少面积分别占该限制

条件区域总面积的40.00%、20.00%, NPP不显著变化的面积占该限制区域总面积的20.00%, 无NPP增加区域。

在草原年NPP与年降水量、年均气温无复相关性区域: ①当人类活动为正向干扰时, 草甸草原NPP极显著、显著增加面积分别占该限制条件区域总面积的14.50%、13.00%, NPP不显著变化的面积占该限制条件区域总面积的72.50%, NPP减少的面积为0。典型草原NPP极显著、显著增加面积占其限制条件区域总面积的62.79%、15.12%, NPP不显著变化的面积占该区域总面积的22.09%, 无NPP减少区域。荒漠草原NPP极显著增加面积占该限制条件区域总面积的80.00%, NPP不显著变化的面积占该限制区域总面积的20.00%, 无NPP减少区域。②在人类活动无明显干扰时, 草甸草原NPP极显著增加、不显著变化的面积分别占该限制条件区域总面积的0.74和99.26%, NPP减少面积为0。典型草原NPP显著增加、不显著变化的面积占其限制区域总面积的33.33%、66.67%, 无NPP减少区域。荒漠草原NPP不显著变化的面积占限制区域总面积的100%, 无NPP增减区域。③当人类活动为负向干扰时, 草甸草原NPP极显著、显著减少面积分别占该限制条件区域总面积的15.52%、21.84%, NPP不显著变化的面积占该限制区域总面积的62.64%, NPP增加的面积为0。典型草原NPP极显著减少面积占其限制条件区域总面积的100%, 无NPP增加、不变化面积。荒漠草原人类活动为负向干扰面积为0。

3 讨论与结论

3.1 讨论

草原NPP模拟的准确性是研究的基础。本研究利用CASA模型模拟内蒙古草原NPP, 得到1982—2015年的草原年均NPP为 $266.94 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与以往研究结果有一定的不同, 但在合理范围($217.3—312 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[25]。模型参数中, 最大光能转化率 ε_{\max} 取值争议最大, 本文参考了包刚等^[20]对内蒙古草原植被最大光能利用率 ε_{\max} 取值, 草甸草原、典型草原和荒漠草原 ε_{\max} 分别为0.654、0.553和0.511 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。用实测数据进行精度验证, 回归系数 R^2 可以达到0.79, 可以很好地模拟内蒙古草原的NPP。

徐康等^[34]在2020年利用中国区域7个IGS站实测气象数据评估ERA5数据的精度, 发现ERA5数据精度优于早先的ERA-Interim数据, 采用ERA5数据能够更好地满足中国区域内气候建模的需求。

关于内蒙古草原NPP变化驱动力, 不同的研究者得出的结论也不相同。内蒙古大部分地区草原NPP与年降水量呈显著正相关, 而与年平均气温无显著相关性, 降水因子是草原NPP生长的主要限制因子^[23-29]。原因是研究区多为以高温少雨为特征的干暖化气候, 使得降水量成为制约植被NPP增长的主导因子^[29]。闫伟兄等^[30]认为内蒙古典型草原区NPP的增加主导原因是气温增加。穆少杰等^[31]认为降水和气温对不同草原类型NPP影响差异性比较大: 草甸草原降水充沛, 气温是主要的限制因子; 典型草原、荒漠草原地处干旱、半干旱地区, 降水是该地区的主要限制因子; 典型草原的NPP是略微下降的, 有可能是人类活动影响造成的。内蒙古东北部草甸草原年均NPP总量最大, 草原NPP与降水的正相关性较强, 但均与气温呈负相关关系^[33]。草原NPP变化到底是由气候还是人类活动主导, 占比各是多少, 尚无定量分析结果^[33]。以前的研究多是耦合草原NPP与水热因子间的关系, 综合水热和人类活动因子, 但并没有考虑水热复合效应, 定量分析出各因子及其复合作用下草原NPP变化的研究比较少。本研究认为, 草原地区受气候因子的影响, 降水是最大的驱动因子, 其次是降水与气温复合驱动, 单独的气温对草原NPP变化影响比较小, 作用的范围也集中在鄂尔多斯典型草原地区, 而不是内蒙古东北地区的草甸草原, 东北草甸草原NPP变化的限制因子是水热复合作用, 而不是单独的气温主导。研究结果不一致可能是采用数据类型、时间尺度、研究方法不同造成的。

草原NPP变化是气候驱动因子和人类活动共同作用的结果。1998年以来内蒙古先后实施了京津风沙源治理、退耕还林、退牧还草、围封保育、轮耕休耕等一系列生态恢复工程, 生态环境得到了很大的改善^[30]。特别是2011年《内蒙古自治区基本草原保护条例》颁布实施以来, 草原平均年NPP由2011年前为 $263.24 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 后几年快速增加到 $294.58 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。即使2015年干旱年份草原年NPP也可达到 $278.45 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 可见人类活动将对草原植被的恢复起到越来越重要的作用。

3.2 结论

1982—2015年内蒙古草原NPP总体处于增长的趋势。降水、降水与气温复合、气温驱动的面积分别占研究区总面积70.71%、20.11%和2.06%。人类活动起到正向作用的面积占草原总面积的41.12%，负作用的占5.34%。在气候和人类活动共同作用下草原生态环境得到了极大的改善。

参考文献:

- [1] Walker B, Steffen W. IGBP Science No.1: A Synthesis of GCTE and Related Research [M]. Stockholm, Sweden: IGBP, 1997: 1–24.
- [2] Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. Terrestrial Ecosystems in A Changing World [M]. Berlin, Germany: Springer, 2006: 15–34.
- [3] Chinese Academy of Sciences, Department of Life Sciences of State Commission of Chinese National Natural Science Foundation. Global Changes and Ecological Systems [M]. Shanghai, China: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 62–95.
- [4] Zhang X S. A vegetation-climate classification system for global change studies in China [J]. Quaternary Sciences, 1993, 13 (2): 157–269.
- [5] 刚成诚, 王钊齐, 杨悦, 等. 近百年全球草原生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应 [J]. 草业学报, 2016, 25 (11): 1–14.
- [6] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1101–1110.
- [7] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present [J]. Nature, 1990, 348(6303): 711–714.
- [8] Curlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. Global Change Biology, 2010, 4(2): 229–233.
- [9] Cramer W, Field C B. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): introduction [J]. Global Change Biology, 1999, 5(S1): 3–4.
- [10] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281(5374): 237–240.
- [11] Tamura M M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 81(1): 58–66.
- [12] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达. 全球生态学: 气候变化与生态响应 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296–300.
- [14] Lin H L, Cheng S H, Li F. Research progress on grassland net primary productivity (NPP) model [J]. Pratacultural Science, 2007, 24(12): 29–29.
- [15] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 736–753.
- [16] Gang C, Zhou W, Wang Z, et al. Comparative assessment of grassland NPP dynamics in response to climate change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010 [J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2015, 201(1): 57–68.
- [17] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603–608.
- [18] Li A, Wu J G, Huang J H. 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.
- [19] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算: 以中国内蒙古为例 [J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300–307.
- [20] 包刚, 辛晓平, 包玉海, 等. 内蒙古草原植被最大光能利用率取值优化研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3280–3286.
- [21] Geerken R, Ilaiwi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 490–504.
- [22] 尹燕燕, 侯向阳, 运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展 [J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1132–1139.
- [23] Gang C, Zhou W, Chen Y, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11): 4273–4282.
- [24] Chen T T, Li P, Liu S Q, et al. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: impacts of climate change and human activities [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(6): 948–962.
- [25] 潘萌甜, 梁俊红, 李佳, 等. 内蒙古温带草原 NPP 时空变化特征分析 [J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 233–240.
- [26] 张峰, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 786–797.
- [27] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 等. 改进 CASA 模型在内蒙古草原生产力估算中的应用 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2100–2106.
- [28] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价 [J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653–661.
- [29] 高艺宁, 王宏亮, 赵萌莉. 内蒙古荒漠草原植被 NPP 时空变化及气候因子分析: 以四子王旗为例 [J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 100–107.
- [30] 闫伟兄, 陈素华, 乌兰巴特尔, 等. 内蒙古典型草原区植被 NPP 对气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1625–1634.
- [31] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001–2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 [J]. 生态学报, 2013, 33 (12): 3752–3764.

- [32] 黄露,周伟,李佳慧,等.内蒙古不同类型草原NPP时空动态特征及其气候影响因素分析[J].草原与草坪,2019,39(2):3-11.
- [33] 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.
- [34] 徐康,邓兴升,邢承滨.中国地区ERA5资料计算ZTD精度评估[J].测绘工程,2020,9(6):27-33.

Spatial and temporal variation of grassland NPP and its driving forces in Inner Mongolia

Hua Yongchun, Sa Rula, Wang Bing

(College of Forestry, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, China)

Abstract: Net primary production(NPP)and its driving force analysis is one of the key issues in global change research. Based on GIMMS NDVI3g, ERA5 meteorological and grassland type data, annual grassland NPP was generated by CASA model. Taking grass of Inner Mongolia as the research object, the change trend of grassland NPP (1982–2015) were analyzed by using the trend analysis, partial correlation, multiple correlation and residual analysis, and the impact of climate factors and human activities on the NPP change was quantitatively determined. The results showed that: (1) From 1982 to 2015, the grassland area with extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$) NPP increase accounted for 8.83% and 24.01% of the total area of the study area; while the area with extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$) decrease accounted for 4.26% and 8.08%. The area of NPP increase was greater than the area of decrease, showing the grassland in recovery state. (2) 92.87% of the area in the study area showed a good correlation of NPP with climate factors. The temperature driving, precipitation driving and composite driving of precipitation and temperature accounted for 2.06%, 70.71% and 20.11% of the total area, respectively. The impact of climate change on the three grasslands was desert steppe > typical steppe > meadow steppe. (3) Human activities also had a great impact on grassland NPP. Among them, 41.12% of the total grassland area played a positive role ($P<0.1$) and 5.34% played a negative role ($P<0.1$). In summary, from 1982 to 2015, the grasslands in Inner Mongolia were generally in a state of restoration, and the ecological environment was greatly improved under the combined effects of climate and human activities.

Key words: Inner Mongolia grassland; NPP; trend change; driving force analysis